



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**REDISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DEL TÚNEL
DE VIENTO TV-CA-SP-UNB-01 DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE
BOGOTÁ D.C.**

Ing. Johanna Marcela Yepes Murillo

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Bogotá, Colombia

2017

**REDISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DEL TÚNEL
DE VIENTO TV-CA-SP-UNB-01 DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE
BOGOTÁ D.C.**

Ing. Johanna Marcela Yepes Murillo

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Mecánica

Director(a):

Ph.D., Juan Miguel Mantilla González

Línea de Investigación:

Dinámica de fluidos experimental y computacional

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Bogotá, Colombia

2017

Dedicatoria

Este arduo trabajo es dedicado con todo mi amor a mi Nita Marina de Jesús Urrego Rueda, la cual estaría dichosa de ver este logro. A mis padres Darío y Luz Mila que con todo su esfuerzo y dedicación me hicieron la persona que soy, gracias por todo el amor y la motivación para continuar. A mis queridos hermanos Jessica y Cristian quienes con sus logros personales me motivan a seguir avanzando, estoy muy orgullosa de ustedes. A Orion, Junior, Zoe y Susi por la compañía en las interminables noches de no dormir. A mi más querido amigo mi amado Henry, que con su apoyo incondicional y su sacrificio me ha permitido avanzar en mi vida profesional y me ha aceptado como soy. Para los únicos seres que amo en el mundo, todo mi trabajo y este logro es de ustedes.

Nita lo hice, todo es para ti. Gracias por mi maravillosa vida.

Agradecimientos

A mi director de Tesis Ing. Juan Miguel Mantilla González, por aceptar este proyecto y por la colaboración prestada.

A Dany Andres Gómez, por la asesoría y colaboración en el ensamble de los diferentes elementos estructurales requeridos para el montaje de esta herramienta investigativa. Excelente Maestro y gran amigo.

A mi querido amigo Diego Fernando Cortes por su inmensa ayuda y su apoyo durante los procesos de diseño y manufactura.

Al personal del Laboratorio de Máquinas Herramientas junto con su coordinador el Ing. José Manuel Arroyo por permitirme hacer uso del laboratorio para el desarrollo de pruebas experimentales.

El Ing. MSc. Jhonathan Orlando Murcia Piñeros, por su apoyo incondicional y su excelente asesoría durante cada etapa del desarrollo. Gran Amigo y brillante persona.

El Ph.D. Hernán Darío Cerón Muñoz, por la información suministrada y por compartir su experiencia para el desarrollo de este proyecto.

Por último quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. Nelson Arzola de la Peña por permitirme hacer uso del Laboratorio de Diseño de Máquinas y Prototipos, para el desarrollo de este proyecto y brindarme los espacios para sacar adelante mi maestría. Muchas gracias por el apoyo.

Resumen

A continuación se presentan los procesos de rediseño y caracterización del túnel de viento subsónico con sección de pruebas cerrada TV-CA-SP-UNB-01 (Túnel de viento de circuito abierto con sección de pruebas cerrada de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá No 1), perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, adjunto al Laboratorio de Diseño de Máquinas y Prototipos.

Durante la etapa de rediseño (mejoras al diseño inicial) se implementa un análisis del desarrollo operacional del Túnel de Viento o banco de pruebas por medio de pruebas experimentales y análisis numérico mediante la técnica de dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés), buscando fenómenos de vorticidad, circulación, turbulencia y desprendimiento de capa límite. Se observa el comportamiento del flujo en el interior de la zona de pruebas y se definen los componentes estructurales que deben ser reemplazados. Se da paso a los procesos de manufactura realizados en las diferentes secciones que componen el Túnel de viento los cuales son evaluados en la puesta en funcionamiento.

En la fase de caracterización se presenta el diseño experimental planteado y los resultados obtenidos en cada una de las configuraciones de estudio, esto con el fin de determinar tanto los parámetros de flujo como las condiciones operacionales del túnel de viento TV-CA-SP-UNB-01 y realizar la validación de los modelos numéricos desarrollados.

El proyecto de investigación es de carácter teórico-práctico con un enfoque experimental, en donde se establecen las características del flujo al interior de la zona de pruebas y se registran los parámetros de rendimiento, estableciendo así las condiciones operacionales del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 para el desarrollo de actividades académicas a nivel de pregrado y posgrado.

Palabras clave: Túnel de Viento Subsónico, CFD, Caracterización experimental, Visualización de flujo.

Abstract

The document presented below records the detailed process of redesigning and characterization of the open circuit wind tunnel with closed test section TV-CA-SP-UNB-01, belonging to the Department of Mechanical and Mechatronics Engineer of the National University of Colombia, located in the Laboratory of Machines and Prototypes Design.

During the redesign stage (modifications to the initial design) an analysis of the operational development of the wind tunnel or test bench is implemented through experimental tests and numerical analysis using the technique of computational fluid dynamics CFD, looking for phenomena of vorticity, circulation, turbulence and boundary layer detachment. The behavior of the flow within the test area is observed and the structural components which must be replaced are defined. The manufacturing processes carried out in the different sections of the wind tunnel are presented, which are evaluated in the operation process.

The characterization presents the proposed experimental design and the results of each configurations studied, this in order to determine both the flow parameters and operating conditions of the wind tunnel TV-CA-SP-UNB-01 and to validate the numerical models developed.

The research project is a theoretical-practical type with an experimental approach, where the flow characteristics within the test section are established and the performance parameters are recorded in a comprehensive manner, thus establishing the operating conditions of the wind tunnel TV-CA-SP-UNB-01 for the development of academic activities at undergraduate and graduate subjects of aerodynamic research.

Keywords: Subsonic Wind Tunnel, CFD, Experimental characterization, FLOW Visualization.

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Abstract	X
Lista de símbolos	XVII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del Problema	2
1.2. Hipótesis Del Trabajo	3
2. ESTADO DEL ARTE	4
2.1. Marco Histórico	4
2.2. Clasificación Túneles de Viento	7
2.2.1. Clasificación Túneles de Viento - Clasificación Según Tipo de Circuito	7
2.2.2. Clasificación Túneles de Viento - Clasificación Según Sección de Pruebas	7
2.2.3. Clasificación Túneles de Viento - Clasificación Según Velocidad	9
2.3. Antecedentes Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01	9
3. PRUEBAS COMPUTACIONALES	12
3.1. Marco Teórico	12
3.1.1. Marco Teórico - Régimen de Flujo	13
3.1.2. Marco Teórico - Principios de Conservación	13
3.1.3. Marco Teórico - Flujo Incomprensible	14
3.1.4. Marco Teórico - Flujo Turbulento	14
3.1.5. Marco Teórico - RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Method)	15
3.1.6. Marco Teórico - Ley de la Pared	17
3.1.7. Marco Teórico - Malla	18
3.1.8. Marco Teórico - Número de Courant	19
3.2. Diseño Computacional	20
3.2.1. Diseño Computacional - Validación Modelo	23
3.2.2. Diseño Computacional - Estudios de Independencia de Malla	24
3.2.3. Diseño Computacional - Estudio Perfil de Velocidad	26

3.2.4.	Diseño Computacional - Estudio Configuración Tomas de Presión . . .	27
3.2.5.	Diseño Computacional - Estudio Caso de Flujo Externo	28
3.3.	Recursos Computacionales	29
3.4.	Configuración Numérica Estudios Computacionales	30
3.4.1.	Configuración Numérica Estudios Computacionales - Dominio	30
3.4.2.	Configuración Numérica Estudios Computacionales - Condiciones de Frontera	31
3.4.3.	Configuración Numérica Estudios Computacionales - Velocidad y Presión	33
3.4.4.	Configuración Numérica Estudios Computacionales - Modelo $k - \varepsilon$. . .	34
3.5.	Validación del Modelo	36
3.5.1.	Validación Modelo - Malla	36
3.5.2.	Validación Modelo - Resultados y Análisis	37
3.6.	Estudios de Independencia de Malla	39
3.6.1.	Estudios de Independencia de Malla - Estudio de Independencia de Malla Dominio sin Modelo	39
3.6.2.	Estudios de Independencia de Malla - Estudio de Independencia de Malla Dominio con Modelo	42
3.7.	Estudios Perfil de Velocidad	45
3.7.1.	Estudios Perfil de Velocidad - Malla	45
3.7.2.	Estudios Perfil de Velocidad - Resultados y Análisis	45
3.8.	Estudios Configuración Toma de Presión	47
3.8.1.	Estudios Configuración Toma de Presión - Malla	48
3.8.2.	Estudios Configuración Toma de Presión - Resultados y Análisis	49
3.9.	Estudio Caso de Flujo Externo	55
3.9.1.	Estudio Caso de Flujo Externo - Malla	57
3.9.2.	Estudio Caso de Flujo Externo - Resultados y Análisis	58

4. PROCESOS DE MANUFACTURA 83

4.1.	Evaluación Preliminar	83
4.2.	Sistema de Potencia	84
4.3.	Sistema de Juntas	87
4.4.	Sistema de Visualización de Flujo	93
4.4.1.	Sistema de Visualización de Flujo - Generador de Humo	94
4.4.2.	Sistema de Visualización de Flujo - Sistema de Iluminación	98
4.5.	Sistema de Toma de Datos	100
4.5.1.	Sistema de Toma de Datos - Tomas Estáticas	101
4.5.2.	Sistema de Toma de Datos - Tomas Ingreso de Instrumentos	101
4.5.3.	Sistema de Toma de Datos - Multimanómetro de Presión	103

5. PRUEBAS DE LABORATORIO	105
5.1. Marco Teórico	105
5.1.1. Marco Teórico - Ecuación de Bernoulli	105
5.1.2. Marco Teórico - Presión	106
5.1.3. Marco Teórico - Temperatura	109
5.1.4. Marco Teórico - Tubo Pitot-Estático	110
5.1.5. Marco Teórico - Visualización de Flujo	110
5.2. Diseño de Experimentos Pruebas Experimentales	111
5.2.1. Diseño de Experimentos Pruebas Experimentales - Rango de Velocidad a lo Largo del Tiempo	112
5.2.2. Diseño de Experimentos Pruebas Experimentales - Perfil de Velocidad	113
5.2.3. Diseño de Experimentos Pruebas Experimentales - Perfil de Presión .	114
5.2.4. Diseño de Experimentos Pruebas Experimentales - Distribución de Presión	115
5.2.5. Diseño de Experimentos Pruebas Experimentales - Mapa de Presión .	116
5.2.6. Diseño de Experimentos Pruebas Experimentales - Caso de Flujo Externo	117
5.3. Configuración Experimental	119
5.3.1. Configuración Experimental - Instrumentos de Medición	119
5.3.2. Configuración Experimental - Cilindros Rectangulares	121
5.4. Rango de Velocidad a lo Largo del Tiempo	122
5.4.1. Rango de Velocidad a lo Largo del Tiempo - Montaje Experimental .	123
5.4.2. Rango de Velocidad a lo Largo del Tiempo - Resultados y Análisis . .	123
5.5. Perfil de Velocidad	125
5.5.1. Perfil de Velocidad - Montaje Experimental	125
5.5.2. Perfil de Velocidad - Resultados y Análisis	126
5.6. Perfil de Presión	128
5.6.1. Perfil de Presión - Montaje Experimental	128
5.6.2. Perfil de Presión - Resultados y Análisis	128
5.7. Distribución de Presión	130
5.7.1. Distribución de Presión - Montaje Experimental	130
5.7.2. Distribución de Presión - Resultados y Análisis	131
5.8. Mapa de Presión	135
5.8.1. Mapa de Presión - Montaje Experimental	135
5.8.2. Mapa de Presión - Resultados y Análisis	135
5.9. Caso de Flujo Externo	139
5.9.1. Caso de Flujo Externo - Montaje Experimental	139
5.9.2. Caso de Flujo Externo - Resultados y Análisis	140
6. SIMULACIONES Vs DATOS EXPERIMENTALES	148
6.1. Perfil de Velocidad	148

6.2. Distribución de Presión	149
6.3. Caso de Flujo Externo	150
6.3.1. Caso de Flujo Externo - Perfil de Velocidad	150
6.3.2. Caso de Flujo Externo - Distribución de Presión	154
7. Conclusiones y Recomendaciones	156
7.1. Conclusiones	156
7.2. Recomendaciones	158
A. Anexo A: RECURSOS COMPUTACIONALES	159
B. Anexo B: VALIDACIÓN MODELO	160
C. Anexo C: ESTUDIOS DE INDEPENDENCIA DE MALLA.	162
C.1. Dominio Sin Modelo	162
C.2. Dominio Con Modelo	163
D. Anexo D: ESTUDIOS PERFIL DE VELOCIDAD	164
E. Anexo E: ESTUDIOS CONFIGURACIÓN TOMAS DE PRESIÓN	166
F. Anexo F: ESTUDIOS CASO FLUJO EXTERNO	168
F.1. Resultados - Características Aerodinámicas Cilindros Rectangulares	170
F.2. Resultados - Características Aerodinámicas Dominio	175
F.3. Imágenes Simulaciones	198
G. Anexo G: PUNTOS DE MEDICIÓN PRUEBAS EXPERIMENTALES	206
G.1. Puntos de Medición - Tomas para Ingreso de Instrumento No 1, 2.	206
G.2. Puntos de Medición - Tomas Estáticas Zona de Pruebas y <i>Settling Chamber 2</i>	208
G.3. Puntos de Medición - Puntos de Medición Coordinada X.	209
G.4. Puntos de Medición - Puntos de Medición Caso Flujo Externo.	211
G.4.1. Perfil de Velocidad	211
G.4.2. Distribución de Presión	212
H. Anexo H: ESPECIFICACIONES DE DISEÑO CILINDROS RECTANGULARES	215
I. Anexo I: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS EXTECH HD350	219
J. Anexo J: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS TERMOHIGRÓMETRO Y BARÓMETRO REGISTRADOR DE DATOS PCE-THB 40	221
K. Anexo K: RANGO DE VELOCIDAD A LO LARGO DEL TIEMPO	223

L. Anexo L: MAPA DE PRESIÓN	226
M. Anexo M: CASO DE FLUJO EXTERNO	229
M.1. Perfil de Velocidad	229
M.2. Distribución de Presión	238
N. Anexo N: FOTOGRAFÍAS	247
Ñ. Anexo O: PLANOS	251
Bibliografía	284

-

Lista de Símbolos

Símbolos con Letras Latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Área de Referencia	m^2	DF
C	Número de Courant	Adimensional	Ver Sección 3.1.8
C_d	Coefficiente de Arrastre	Adimensional	$C_d = \frac{D}{\rho A \frac{U^2}{2}}$
C'_d	Coefficiente de Arrastre Fluctuante	Adimensional	$C'_d = C_d - C_{dProm}$
C_l	Coefficiente de Sustentación	Adimensional	$C_l = \frac{2L}{\rho A U^2}$
C'_l	Coefficiente de Sustentación Fluctuante	Adimensional	$C'_l = C_l - C_{lProm}$
C_{lrms}	Desviación Estándar del Coeficiente de Sustentación	Adimensional	$C_{lrms} = \sqrt{\frac{C_l^2}{N}}$
C_μ	Constante del Modelo Numérico	Adimensional	Ver Sección 3.1.5
C_{ε_1}	Constante del Modelo Numérico	Adimensional	Ver Sección 3.1.5
C_{ε_2}	Constante del Modelo Numérico	Adimensional	Ver Sección 3.1.5
C_p	Coefficiente de Presión	Adimensional	Ver Sección 5.1.2
D	Diámetro o Distancia	m	DF
e_s	Presión de Saturación de Vapor de Agua Efectiva	$^\circ K$	Ver Sección 5.1.3
f	Frecuencia	s^{-1}	$\frac{1}{T}$
g	Aceleración Gravitacional	m/s^2	DF
g_l	Gravedad Local	m/s^2	Ver Sección 5.1.2
h, z	Altura o Elevación	m	DF
I	Intensidad de Turbulencia	%	Ver Sección 3.4.4
k	Energía Cinética Turbulenta	$\frac{m^2}{s^2}$	Ver Sección 3.4.4
l	Longitud de Escala Turbulenta	%	Ver Sección 3.4.4
L	Longitud Característica	m	DF
p	Presión	Pa	Ver Sección 5.1.2

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
p_a	Presión Atmosférica	Pa	Ver Sección 5.1.2
p_0	Presión Absoluta	Pa	Ver Sección 5.1.2
p_∞	Presión Estática	Pa	Ver Sección 5.1.2
q_∞	Presión Dinámica	Pa	Ver Sección 5.1.2
Re	Número Reynolds	Adimensional	Ver Sección 3.1.1
R_h	Humedad Relativa	%	$R_h = \frac{n_v}{n_{vs}}$
S	Temperatura de Sutherland	$^\circ K$	Ver Sección 5.1.3
St	Número de Strouhal	Adimensional	$St = \frac{fL}{U}$
t^*	Tiempo Adimensional	Adimensional	$t^* = \frac{tU}{D}$
t	Tiempo	s	DF
T	Periodo	s	DF
T	Temperatura	$^\circ C$	Ver Sección 5.1.3
u^+	Velocidad Adimensional	Adimensional	$u^+ = \frac{U}{u_\tau}$
u_τ	Velocidad de Fricción	Adimensional	$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$
$v_\infty(U)$	Velocidad	$\frac{m}{s}$	$(\frac{dr}{dt}, r\frac{dv}{dt}, \frac{dz}{dt})$
y^+	Distancia Adimensional a la Pared	Adimensional	$y^+ = \frac{Uy}{\nu}$
W	Ancho	m	DF
z	Long	m	DF

Símbolos con Letras Griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
β	Ángulo de Inclinación Manómetro	$^\circ$	DF
ε	Disipación de Turbulencia	$\frac{m^2}{s^3}$	Ver Sección 3.4.4
μ	Viscosidad Dinámica	$\frac{Kg}{ms}$	$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}}$
ν	Viscosidad Cinemática	$\frac{m^2}{s}$	$\nu = \frac{\mu}{\rho}$
ν_T	Viscosidad Turbulenta	$\frac{Kg}{ms}$	Ver Sección 3.4.4
ρ	Densidad	$\frac{Kg}{m^3}$	$\rho = \frac{m}{V}$

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
σ_k	Constante del Modelo Numérico	Adimensional	Ver Sección 3.1.5
σ_ε	Constante del Modelo Numérico	Adimensional	Ver Sección 3.1.5
τ_w	Esfuerzo Cortante en la Pared	$\frac{Kg}{ms^2}$	$\tau_w = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)_{y=0}$
φ	Latitud	Grados Decimales	DF

Abreviaturas

nut	Viscosidad
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamic
<i>DF</i>	Dimensión fundamental
<i>DNS</i>	Direct Numerical Simulation
<i>E – PV</i>	Estudio Perfil de Velocidad
<i>EC – FE</i>	Estudio Caso de Flujo Externo
<i>EIM – CM</i>	Estudios de Independencia de Malla, Dominio con Modelo
<i>EIM – SM</i>	Estudios de Independencia de Malla, Dominio sin Modelo
<i>ETP – CM</i>	Estudios Configuración Tomas de Presión, Dominio con Modelo
<i>ETP – SM</i>	Estudios Configuración Tomas de Presión, Dominio sin Modelo
n_v	Número de moles de vapor de agua en el aire
n_{vs}	Número de moles de vapor de agua en el aire saturado
<i>LES</i>	Large Eddy Simulation
<i>RANS</i>	Reynolds-Averaged Navier-Stokes method
<i>URANS</i>	Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes
<i>V – M</i>	Validación Modelo
<i>TV – CA – SP – UNB – 01</i>	Ver Sección 1

1. INTRODUCCIÓN

Un túnel [3] de viento es un dispositivo que permite el paso de una corriente de aire controlada, generada por un ventilador o un sistema adecuado, a lo largo de una sección de trabajo o de pruebas. En esta se instala debidamente un modelo a escala con el fin de lograr un estudio del comportamiento del cuerpo inmerso en un fluido en movimiento. Las características aerodinámicas del modelo, así como el campo de flujo alrededor del mismo, se miden mediante los instrumentos de prueba adaptados al Túnel de viento [10].

En Colombia existen varios túneles de viento subsónicos, la mayoría son de fabricación extranjera. Estos están bajo responsabilidad de instituciones como el Centro de Estudios Aeronáuticos de la Aeronáutica Civil de Colombia [15], Fundación Universitaria Los Libertadores [28], Pontificia Universidad Bolivariana de la ciudad de Medellín [12], Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá [25], Universidad de Los Andes [6], Universidad Nacional sede Medellín [14], Universidad Tecnológica de Pereira [40], Universidad Industrial de Santander [43] y Fuerza Aérea Colombiana [9].

El planteamiento investigativo del presente documento se desarrolla sobre el Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 (Túnel de Viento de Circuito Abierto con Sección de Pruebas Cerrada de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá No 1) perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, adjunto al Laboratorio de Diseño de Máquinas y Prototipos, cuyo diseño y fabricación es nacional con componentes importados (Ventilador). Es un túnel de viento subsónico de circuito abierto de $4,58m$ de largo, en la zona de ingreso tiene $0,978m$ de ancho y $1,79m$ de alto, con zona de pruebas semi-octogonal cerrada. Se compone de seis secciones (1) primera sección de estabilización, (2) sección de contracción, (3) segunda sección de estabilización, (4) sección de pruebas, (5) difusor, (6) sección de potencia. Cada sección es desmontable con el objetivo de permitir el cambio partes y el estudio de otras configuraciones (Ver Figura **2-6**).

La manipulación de la velocidad se realiza por medio de un variador de frecuencia modelo Siemens MICROMASTER 420 para el cual se tienen caracterizadas 12 velocidades promedio de acuerdo a 12 valores de frecuencia predeterminados. Para comprensión del lector, en el presente documento se hace referencia a estas frecuencias para describir las velocidades de operación del banco de pruebas.

El Túnel de Viento modelo TV-CA-SP-UNB-01 fue diseñado y construido en una primera etapa por los Ingenieros Alejandro Arango y Johanna Marcela Yepes Murillo [33], bajo la dirección del Ing. MSc Jhonathan Orlando Murcia Piñeros. Dando continuidad al trabajo desarrollado, y siendo consecuentes con las necesidades investigativas y de docencia de la Universidad Nacional de Colombia, se plantea la ejecución de la segunda etapa de desarrollo, en la que por medio de un acercamiento teórico-experimental sobre el diseño inicial del banco de pruebas, se establecen procedimientos de implementación de sistemas de visualización y toma de datos, así como también el mejoramiento de secciones de acuerdo a pruebas preliminares. De igual forma se caracteriza la corriente de flujo y las condiciones de operación con el fin de proporcionar las especificaciones técnicas del Túnel de Viento.

El documento a continuación se compone de siete capítulos donde se presenta el rediseño y caracterización del Túnel de Viento Subsónico de Circuito Abierto de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, para el cual se implementan sistemas de visualización de flujo y toma de datos. Se tiene en cuenta los precedentes históricos y los requerimientos establecidos por la Universidad para desarrollos académicos y de investigación exclusivos de la misma.

En el presente capítulo se aborda el planteamiento del problema y se definen las hipótesis manejadas a lo largo del desarrollo de la investigación. En el capítulo dos se despliega una breve introducción a la historia de los túneles de viento y sus respectivas configuraciones, dando paso a los antecedentes investigativos acerca de modelamiento de flujo, calibración y experimentación en túneles de viento. En el tercer capítulo se presenta el planteamiento de los modelos matemáticos empleados para el desarrollo de simulaciones, así como las condiciones y parámetros estipulados para estas; de igual forma se presentan los resultados obtenidos para los diferentes casos planteados y las validaciones realizadas con los modelos.

El capítulo número cuatro presenta el registro de los procesos de manufactura y materiales tratados en las modificaciones aplicadas a cada una de las secciones que conforma el Túnel de viento. Incluye el proceso de implementación de los sistemas de visualización de flujo y toma de datos. El capítulo cinco relaciona todo lo concerniente al desarrollo experimental, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de flujo y pruebas de flujo externo, así como su respectivo análisis. El sexto capítulo se dedica a la validación de los resultados obtenidos en las pruebas computacionales con los resultados obtenidos en las pruebas experimentales. Y para finalizar el documento, se presentan las conclusiones obtenidas de la investigación y recomendaciones.

1.1. Planteamiento del Problema

La Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, señala el propósito de tener un Túnel de viento con el que se puedan validar resultados obtenidos mediante dinámica computacional

de fluidos, y apoye las actividades académicas desarrolladas a nivel de pregrado y posgrado, ya sea de docencia o de investigación [13].

Siendo consecuentes con el trabajo realizado y con el propósito de obtener un banco de pruebas que permita diferentes configuraciones de estudio, se procede a determinar las características del flujo de aire y sus parámetros de rendimiento; esto con el fin de establecer cuáles son las condiciones de funcionamiento y limitaciones que tiene el túnel de viento TV-CA-SP-UNB-01, los cuales son los interrogantes planteados para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

En la propuesta de tesis presentada se planteó el rediseño, mantenimiento e implementación de tomas de datos y sistemas de visualización, con el objetivo de permitir la manipulación de los parámetros de operación y posterior verificación del comportamiento del flujo en el interior del Túnel de viento y en las distintas configuraciones de estudio para el caso de flujo externo. Esto con el fin de hacer entrega al Laboratorio de Diseño de Máquinas y Prototipos, adjunto al Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, el banco de pruebas aerodinámico para el cual se adjunta el manual de operaciones y especificaciones técnicas. Los resultados obtenidos de lo planteado anteriormente así como el manual de operaciones del Túnel de viento TV-CA-SP-UNB-01 se presentan en el trabajo a continuación.

1.2. Hipótesis Del Trabajo

Para el desarrollo del trabajo de investigación se presenta el siguiente compendio de hipótesis para las cuales se proporcionan resultados que validan o rechazan las mismas. Se inicia con el planteamiento de la hipótesis principal en la cual se tiene el siguiente interrogante: ¿El Túnel de viento TV-CA-SP-UNB-01 posee los requerimientos especificados por la Universidad Nacional de Colombia para docencia y desarrollo de actividades académicas?. Para dar respuesta a el anterior planteamiento se realiza caracterización y verificación del Diseño del Túnel de viento TV-CA-SP-UNB-01, con el fin de establecer los parámetros de trabajo que cumplan con dichos requerimientos. Para esto se realiza intervención, mejoramiento, adecuación e implementación de tomas de datos y sistemas de visualización de flujo en las distintas secciones que componen el banco de pruebas.

Posterior a esto se genera una segunda hipótesis en la que se supone que el Túnel de viento TV-CA-SP-UNB-01 mantiene condiciones estables que permite el análisis de casos de flujo externo. De acuerdo a lo anterior, se procede a realizar simulaciones mediante Dinámica Computacional de Fluidos y pruebas experimentales, con el fin de definir las características del flujo al interior del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01. De igual forma la corriente de flujo se somete a determinados análisis en los cuales se verifica el sistema operativo del banco de pruebas mediante el desarrollo de casos de flujo externo.

2. ESTADO DEL ARTE

En el capítulo se presenta el marco histórico y los antecedentes presentados para el desarrollo del proyecto de investigación.

2.1. Marco Histórico

Inicialmente se buscó manipular las fuentes naturales relativamente estables de viento, con este fin el matemático inglés Benjamin Robins (1707-1751) [10], tiene la idea de emplear un brazo giratorio el cual proporciona la mayor parte de los datos aerodinámicos sistemáticos recogidos hasta el final del siglo XIX, (Ver Figura 2-1).

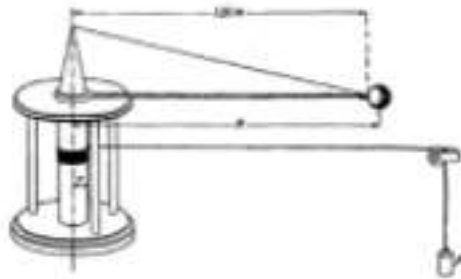


Figura 2-1.: Marco Histórico - Brazo giratorio de Benjamin Robins [27]

En la década de 1880, Frederick Phillips (1845- 1912) [4] diseña, construye y pone en funcionamiento un túnel de viento en el cual un inyector de vapor se usa como medio de propulsión de aire (Ver Figura 2-2).

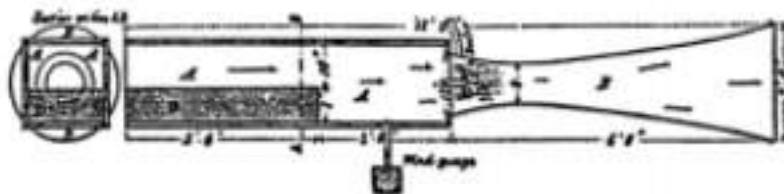


Figura 2-2.: Marco Histórico - Esquema del túnel de viento de Horatio F. Phillips [4]

Para finales de siglo XIX entre 1866 y 1889, en Alemania, Otto Lilienthal (1848-1896) construye brazos giratorios, donde se obtienen varios resultados certeros que son aprovechados por Sir Hiram Maxim (1840-1916) en la construcción de su túnel de viento de 3.6 m de largo, con una sección de pruebas de 0.2 m^2 , donde detecta por primera vez los efectos de la interferencia en la aerodinámica [10].

Para 1897 el físico soviético Konstantín Eduárdovich Tsiolkovski [37], crea el primer túnel de viento del imperio ruso. Mientras que en América, Wilbur (1867-1912) y Orville (1871-1948) Wright [10], construyen su primer túnel de viento el cual consiste en un tubo cuadrado que canalizaba el aire. El primer laboratorio de túnel de viento después de los grandes avances de los hermanos Wright dedicado a la investigación aeronáutica fue operado por Albert Zahm. Este túnel de viento tenía dimensiones en la sección de pruebas de 1.8m x 1.8m con 12.1m de largo, y usaba como rectificadores de flujo un Honeycomb¹ y pantallas de gasa que aseguraban un flujo homogéneo [10].

En Francia, Alexandre Gustave Eiffel (1832- 1923) [27], también construyó un laboratorio de aerodinámica. El túnel propuesto manejaba un esquema donde se tenía una cámara de succión con una tobera (D), un enderezador de flujo (G), la sección de pruebas (E) donde acomodaba un modelo (M), la balanza de fuerzas (W) y una toma de aire (T); de ahí se desprendía la cámara que cubría el ventilador (V)². En este caso la succión se realizaba dentro de una sala evacuada (A) la cual debía ser cuidadosamente sellada tal como se aprecia en la Figura 2-3 .

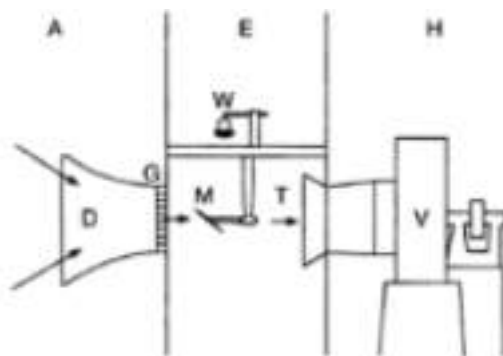


Figura 2-3.: Marco Histórico - Instalación de pruebas de Gustav Eiffel. [23]

En Göttingen³, bajo la dirección del físico alemán, Ludwig Prandtl, se logra consolidar el

¹Estructura con forma de panal de abeja, empleada para disminuir la turbulencia del flujo que ingresa al túnel de viento

²Párrafo traducido a partir del texto original de: Hirschel, Ernst Heinrich. PREM, Horst, MADELUNG, Gero. Aeronautical Research in Germany: From Lilienthal Until Today, Volume 147. First Edition. Germany: Springer, 2001, p.188.

³Municipio y ciudad alemana, ubicada en el Estado federado de Baja Sajonia.

primer túnel de viento de circuito cerrado para el retorno del flujo, poniéndose en funcionamiento en 1908. La alta eficiencia de este diseño estuvo dada por la incorporación de perfiles aerodinámicos en las esquinas para girar el flujo, con el uso adicional de pantallas y honeycombs estratégicamente posicionados para homogeneizar el mismo y obtener laminaridad. Prandtl incorpora dos características que se han convertido en estándar: una cámara de estabilización o apaciguamiento adyacente a la sección de pruebas, donde las perturbaciones del flujo pueden disminuir, y un cono de contracción en la entrada de la sección de pruebas [10].

El comité nacional asesor en aeronáutica o por sus siglas en inglés NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*), decide dar inicio a la construcción del túnel de viento NACA-N°1. Un túnel de baja velocidad sin circuito de retorno de aire, compuesto por un motor eléctrico de 200 HP que lograba velocidades de 40.2 m/s en su sección de pruebas circular de 1.5m (5 ft) de diámetro [10].

El periodo comprendido después de 1930 se caracteriza por el desarrollo de túneles de viento de grandes longitudes que brindan información confiable y en los cuales se pueden poner a prueba aviones y componentes de escala completa. Estos túneles de viento se caracterizan principalmente por que poseen ratas de contracción grandes, aumentando la implementación de mallas de turbulencia finas y dando especial cuidado tanto al contorno de la entrada como la sección de ingreso a la zona de pruebas [22].

Después de la Segunda Guerra Mundial, la NACA reconoce la necesidad de tener instalaciones con túneles de viento donde se obtengan velocidades supersónicas e hipersónicas. Es así como entre los años 1940 y 1950, se crean túneles en donde se puede estudiar fenómenos de aerodinámica y aerotermodinámica [10] gracias a la conversión de la energía cinética del gas de prueba a energía térmica como resultado de las ondas de choque[38]. Las características dinámicas del fluido alrededor de los modelos, incluyendo los fenómenos de transición de laminar a turbulento en la capa límite son estudiados.

El interés en la aerodinámica se incrementa significativamente en los años 50 principalmente por el desarrollo de misiles intercontinentales y el surgimiento de los programas espaciales. Durante este período un incremento en la variedad y el número de túneles de viento construidos se evidencia, llegando a su clímax en 1984. Para 1987 se empieza a implementar la dinámica de fluidos computacional CFD, para el desarrollo de pruebas y calibración en túneles de viento [17].

El desarrollo tecnológico a partir de este punto, se desglosa en investigación de sistemas de visualización y nuevas configuraciones de túneles de viento basadas en la combinación de las alternativas ya dispuestas; hasta llegar a las disposiciones actuales.

2.2. Clasificación Túneles de Viento

Los túneles de viento pueden ser clasificados de muchas formas encontrando en la literatura más de diez tipos de túneles de viento desarrollados con características diferentes y para diferentes propósitos. Para efectos del presente documento se toman las tres clasificaciones principales, las cuales van de acuerdo al tipo de circuito, sección de pruebas o velocidad.

2.2.1. Clasificación Túneles de Viento - Clasificación Según Tipo de Circuito

Los túneles de viento se clasifican según su retorno o circuito en dos tipos, circuito abierto y circuito cerrado [11]. En la Tabla 2-1 se presentan las generalidades de cada circuito.

2.2.2. Clasificación Túneles de Viento - Clasificación Según Sección de Pruebas

Fundamentalmente se dan dos configuraciones de sección de prueba, abierta y cerrada como se explica en la Tabla 2-2.

TIPO	CARACTERÍSTICAS
Túnel de Viento de Circuito Abierto	Se caracteriza por tener una configuración en la cual el aire se toma de la intemperie, se pasa por la sección de pruebas, y se re circula de nuevo a la atmósfera. El flujo de aire al interior del túnel se puede manipular por medio de inyección o por sistemas de succión o soplado. Tiene la ventaja de permitir la operación de motores de combustión interna y experimentar visualización con humo [11].
Túnel de Viento de Circuito Cerrado	También se conoce como tipo Prandtl o Göttingen, se caracteriza por tener un flujo de aire que re circula continuamente con poco o ningún intercambio con el exterior. Requiere menos energía por lo cual es apto para trabajo continuo en desarrollos experimentales. La calidad de flujo puede ser controlada y es independiente de condiciones climáticas. Para experimentos donde intervenga humo o motor de combustión interna, se debe adaptar un sistema de escape [11].

Tabla 2-1.: Clasificación Túneles de Viento - Clasificación Según Tipo de Circuito

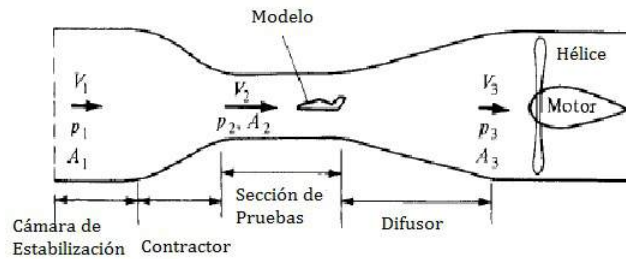


Figura 2-4.: Clasificación Túneles de Viento - Esquema Túnel de Viento de Circuito Abierto. Adaptado de [5].

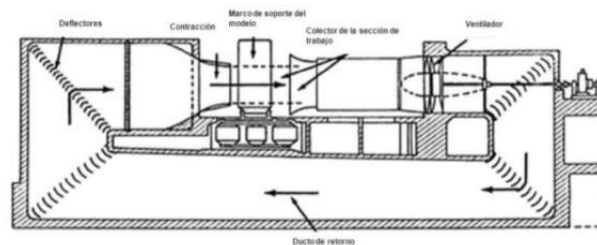


Figura 2-5.: Clasificación Túneles de Viento - Esquema Túnel de Viento de Circuito Cerrado. Túnel de viento de Prandtl en Göttingen 1919 [4].

TIPO	CARACTERÍSTICAS
Túnel de Viento con sección de pruebas abierta	Una sección de prueba abierta o tipo Eiffel, es aquella que no se encuentra limitada por paredes [24].
Túnel de Viento con sección de pruebas cerrada	Una sección de pruebas cerrada o tipo NPL (National Physics Laboratory), es aquella que tiene la sección enmarcada por paredes que limitan su dominio [4].

Tabla 2-2.: Clasificación Túneles de Viento - Clasificación Según Sección de Pruebas

2.2.3. Clasificación Túneles de Viento - Clasificación Según Velocidad

Otra forma de clasificar un túnel de viento es mediante el régimen de velocidad que alcanza, dentro de esta clasificación se ubican dos subclasificaciones importantes: según número Mach y según número de Reynolds. La Tabla 2-3 presenta las características principales de cada régimen.

TIPO	CARACTERÍSTICAS
Túnel de Viento Subsónico	Los túneles de viento clasificados como subsónicos, son operados a números de Mach bajos, es decir con una velocidad en la sección de prueba de hasta $M \leq 0,3$. Dentro de esta categoría se tienen dos subgrupos que comprenden flujo incompresible y flujo compresible [24].
Túnel de Viento Transónico	Generalmente se maneja una sección de pruebas acorde a la longitud del prototipo, considerando que el modelo inmerso va a tener un flujo alrededor que puede exceder la velocidad del sonido. El flujo logrado en túneles de este tipo maneja valores de $0,8 < M < 1,2$ [24].
Túnel de Viento Supersónico	Se caracteriza por desarrollar velocidades que se encuentran en un rango de $1,2 < M < 5,0$. Generalmente se tiene un diseño convergente divergente que les permite alcanzar la velocidad sónica en la garganta y el número de Mach deseado en la sección de pruebas [24].
Túnel de Viento Hipersónico	Opera habitualmente de manera intermitente. En un ciclo típico, el aire se comprime a alta presión, se seca y luego se almacena en grandes tanques. Al mismo tiempo, un gran lecho de guijarros de cerámica se calienta durante varias horas hasta la incandescencia por un quemador de gas. Las temperaturas mantenidas a presiones cercanas a 51 atmósferas proporcionan números de Mach de prueba desde 5 a 15 para ejecuciones con duración del orden de un minuto [10].

Tabla 2-3.: Clasificación Túneles de Viento - Clasificación Según Velocidad

2.3. Antecedentes Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01

El Túnel de Viento modelo TV-CA-SP-UNB-01 (Túnel de viento de circuito abierto con sección de pruebas cerrada de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá No 1) fue diseñado y construido en el año 2013 por los Ingenieros Alejandro Arango Duque y Johanna Marcela Yepes Murillo, bajo la dirección del Ing. MsC Jhonathan Orlando Murcia Piñeros.

Es un túnel de viento subsónico de circuito abierto de $4,58m$ de largo, $0,968m$ de ancho y $1,79m$ de alto. Tiene una zona de pruebas Semi-Octogonal cerrada de $0,305m \times 0,304m$. Esta sección cuenta con dos tipos de montajes, horizontal para el estudio de flujo externo de modelos a escala y vertical adaptada para configuraciones de sistemas de ventilación (Edificios, plantaciones, paracaídas, etc.). La manipulación de la velocidad se realiza por medio de un variador de frecuencia modelo Siemens MICROMASTER 420 para el cual se tienen caracterizadas 12 velocidades promedio de acuerdo a 12 valores de frecuencia predeterminados.

Se compone de seis secciones de tipo modular: (S-1) primera sección de estabilización, (S-2) sección de contracción, (S-3) segunda sección de estabilización, (S-4) sección de pruebas, (S-5) difusor, (S-6) sección de potencia; en donde el tipo de diseño permite el cambio partes para el estudio de diferentes configuraciones (Ver Figura 2-6).

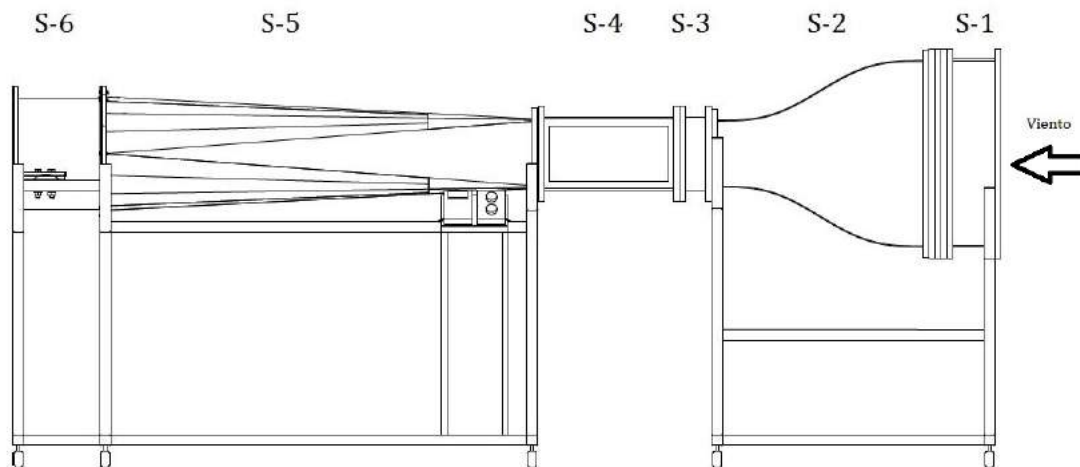


Figura 2-6.: Secciones Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

El Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 está diseñado de tal forma que los materiales y los equipos que lo componen tienen bajos costos de fabricación y mantenimiento. Uno de los requisitos más importantes especificado por el Laboratorio de Diseño de Máquinas y Prototipos ya que el objetivo del banco de pruebas es ser un túnel de viento de tipo académico. Se hace notar que este es el primer túnel construido en el país con esta metodología. Para su diseño se tuvieron de referencia los primeros túneles construidos por la Universidad de Stanford y la Universidad São Paulo, los cuales prestan servicios a la industria aeroespacial de sus respectivos países.

El empleo del modelamiento por medio de dinámica computacional de fluidos (CFD) en investigación eólica e ingeniería del viento se ha incrementado significativamente en los últimos

años ([36]; [39]; [48]). El motivo es la limitante que se tiene algunas veces en las técnicas de medición en los procedimientos experimentales, ya que los instrumentos instalados pueden interferir con el campo de flujo y producir datos con cierto porcentaje de error [21].

Los modelos de CFD se emplean para asistir diferentes escenarios que no se pueden establecer experimentalmente o tienen un alto costo para ser investigados [48], lo que lo convierte en una herramienta efectiva, eficiente y de bajo costo para acompañar una investigación [3]; [39]).

De igual forma se tiene la necesidad de validar los resultados obtenidos mediante CFD, ya que los esquemas de parametrización (modelos de turbulencia, técnicas de discretización, etc.) y las condiciones de frontera establecidas pueden arrojar datos erróneos en la simulación, que deben ser evaluados con datos experimentales.

Las condiciones de flujo al interior de la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 son evaluadas mediante CFD, con el fin de establecer puntos apropiados para la toma de datos [19].

Casos de flujo externo [31]; [32], serán evaluados en el presente desarrollo investigativo empleando el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ [26], esto con el fin de validar el campo de flujo al interior de la sección de pruebas.

En base a la guía empleada por los diseñadores del Túnel de Viento, los procedimientos de calibración y pruebas realizados en el Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 se realizan de acuerdo a lo especificado por [11].

3. PRUEBAS COMPUTACIONALES

La dinámica de fluidos computacional es el análisis de los sistemas que involucran el flujo de un fluido, transferencia de calor y cualquier fenómeno asociado, por medio de la solución numérica de las ecuaciones gobernantes a través de simulaciones computacionales [47].

El capítulo relacionado a continuación presenta la descripción matemática y el desarrollo computacional llevado a cabo para determinar numéricamente las propiedades del flujo a través de los dominios establecidos, mediante la solución de las ecuaciones gobernantes. Se hace uso de la herramienta de CFD OpenFOAM en sus versiones V 2.4.0 y V 3.0.0. el cual es un software de uso libre desarrollado por OpenCFD Ltd en ESI Group y distribuido por la fundación OpenFOAM [29] que se presenta en formato de librería C++. Posee un rango extenso de propiedades para resolver cualquier caso de dinámica de fluidos, desde complejos flujos que involucran reacciones químicas, transferencia de calor y turbulencia, hasta dinámica sólida y electromagnetismo.

Se requieren tres directorios para correr simulaciones en OpenFOAM, *0*, *constant* y *system*. Dependiendo de la versión empleada, el contenido de los archivos dentro de los directorios puede cambiar, sin embargo las funciones de cada directorio se mantienen.

- El directorio *0*, contiene los archivos que describen las condiciones iniciales de frontera.
- el directorio *constant*, contiene un folder llamado *polyMesh* donde se encuentra la información detallada de la malla, fuera de este folder se encuentran los archivos donde se especifican las propiedades físicas del caso.
- El directorio *system*, contiene los archivos donde se especifican los parámetros y condiciones de la simulación. En la versión 3.0.0 se encuentra el archivo *blockMeshDict* en donde se especifica el Dominio y la malla empleada, en la versión 2.4.0, este archivo se encuentra en el Directorio *constant* dentro del folder *polyMesh*.

3.1. Marco Teórico

El estudio a desarrollar, toma los parámetros de flujo que tienen lugar en el Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, se establece que el fluido es incompresible en régimen subsónico y turbulento, por lo cual se toman los principios de conservación, considerando la cantidad de

materia en un volúmen de control establecido y las propiedades extensivas concernientes, masa y moméntum.

3.1.1. Marco Teórico - Régimen de Flujo

Uno de los parámetros más importantes para determinar el régimen de flujo que se va trabajar experimentalmente y el cual se debe tener en cuenta para definir los diferentes coeficientes empleados a lo largo de las simulaciones es el número Reynolds. Este relaciona las fuerzas inerciales a las fuerzas viscosas. Su representación se da de la siguiente manera, donde ρ_∞ es la densidad del fluido circundante, v_∞ es la velocidad promedio del flujo, L la longitud característica, y μ_∞ la viscosidad dinámica del fluido.

$$R = \frac{\rho_\infty v_\infty L}{\mu_\infty} \quad (3-1)$$

Para aplicaciones prácticas de flujo en tuberías, caso que se aplica para un túnel de viento, se encuentra que cuando el número de Reynolds es menor a 2000 el flujo es laminar. Si el número de Reynolds es mayor a 4000 se dice que el flujo es turbulento. La denominada región crítica es la ubicada entre un número Reynolds de 2000 y un número Reynolds de 4000 [35].

Se denomina número de Reynolds crítico al punto en donde ocurren las primeras inestabilidades. Por ejemplo, en flujos que posean uno o más puntos de inflexión, como el flujo de un jet, se tiene un número de Reynolds crítico de 10. En flujos con una distribución de velocidad que no posea puntos de inflexión, la teoría dicta que a un número de Reynolds de 1000, las perturbaciones se empiezan a magnificar. Si el flujo de entrada es laminar, varios experimentos confirman que se pueden alcanzar números de Reynolds críticos de 91,000 [47].

3.1.2. Marco Teórico - Principios de Conservación

Las leyes de conservación se pueden derivar al considerarse una cantidad dada de materia o volumen de control (CM) y sus propiedades extensivas tales como masa, momentum y energía. La ley de la conservación para una propiedad extensiva relaciona la rata de cambio de una cantidad de dicha propiedad en un control de masa dado a determinados efectos externos [34].

El principio de conservación de masa se expresa por medio de la ecuación 3-2, esta expresión permite que el volúmen de control sea lo suficientemente pequeño estableciendo así una forma de coordenadas libre para la ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0 \quad (3-2)$$

Donde t es el tiempo, v es la velocidad y ρ la densidad. Por otro lado, el momentum puede cambiar por la acción de fuerzas por lo cual el principio de conservación de momentum expresa por medio de la ecuación 3-3. Donde b representa las fuerzas del cuerpo (por unidad de masa).

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v v) = \text{div}T + \rho b \quad (3-3)$$

3.1.3. Marco Teórico - Flujo Incompresible

Cuando el fluido de estudio posee un número Mach inferior a 0.3 se dice que el fluido es incompresible, por lo cual en las ecuaciones generalizadas de conservación de masa 3-2 y momentum 3-3 la densidad se asume que es constante. Siendo este el caso, las ecuaciones mencionadas se expresan de la siguiente manera.

$$\text{div } v = 0 \quad (3-4)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \text{div}(u_i v) = \text{div}(\nu \text{grad} u_i) - \frac{1}{\rho} \text{div}(p i_i) + b_i \quad (3-5)$$

3.1.4. Marco Teórico - Flujo Turbulento

La mayoría de flujos que se encuentran en ingeniería son de tipo turbulento ya que cuando llegan a cierto número de Reynolds estos se tornan inestables. Los flujos de bajo número Reynolds entran dentro del régimen laminar, mientras que los flujos con un alto número de Reynolds se ubican dentro de los regímenes transitorio y turbulento.

Los flujos turbulentos se caracteriza por que poseen un estado de movimiento caótico y aleatorio en el cual la velocidad y la presión cambian continuamente a lo largo del tiempo.

Debido a que la turbulencia causa la aparición de vórtices de un amplio rango de escalas dentro del flujo, se tienen diferentes métodos numéricos para captar los efectos ocasionados por la turbulencia. Estos se clasifican en las siguientes tres categorías principales: *Direct Numerical Simulation method (DNS)*, *Large Eddy Simulation method (LES)* y *Reynolds-averaged Navier-Stokes method (RANS)*, a continuación se mencionan las características

principales de los métodos *DNS* y *LES*, para mayor información remitirse a [11], [47], [34].

- **DNS (*Direct Numerical Simulation method*):** Este tipo de simulación calcula el flujo principal y todas las fluctuaciones turbulentas de velocidad. La discretización de celdas es lo suficientemente fina como para resolver las longitudes de la escala de Kolmogorov. Su costo computacional es muy alto.
- **LES (*Large Eddy Simulation*):** Es un método intermedio para los cálculos de turbulencia el cual se centra en el comportamiento de grandes vórtices, filtrando los vórtices de menor escala. El costo computacional en términos de almacenamiento y volumen de cálculo es grande.

En el presente proyecto de investigación, se caracterizan de forma experimental únicamente las velocidades y presiones al interior de la zona de pruebas. Por esta razón, como solo se necesita información acerca de las propiedades del flujo promediadas en el tiempo (Velocidad promedio, Presión promedio, esfuerzos promedio), se opta por el método RANS para el desarrollo de los estudios computacionales. Como no es necesario resolver los detalles de las fluctuaciones turbulentas, se descartan los métodos DNS y LES para el desarrollo de los estudios, al considerar el alto costo computacional que conllevan y el uso innecesario de las capacidades de cada uno de estos.

3.1.5. Marco Teórico - RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Method)

Este método centra su atención en el flujo principal y los efectos que causa la turbulencia sobre las propiedades del flujo. Los recursos computacionales requeridos para el cálculo preciso de las propiedades del flujo no es tan alto comparado con los métodos mencionados anteriormente. El modelo RANS se basa en la promediación de las ecuaciones del fluido, para lo cual todas las magnitudes se sustituyen por la suma de su valor medio y una componente fluctuacional. Después de promediarlas se obtienen términos adicionales que requieren la adición de otras ecuaciones para cerrar el sistema. Las ecuaciones a resolver con este método son las siguientes:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3-6)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_j U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x_i} \right) + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (3-7)$$

Donde $i, j = 1, 2$ y $\overline{\partial u'_i u'_j}$ es la componente del tensor de esfuerzos de Reynolds.

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3-8)$$

Donde $i, j = 1, 2$, ν_T es la viscosidad cinemática turbulenta, k es la energía cinética turbulenta y δ_{ij} es el delta de Kronecker. Existen varios modelos de turbulencia RANS, los más comunes son el modelo *Mixing Length*, *Spalart-Allmaras*, $k - \varepsilon$, $k - \omega$, *Algebraic Stress*, *Reynolds Stress*, entre otros.

Al realizar la revisión bibliográfica para el desarrollo de los estudios computacionales, se observa que el modelo de turbulencia de dos ecuaciones $k - \varepsilon$, es uno de los más empleados para el desarrollo de simulaciones cuando se emplea el método RANS. Considerando autores como [46], [42], [16], [41], entre otros, se opta por hacer uso del modelo $k - \varepsilon$ para el desarrollo de los estudios computacionales.

Marco Teórico - Modelo $k - \varepsilon$

Con el fin de determinar los tensores de esfuerzos de Reynolds y dar solución al sistema de ecuaciones, se hace uso del modelo de turbulencia de dos ecuaciones $k - \varepsilon$. Este modelo agrega dos ecuaciones más de transporte, una para la energía cinética de turbulencia y otra para la rata de disipación de la energía cinética turbulenta, las cuales se deben resolver de forma simultánea con las ecuaciones RANS.

La ecuacion k esta dada por la siguiente relación.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (3-9)$$

Donde $i, j = 1, 2$, σ_k es el número Prandtl para la energía cinética y ε es la rata de disipación de energía cinética turbulenta.

El modelo estándar para la ecuación ε es el siguiente.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon_1} \frac{\varepsilon}{k} \nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon_2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3-10)$$

Donde $i, j = 1, 2$, σ_ε es el número Prandtl para la disipación, C_{ε_1} y C_{ε_2} son constantes en el modelo para la ecuación ε .

Los valores estándar para todas las constantes del modelo se establecen de acuerdo a los

empleados por [46], [42], [16], [41] cuyos modelos funcionaron de acuerdo a lo especificado. De igual forma se siguen las recomendaciones dadas por los textos guías [47] y [34], los cuales proporcionan los valores comúnmente más usados. Las constantes empleadas son las siguientes:

$$C_\mu = 0,09 \quad C_{\varepsilon_1} = 1,44 \quad C_{\varepsilon_2} = 1,92 \quad \sigma_k = 1,0 \quad \sigma_\varepsilon = 1,3 \quad (3-11)$$

3.1.6. Marco Teórico - Ley de la Pared

La presencia de paredes dentro del dominio establecido para las simulaciones, posee una gran influencia en el comportamiento del flujo y en la estructura del flujo turbulento. Esto se debe a que cerca de la pared el flujo es influenciado por los efectos viscosos y no depende de los parámetros de la corriente del flujo principal.

La ley de la pared explica la relación de los parámetros que influyen la velocidad del flujo principal, siendo estos la distancia y de la pared, densidad ρ y viscosidad μ del fluido y del esfuerzo cortante en la pared τ_w .

$$u^+ = \frac{\bar{v}_t}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln n^+ + B \quad (3-12)$$

Donde u^+ es la velocidad adimensional, \bar{v}_t es la velocidad media paralela a la pared $u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ es la velocidad de fricción, κ es la constante de von Karman ($\kappa = 0,41$), B es una constante empírica relacionada con el espesor de la subcapa viscosa ($B \approx 5,5$ en la capa límite de una placa plana de superficie suave, para paredes rugosas se emplean valores menores de B).

En la superficie sólida el fluido es estacionario, mientras que cerca de la pared el comportamiento del fluido esta influenciado por los efectos viscosos. Esta es una capa supremamente delgada y se denomina sub capa viscosa (*viscous sub-layer*) donde $y^+ < 5$. Para esta capa la ley de la pared se asume por medio de la siguiente expresión:

$$u^+ = y^+ \quad (3-13)$$

En la parte exterior de la sub capa viscosa ($30 < y^+ < 500$) se encuentra una región denominada capa de ley logarítmica (*log-law layer*) en donde los efectos turbulentos y viscosos son significativos. La relación entre la velocidad de la pared y la distancia de la pared se deriva de la ecuación de la ley logarítmica.

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln(Ey^+) \quad (3-14)$$

Donde k es la constante de Von Karmans y E es una constante de la ecuación. Para flujo turbulento a través de paredes suaves $k = 0,41$ y $E = 9,8$ [47]. La Figura 3-1 muestra la validación de las ecuaciones teóricas con respecto a los datos experimentales.

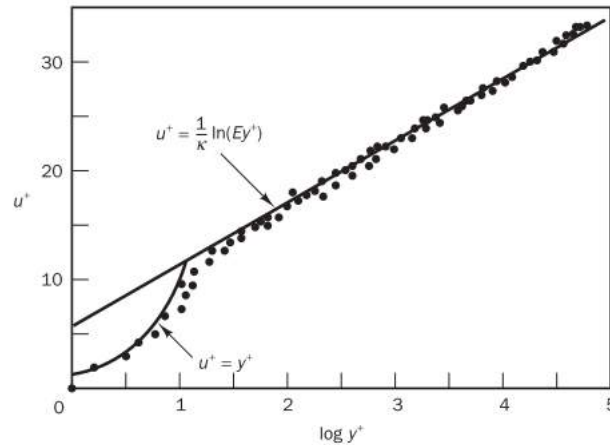


Figura 3-1.: Marco Teórico - Distribución de velocidad cerca a la Pared [47]

3.1.7. Marco Teórico - Malla

Por lo general en CFD no es posible solucionar las ecuaciones diferenciales gobernantes de forma analítica, lo que hace necesario dividir el dominio en pequeñas secciones denominadas celdas. De esta forma las ecuaciones son discretizadas y se resuelven para cada una de ellas. Cuando se está simulando en CFD es importante que las condiciones de capa límite cercanas a las paredes del dominio se registren de forma apropiada. La malla tiene un impacto importante en la tasa de convergencia, precisión de la solución, y tiempo de consumo de la simulación (Tiempo-CPU).

Existen tres tipos de malla que se emplean en CFD: Estructurada, Estructurada por bloques y No Estructurada. A continuación se presentan las propiedades más relevantes de cada malla.

- **Estructurada:** En una malla estructurada la cuadrícula se puede transformar directamente en una matriz, con posiciones identificadas por medio de un set de índices. Para cada punto interno de la cuadrícula hay un número fijo de puntos adyacentes.

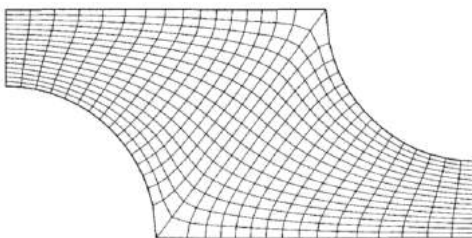


Figura 3-2.: Marco Teórico - Malla Estructurada [34]

- **Estructurada por Bloques:** En una malla estructurada por bloques se generan dos o más niveles de subdivisiones en la cuadrícula. De manera general se presenta un nivel de enmallado robusto y un nivel de enmallado fino.

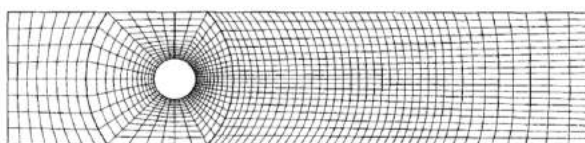


Figura 3-3.: Marco Teórico - Malla Estructurada por Bloques [34]

- **No Estructurada:** La malla no estructurada se emplea para geometrías complejas ya que posee una cuadrícula mucho más flexible. En este tipo de malla los puntos internos de la cuadrícula no se encuentran restringidos a un número fijo de puntos adyacentes y las celdas no están restringidas a ninguna forma específica.

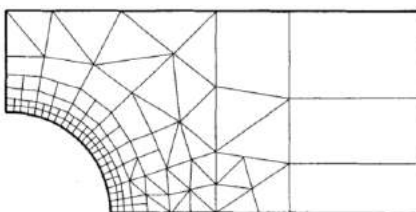


Figura 3-4.: Marco Teórico - Malla No Estructurada [34]

3.1.8. Marco Teórico - Número de Courant

El número de Courant indica la cantidad de información que atraviesa (u) una celda de una malla computacional Δx , en un paso de tiempo dado Δt . Los métodos explícitos tienen la condición de que el Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) no debe sobrepasar de uno ya que, un CFL mayor significa que la información se está propagando a través de más de una celda de la malla en un paso de tiempo. En este caso, el integrador del tiempo no puede interpretar apropiadamente lo que está pasando físicamente, lo cual hace que la solución sea inestable

y el modelo estalle.

Otros métodos permiten condiciones de CFL mucho más grandes, como por ejemplo el método de Runge-Kutta [20], por lo cual la restricción va de acuerdo al modelo y el método empleado para la solución numérica. La ecuación 3-15 relaciona los parámetros para obtener el Número de Courant sin exceder el máximo permitido.

$$C = U \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq C_{Max} \quad (3-15)$$

Donde U es la velocidad del fluido, Δt es el paso de tiempo especificado para la simulación, Δx es la longitud de cada elemento en la dirección x y C_{Max} . Para el caso pertinente a la presente investigación, debido a que se trabaja con flujo incompresible, el método empleado tiene la restricción de que el número de Courant máximo es equivalente a 1, razón por la cual, el valor de cada paso de tiempo Δt debe ser menor al valor de $\frac{\Delta x}{U}$ [34].

3.2. Diseño Computacional

El uso de programas de dinámica de fluidos computacional permite realizar estimaciones del comportamiento de cualquier fluido en un dominio determinado, disminuyendo costos en los montajes experimentales y permitiendo al investigador definir los parámetros más apropiados para las pruebas. Sin embargo existen dos grandes desventajas cuando se trabaja con dinámica de fluidos computacional, estas son el costo computacional y el tiempo que tarda cada simulación. Dadas estas grandes limitantes se hace necesario realizar un diseño computacional para los diferentes estudios que abarca el presente trabajo de investigación, con el fin de establecer los factores y niveles más representativos para cada de estudio y de esta forma disminuir el número de simulaciones requeridas en las pruebas computacionales.

Se establecen 5 estudios computacionales para el desarrollo de la investigación, los cuales se presentan en la Figura 3-5. Se inicia con la validación del modelo en donde se verifica si el modelo de turbulencia empleado es el adecuado. De allí se continúa con los estudios de independencia de malla los cuales se desarrollan cada vez que la malla se modifica. Para el desarrollo de la presente tesis, se hacen necesarios 2 estudios de independencia de malla, uno para el dominio en vacío y uno para el dominio con la presencia de un modelo.

Posterior a esto, se desarrollan las simulaciones de perfil de velocidad y configuración de tomas de presión. En estos estudios, se monitorea el comportamiento de la distribución de la velocidad a lo largo de la sección transversal del dominio, y se identifica la configuración de tomas de presión más adecuada para la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-

SP-UNB-01. Para este caso, se monitorea el comportamiento de la presión al interior del dominio, con y sin la presencia de un modelo en su interior.

Por último se realizan las simulaciones de flujo externo, en donde se determinan las dimensiones generales que debe tener un modelo para permitir condiciones de similitud de flujo al interior de la zona de pruebas.

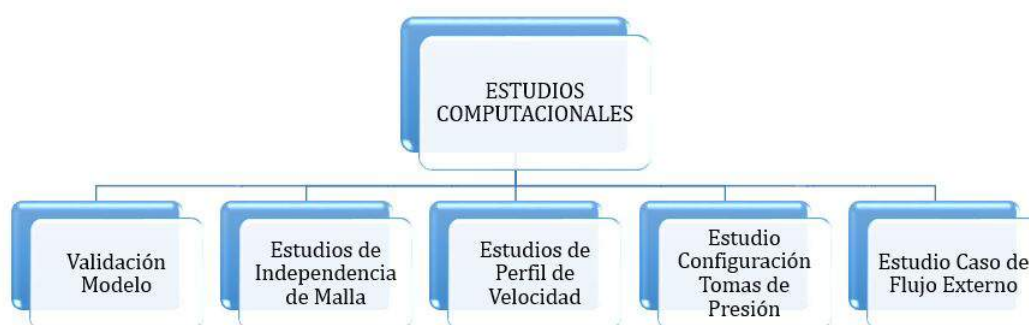


Figura 3-5.: Diseño Computacional - Diagrama Estudios Computacionales

Cada uno de estos estudios poseen diferentes factores potenciales de diseño que se emplean para determinar el número de simulaciones requeridas, teniendo como único factor común, la Frecuencia de Operación del Túnel de Viento.

A excepción del estudio de validación del modelo cuyas especificaciones se fijan de acuerdo a datos proporcionados en la literatura, el tamaño de muestras para el factor de frecuencia se define de acuerdo a un análisis estadístico que se desarrolla con datos experimentales tomados en el Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 antes de ser intervenido. Con este análisis se puede determinar el mínimo de frecuencias necesarias para cada estudio computacional, y por ende, reducir el número de simulaciones necesarias en cada uno.

La Figura 3-6 presenta el diagrama de caja o *boxplot* que se obtiene para los datos de velocidad agrupados en cada una de las frecuencias utilizadas en el Túnel de Viento. Se observa que en la medida en que se aumenta la frecuencia, la velocidad aumenta casi de forma lineal. En detalle, se tiene que la distribución de los datos para cada grupo es de baja dispersión, lo que hace que valores mayores en las frecuencias altas sean considerados datos atípicos.

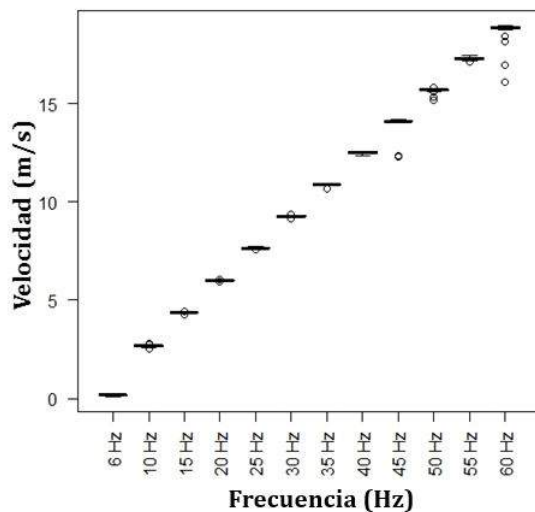


Figura 3-6.: Diseño Computacional - Diagrama de Caja. Velocidad (m/s) Vs Frecuencia (Hz).

En la Tabla **3-1** se puede comprobar que cuando se aumenta la frecuencia en 5 Hz, la velocidad promedio aumenta aproximadamente 1,6 unidades. Por otro lado, los valores de desviación de los datos corroboran la baja dispersión que se encuentra en cada nivel de frecuencia.

FRECUENCIA (Hz)	MEDIA	DESVIACIÓN
6	0,17	0,03
10	2,66	0,05
15	4,37	0,03
20	6,01	0,02
25	7,66	0,03
30	9,27	0,03
35	10,87	0,04
40	12,50	0,05
45	14,05	0,33
50	15,70	0,09
55	17,30	0,06
60	18,80	0,37

Tabla 3-1.: Diseño Computacional - Medidas de Tendencia Central y Dispersión

Dado lo anterior, se calcula el coeficiente de correlación de Spearman, este coeficiente es una medida de la relación lineal que existe entre dos variables. Este valor se encuentra entre -1 y 1 , siendo -1 una fuerte relación lineal inversa, 0 la ausencia de relación lineal y 1 una relación lineal positiva. En este caso, el valor de la correlación entre las variables velocidad y frecuencia es de $r = 0,998$; lo que indica una fuerte correlación lineal positiva, es decir que cuando una de las variables aumenta la otra también lo hace.

Finalmente, se hacen algunas pruebas para verificar el comportamiento de los perfiles de velocidad de acuerdo al grupo de frecuencia al que pertenecen con el fin de identificar posibles similitudes o diferencias entre los grupos definidos. Para aplicar la prueba adecuada se realiza el test de normalidad de *Shapiro-Wilk* cuya hipótesis nula fue rechazada.

$$W = 0,9484p - value < 2,2e - 16 \quad (3-16)$$

Por lo anterior y dado que los datos no siguen una distribución normal, se procede a contrastar la igualdad de grupos con una prueba no paramétrica de *Kruskal Wallis*.

$$Kruskal - Wallischi - squared = 1070,837 \quad df = 11 \quad p - value < 2,2e - 16 \quad (3-17)$$

De acuerdo a lo anterior se concluye lo siguiente:

- El análisis lleva a concluir que los grupos de frecuencias generan velocidades completamente disyuntas, sin embargo dicho comportamiento disyunto está determinado por una relación lineal casi determinística.
- Teniendo en cuenta que el comportamiento de la velocidad dados los niveles de frecuencia es completamente lineal se pueden tomar como mínimo los extremos de las frecuencias, valores bajos y altos, ya que con los datos de los extremos es posible predecir el comportamiento del flujo a los demás escenarios.

Con el fin de asegurar que se investiguen todas las combinaciones posibles de los niveles y factores que se asignen a cada caso, se plantea un diseño computacional de tipo factorial.

A continuación se presentan los diseños computacionales para cada caso en donde se especifican los parámetros, variables y el número de simulaciones requeridas.

3.2.1. Diseño Computacional - Validación Modelo

1. **Problema de Investigación:** Verificar si el modelo RANS empleado para los estudios computacionales es el adecuado.

2. **Parámetros Variables de la Simulación:** Número de Reynolds.
3. **Parámetros Fijos de la Simulación:** Dimensiones Dominio (m), Intensidad Turbulenta (%), Longitud característica (m), Viscosidad Cinemática (m^2/s), Densidad (Kg/m^3), Relación de Aspecto Cilindro Rectangular (AR), Constante del modelo C_μ (Adimensional), Constante del modelo C_{ϵ_1} (Adimensional), Constante del modelo C_{ϵ_2} (Adimensional), Constante del modelo σ_k (Adimensional), Constante del modelo σ_ϵ (Adimensional).
4. **Factores:**
 - **Factor A:** Número de Reynolds.
5. **Niveles:**
 - **Factor A:** 3 Niveles ($Re = 5000$, $Re = 10000$, $Re = 13000$).
6. **Parámetros a Medir:** Coeficiente de Arrastre Promedio (C_d), Coeficiente de Arrastre Promedio Fluctuante (C'_d), Coeficiente de Sustentación Promedio (C_l), Coeficiente de Sustentación Promedio Fluctuante (C'_l), Media cuadrática del Coeficiente de Sustentación ($C_{l_{rms}}$), Número de Strouhal (St).
7. **Número de simulaciones requeridas:** 3.

FACTORES	NOMBRE FACTOR	NIVEL	NOMBRE NIVEL
1	Número Reynolds	3	$Re = 5000$
			$Re = 10000$
			$Re = 13000$

Tabla 3-2.: Diseño Computacional - Validación Modelo.

3.2.2. Diseño Computacional - Estudios de Independencia de Malla

Los estudios de independencia de malla se desarrollan cada vez que la malla es modificada, es por esto que para la presente investigación se hacen necesarios 2 estudios de independencia de malla para determinar el número de celdas a emplear en cada configuración.

Estudio de Independencia de Malla Dominio sin Modelo

1. **Problema de Investigación:** Determinar la malla a emplear para el desarrollo de los estudios cuyas especificaciones no requieran de objetos al interior de la zona de pruebas.

2. **Parámetros Variables de la Simulación:** Frecuencia, Número de elementos.
3. **Parámetros Fijos de la Simulación:** Dimensiones Dominio Zona de pruebas Túnel (m), Intensidad Turbulenta (%), Longitud característica (m), Viscosidad Cinemática para la Temperatura promediada (m^2/s), Densidad para la Temperatura promediada (Kg/m^3), Constante del modelo C_μ (Adimensional), Constante del modelo C_{ε_1} (Adimensional), Constante del modelo C_{ε_2} (Adimensional), Constante del modelo σ_k (Adimensional), Constante del modelo σ_ε (Adimensional).
4. **Factores:**
 - **Factor A:** Frecuencia.
 - **Factor B:** Configuración de Malla (No de Elementos).
5. **Niveles:**
 - **Factor A:** 2 Niveles (6 Hz, 60 Hz).
 - **Factor B:** 7 Niveles (Malla 1, Malla 2, Malla 3, Malla 4, Malla 5, Malla 6).
6. **Parámetros a Medir:** Velocidad (m/s) a lo largo de la sección transversal del Dominio para obtener el perfil de velocidades.
7. **Número de simulaciones requeridas:** 12.

		Factor B					
		Malla 1	Malla 2	Malla 3	Malla 4	Malla 5	Malla 6
Factor A	6 Hz	6-1	6-2	6-3	6-4	6-5	6-6
	60 Hz	60-1	60-2	60-3	60-4	60-5	60-6

Tabla 3-3.: Diseño Computacional - Estudio de Independencia de Malla Dominio sin Modelo

Estudio de Independencia de Malla Dominio con Modelo

1. **Problema de Investigación:** Determinar la malla a emplear para el desarrollo de los estudios cuyas especificaciones requieran de objetos al interior de la zona de pruebas.
2. **Parámetros Variables de la Simulación:** Número de elementos.
3. **Parámetros Fijos de la Simulación:** Dimensiones Dominio Zona de pruebas Túnel (m), Intensidad Turbulenta (%), Longitud característica (m), Viscosidad Cinemática para la Temperatura promediada (m^2/s), Densidad para la Temperatura promediada (Kg/m^3), Relación de Aspecto Cilindro Rectangular (AR), Constante del modelo C_μ

(Adimensional), Constante del modelo C_{ε_1} (Adimensional), Constante del modelo C_{ε_2} (Adimensional) Constante del modelo σ_k (Adimensional) Constante del modelo σ_ε (Adimensional). Se deja como parámetros fijos la Frecuencia (Hz), Velocidad (m/s) y Número Reynolds con el fin de obtener resultados en un $Re \simeq 22,000$ y de esta manera validar las simulaciones con los datos reportados en la bibliografía.

4. Factores:

- **Factor A:** Configuración de Malla (No de Elementos).

5. Niveles:

- **Factor A:** 7 Niveles (Malla 1, Malla 2, Malla 3, Malla 4, Malla 5, Malla 6, Malla 7).

6. **Parámetros a Medir:** Presión y Velocidad Promedio en la zona intermedia entre el modelo y la pared superior del dominio.

7. **Número de simulaciones requeridas:** 7.

FACTORES	NOMBRE FACTOR	NIVEL	NOMBRE NIVEL
1	Tamaño de Malla	7	Malla 1
			Malla 2
			Malla 3
			Malla 4
			Malla 5
			Malla 6
			Malla 7

Tabla 3-4.: Diseño Computacional - Estudio de Independencia de Malla Dominio con Modelo.

3.2.3. Diseño Computacional - Estudio Perfil de Velocidad

1. **Problema de Investigación:** Determinar el perfil de velocidades para la zona de pruebas del Túnel de Viento.
2. **Parámetros Variables de la Simulación:** Frecuencia.
3. **Parámetros Fijos de la Simulación:** Dimensiones Dominio Zona de pruebas Túnel (m), Intensidad Turbulenta (%), Longitud característica (m), Viscosidad Cinemática

para la Temperatura promediada (m^2/s), Densidad para la Temperatura promediada (Kg/m^3), Constante del modelo C_μ (Adimensional), Constante del modelo C_{ε_1} (Adimensional), Constante del modelo C_{ε_2} (Adimensional), Constante del modelo σ_k (Adimensional), Constante del modelo σ_ε (Adimensional).

4. Factores:

- **Factor A:** Frecuencia.

5. Niveles:

- **Factor A:** 2 Niveles (6 Hz, 60 Hz). Se escogen los dos extremos de frecuencia que maneja el Túnel de Viento real para obtener los perfiles de velocidad en el nivel más bajo y el más alto. El perfil de velocidad de las demás frecuencias no va sobrepasar estos límites.

6. Parámetros a Medir: Velocidad (m/s) a lo largo de la sección transversal del Dominio para obtener el perfil de velocidades.

7. Número de simulaciones requeridas: 2.

FACTORES	NOMBRE FACTOR	NIVEL	NOMBRE NIVEL
1	Frecuencia	2	6 Hz
			60 Hz

Tabla 3-5.: Diseño Computacional - Estudio Perfil de Velocidad.

3.2.4. Diseño Computacional - Estudio Configuración Tomas de Presión

En los estudios computacionales para la configuración de tomas de presión, es necesario observar el comportamiento de las tomas dentro de la zona de pruebas del Túnel de Viento cuando no se tienen modelos y cuando se tienen modelos dentro de ella.

- 1. Problema de Investigación:** Determinar si se generan cambios en las lecturas de presión cuando se tiene una configuración alterna a la configuración de línea principal de tomas de presión estática del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.
- 2. Parámetros Variables de la Simulación:** Frecuencia, Número de Tomas, Con o Sin Modelo.

3. Parámetros Fijos de la Simulación: Dimensiones Dominio Zona de pruebas Túnel (m), Intensidad Turbulenta (%), Longitud característica (m), Viscosidad Cinemática para la Temperatura promediada (m^2/s), Densidad para la Temperatura promediada (Kg/m^3), Relación de Aspecto Cilindro Rectangular (AR) para la configuración con modelo, Constante del modelo C_μ (Adimensional), Constante del modelo C_{ε_1} (Adimensional), Constante del modelo C_{ε_2} (Adimensional), Constante del modelo σ_k (Adimensional), Constante del modelo σ_ε (Adimensional).

4. Factores:

- **Factor A:** Configuración tomas de presión (No de líneas).
- **Factor B:** Con/Sin Modelo.
- **Factor C:** Frecuencia.

5. Niveles:

- **Factor A:** 2 Niveles (Config 1. Una línea de tomas de presión en la parte superior e inferior del dominio, Config 2. dos líneas de tomas de presión en la parte superior e inferior del dominio).
- **Factor B:** 3 Niveles (5x5, 15x15, Sin Modelo).
- **Factor C:** 2 Niveles (6 Hz, 60 Hz). Se toma la velocidad menor para ver si las tomas alcanzan a registrar datos y la velocidad intermedia.

6. Parámetros a Medir: Presión en las tomas. Diferencia entre las configuraciones de presión respecto a datos de la bibliografía.

7. Número de simulaciones requeridas: 12.

		Factor B			
		5x5	15x15	Sin modelo	
Frecuencia 6 Hz	Factor A	Config 1	1-5x5	1-15x15	1-Sin Modelo
		Config 2	2-5x5	2-15x15	2-Sin Modelo

Tabla 3-6.: Diseño Computacional - Estudio Configuración Tomas de Presión. 6 Hz

3.2.5. Diseño Computacional - Estudio Caso de Flujo Externo

1. Problema de Investigación: Determinar cual es el tamaño apropiado para lo modelos cuyas dimensiones permitan mantener las condiciones de flujo alrededor de estos sin ser afectados por el efecto de pared.

		Factor B			
		5x5	15x15	Sin modelo	
Frecuencia 60 Hz	Factor A	Config 1	1-5x5	1-15x15	1-Sin Modelo
		Config 2	2-5x5	2-15x15	2-Sin Modelo

Tabla 3-7.: Diseño Computacional - Estudio Configuración Tomas de Presión. 30 Hz

2. **Parámetros Variables de la Simulación:** Frecuencia, Tamaño del objeto.
3. **Parámetros Fijos de la Simulación:** Dimensiones Dominio Zona de pruebas Túnel (m), Intensidad Turbulenta (%), Longitud característica (m), Viscosidad Cinemática para la Temperatura promediada (m^2/s), Densidad para la Temperatura promediada (Kg/m^3), Relación de Aspecto Cilindro Rectangular (AR), Constante del modelo C_μ (Adimensional), Constante del modelo C_{ϵ_1} (Adimensional), Constante del modelo C_{ϵ_2} (Adimensional), Constante del modelo σ_k (Adimensional), Constante del modelo σ_ϵ (Adimensional).
4. **Factores:**
 - **Factor A:** Frecuencia.
 - **Factor A:** Tamaño del Objeto.
3. **Niveles:**
 - **Factor A:** 2 Niveles (6 Hz, 60 Hz).
 - **Factor A:** 3 Niveles (3x3, 5x5, 10x10, 15x15).
4. **Parámetros a Medir:** Perfil de velocidad y presión sobre la línea media del dominio, Perfil de velocidad y presión desde la parte superior del modelo hasta la pared superior del dominio, perfil de velocidad y presión en la zona delantera del modelo y en la zona trasera del modelo, perfil de velocidad y presión a lo largo del dominio en los ejes x, y, z, Distribución de presión a lo largo del contorno superior del modelo.
5. **Número de simulaciones requeridas:** 8.

3.3. Recursos Computacionales

Para las simulaciones se hizo uso de dos computadores cuyas especificaciones se presentan a continuación. La Tabla **A-1** del Anexo A, relaciona los diferentes estudios desarrollados y la CPU empleada, de igual forma especifica la versión de OpenFOAM que se usó.

		Factor B			
		3x3	5x5	10x10	15x15
Factor A	6 Hz	6-3x3	6-5x5	6-10x10	6-15x15
	60 Hz	60-3x3	60-5x5	60-10x10	60-15x15

Tabla 3-8.: Diseño Computacional - Estudio Caso de Flujo Externo

- **CPU 1:** Posee un procesador Intel Core i7-4790 CPU 3.60GHz $x8$ que posee 8 GB de memoria. Tiene una tarjeta gráfica Intel Haswell Desktop y un disco duro de 206,5 GB. El sistema operativo que maneja es ubuntu 14.04 LTS, y la versión de OpenFoam instalada es la V 2.4.0.
- **CPU 2:** Posee un procesador Intel Core i7-4790K CPU 4.00 GHz $x8$ que posee 16 GB de memoria. Tiene una tarjeta gráfica Intel Haswell Desktop, un disco de estado sólido de 120 GB y un disco duro de 1 Tera. El sistema operativo que maneja es ubuntu 14.04 LTS, y la versión de OpenFoam instalada es la V 3.0.0.

3.4. Configuración Numérica Estudios Computacionales

Los estudios computacionales realizados para el presente desarrollo investigativo se diseñan con los parámetros establecidos a continuación, en la secciones posteriores se especifica la configuración del dominio empleado para cada estudio.

3.4.1. Configuración Numérica Estudios Computacionales - Dominio

El dominio establecido para el desarrollo de las simulaciones es el proporcionado por la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 a excepcion del estudio de validación del modelo cuyo dominio se realiza de acuerdo a las especificaciones dadas en la literatura (Ver Seccion 3.5). Las dimensiones para los estudios restantes se presentan en la Figura 3-7.

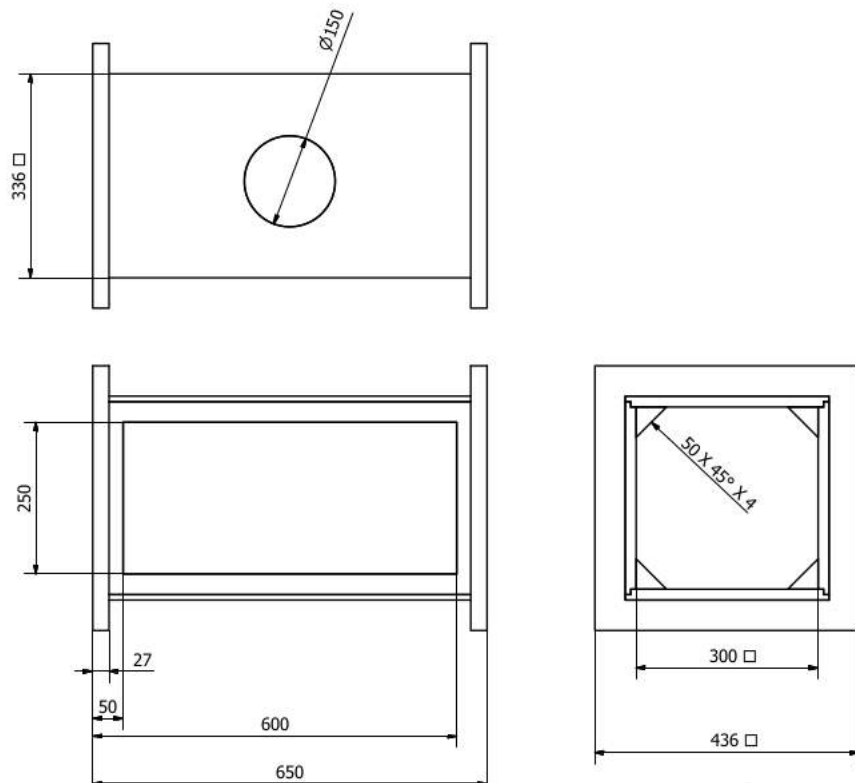


Figura 3-7.: Configuración Numérica Estudios Computacionales - Dominio Zona de Pruebas Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01. (Cotas en mm).

El dominio computacional empleado para los estudios de caracterización de flujo al interior de la zona de pruebas se presenta en la Figura 3-8. Este presenta las mismas dimensiones especificadas en la Figura 3-7.

3.4.2. Configuración Numérica Estudios Computacionales - Condiciones de Frontera

El dominio empleado para las simulaciones se divide en 6 fronteras denominadas *inlet*, *outlet*, *top*, *bottom*, *Right* y *Left*, en los casos de validación y flujo externo se asigna una frontera mas denominada *Cylinder*. La posición de las fronteras externas se muestra en la Figura 3-9.

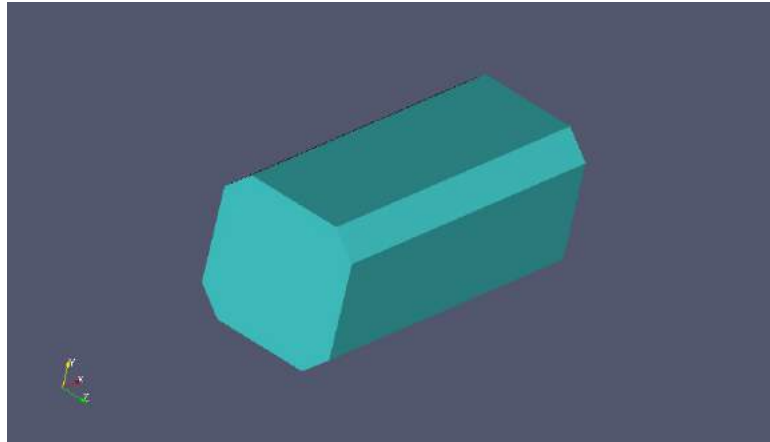


Figura 3-8.: Configuración Numérica Estudios Computacionales - Dominio Computacional Zona de Pruebas

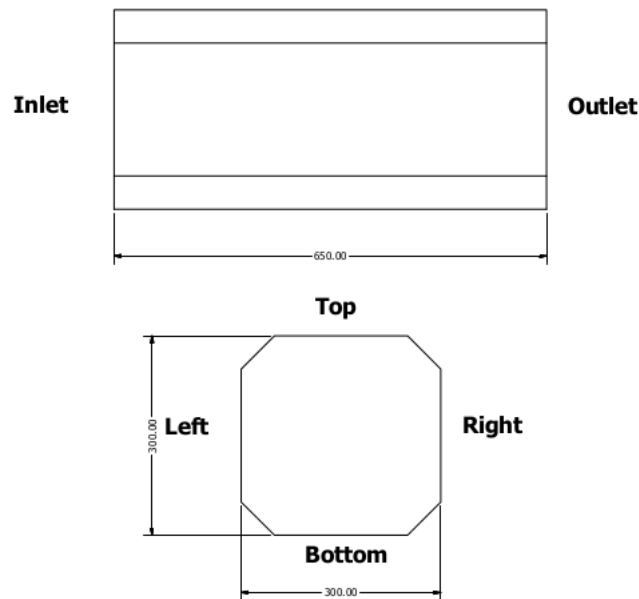


Figura 3-9.: Configuración Numérica Estudios Computacionales - Fronteras del Dominio. (Cotas en mm).

Las condiciones de frontera asignadas se especifican en la Tabla **3-9**. Para los estudios se toman dos tipos de condiciones: *patch* y *wall*. La condición tipo *patch* es de tipo genérico la cual no contiene información geométrica o topológica acerca de la malla, generalmente se emplea para entradas o salidas. La condición *wall* es un tipo que coincide con una pared sólida, requerido para modelamientos físicos que requieran funciones de pared en el

modelamiento de turbulencia [30]¹. Para el estudio de flujo externo, la condición tipo *wall* es asignada al cilindro rectangular ubicado en el centro del dominio.

FRONTERA	TIPO
inlet	patch
outlet	patch
top	wall
bottom	wall
Right	wall
Left	wall
Cylinder	wall

Tabla 3-9.: Tipo de Condiciones de Frontera

3.4.3. Configuración Numérica Estudios Computacionales - Velocidad y Presión

Las condiciones iniciales de velocidad y presión se varían para todos los estudios realizados, estos parámetros son presentados en las siguientes secciones. De forma general para la velocidad en la frontera *inlet* se especifica un flujo uniforme tal que $U_1 = U_\infty$, $U_2 = 0$ y $U_3 = 0$. La presión toma valores de “zeroGradient” en dicha frontera. Para la frontera *outlet* la velocidad toma valores de “zeroGradient”, mientras que en la presión se especifica un valor uniforme de cero.

En las paredes, debido a que no hay intercambio de flujo a través de éstas, las velocidades toman valores uniformes de cero en las coordenadas x, y y z; mientras que los valores de presión son seteados a “zeroGradient”. En los casos en donde solo se requiere observar distribuciones de presión a lo largo del dominio, se hace uso de los datos de presión tal como lo otorga el Solver de OpenFOAM [29] (Ver Ecuación 3-18).

$$p = \frac{P'}{\rho} \tag{3-18}$$

¹openfoamUserguide <http://cf.direct/openfoam/user-guide/boundaries/>

3.4.4. Configuración Numérica Estudios Computacionales - Modelo

$$k - \varepsilon$$

Cuando se hace uso del modelo $k - \varepsilon$, los valores de k y ν_T se deben especificar para cada una de las fronteras. Estos valores se calculan de la siguiente manera:

- **Intensidad de Turbulencia**

La intensidad de turbulencia se puede definir de acuerdo a las siguientes ecuaciones.

$$I = \frac{u'}{U} \quad (3-19)$$

Donde u' es la media cuadrática de las fluctuaciones de turbulencia de la velocidad y U es la velocidad promedio.

Cuando el flujo se trabaja a altas velocidades dentro de geometrías complejas I se encuentra entre 5 % y 20 %. Cuando el flujo se trabaja a bajas velocidades (bajos Números de Reynolds) I se encuentra entre 1 % y 5 %. Para un flujo que se encuentra quieto con bajos niveles de turbulencia I se encuentra por debajo del 1 %.

Segun Lysenko et al.(2013) [32], el valor común para túneles de viento se encuentra entre el 3 % y el 4 %, de acuerdo a lo anterior y teniendo en cuenta que el Túnel de viento TV-CA-SP-UNB-01 hasta el momento fué caracterizado, se especifica un valor de Intensidad de Turbulencia del 5 % para los estudios computacionales del presente desarrollo investigativo.

- **Energía Cinética Turbulenta**

$$k = \frac{3}{2}(U_\infty I)^2 \quad (3-20)$$

Donde U_∞ es la velocidad del flujo e I es la Intensidad de Turbulencia.

- **Longitud de Escala Turbulenta**

La longitud de escala turbulenta es una cantidad física que relaciona el tamaño de los vórtices que contienen la energía en flujos turbulentos, usualmente se calcula con la siguiente ecuación:

$$l = C_\mu \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} \quad (3-21)$$

Una relación empírica empleada para definir la Longitud de escala Turbulenta es la siguiente:

$$l = 0,07L \quad (3-22)$$

En el caso de flujos externos es difícil definir una Longitud de escala Turbulenta apropiada, según datos recopilados en la bibliografía, la Longitud de Escala Turbulenta para casos de flujo externo en túneles de viento se especifica entre el 1 % y el 10 % de la longitud total de la entrada del canal. Teniendo en cuenta la forma octogonal de la zona de pruebas y el hecho de que las características del flujo del Túnel de viento TV-CA-SP-UNB-01 son definidas en el presente desarrollo investigativo, se toma el valor más alto del rango recomendado (10 %) para los estudios computacionales (Ver Ecuación 3-23). Esta ecuación se emplea a excepción del estudio de validación del modelo para el cual se hace uso de la ecuación 3-22.

$$l = 0,1L \quad (3-23)$$

Donde L es la longitud característica. Para el caso de la Validación del modelo, L equivale a la longitud del cilindro rectangular, en los demás estudios que emplean como dominio la zona de pruebas del Túnel de Viento, L equivale a la Longitud de la entrada de la zona de pruebas.

- ***Disipación de Turbulencia***

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{l} \quad (3-24)$$

Donde C_μ es una de las constantes del modelo, k es la Energía Cinética Turbulenta y l es la Longitud de Escala Turbulenta.

- ***Viscosidad Turbulenta***

$$\nu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3-25)$$

Donde C_μ es una de las constantes del modelo, k es la Energía Cinética Turbulenta y ε es el valor de Disipación de Turbulencia.

3.5. Validación del Modelo

Con el propósito de verificar si el modelo RANS empleado para los estudios computacionales es el adecuado, se procede a realizar su validación con datos tanto experimentales como computacionales reportados en la bibliografía. El modelo de turbulencia RANS empleado para realizar los estudios de perfil de velocidades, Configuración de tomas de presión y caso de flujo externo es el $k - \varepsilon$, por lo tanto el modelo se prueba con el caso de flujo externo el cual es estudio más crítico y el que cuenta con reportes de datos experimentales y computacionales.

Para caracterizar el flujo alrededor de un modelo en la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, se escoge el cilindro rectangular de relación de aspecto 1 como caso de flujo externo. De acuerdo a esto se procede a realizar el estudio de un cilindro rectangular $B/D=1$ con las condiciones que registran los artículos base empleando el modelo de turbulencia RANS $k - \varepsilon$ para tres Número de Reynolds diferentes, $Re = 5000$, $Re = 10000$ y $Re = 13000$.

3.5.1. Validación Modelo - Malla

La Figura 3-10 presenta la configuración para el estudio de validación, con el fin de obtener resultados confiables y precisos y siguiendo las recomendaciones especificadas en la bibliografía, se toma como coordenadas iniciales x, y, z el centro del cilindro rectangular asignando $10D$ en la dirección $+y$, $10D$ en la dirección $-y$, $30D$ en la dirección $+x$, $10D$ dirección $-x$ y B a lo largo de z .

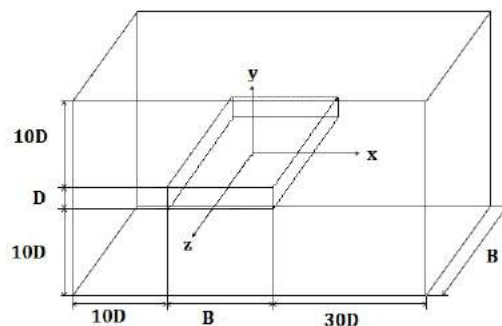


Figura 3-10.: Validación Modelo - Configuración Dominio.

El dominio se encuentra dividido en cuatro secciones, una capa límite equivalente a $0,2D$, un

área cercana al campo equivalente a $6D$ y dos áreas lejanas al campo tal como se muestra en la Figura 3-11.

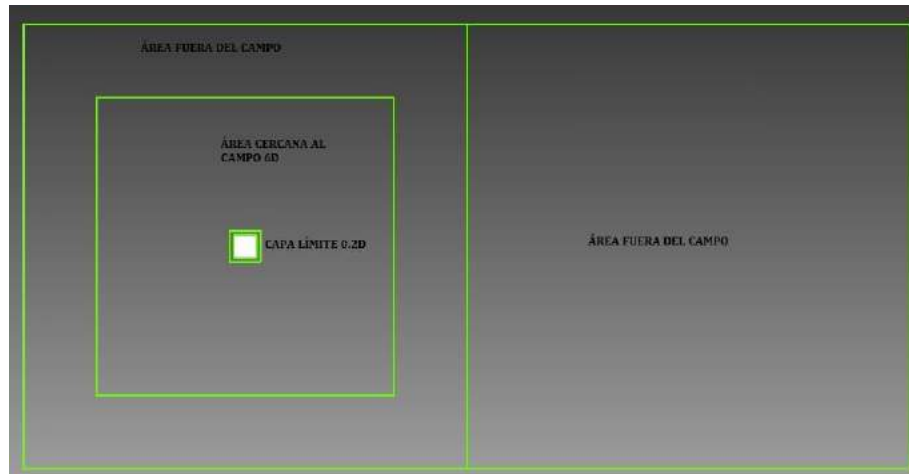


Figura 3-11.: Validación Modelo - Áreas Dominio.

La Figura 3-12 presenta el enmallado del dominio empleado para las simulaciones, con un total de 179712 celdas.

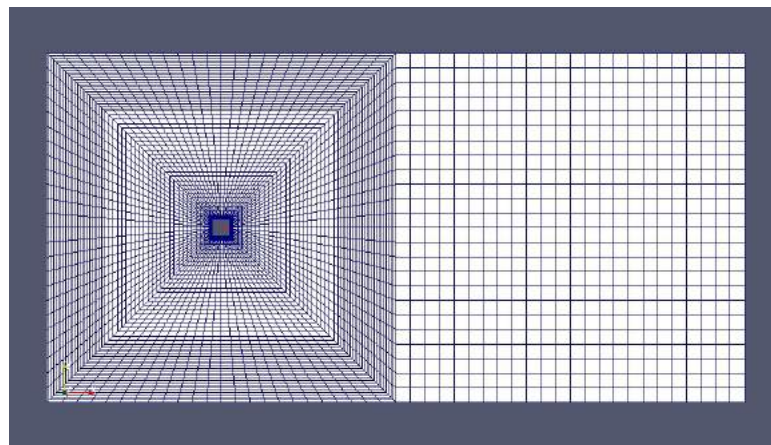


Figura 3-12.: Validación Modelo - Malla.

3.5.2. Validación Modelo - Resultados y Análisis

Para la verificación del modelo los coeficientes aerodinámicos obtenidos en las simulaciones se comparan con los resultados computacionales y experimentales presentados por diferentes autores (Ver Tabla B-1, Anexo B).

El Coeficiente de arrastre (C_D) y el Número Strouhal (St) obtenidos en las simulaciones se encuentran dentro de el rango de valores que presentan los diferentes autores, teniendo porcentajes de error entre el 15 % y menos del 1 % respecto a los valores experimentales. Los valores de C'_D , C_L , C'_L y $C_{l_{rms}}$ poseen porcentajes máximos de error del 23 % respecto a simulaciones desarrolladas en LES, DES, URANS y RANS, lo cual indica un buen comportamiento del modelo RANS $k - \varepsilon$ empleado para las simulaciones de la zona de Pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

Las Figura 3-13 y 3-14, presentan el comportamiento de los Datos de C_D y St respecto al Número Reynolds.

Gráficamente también se observa el buen comportamiento que tiene el modelo respecto a los diferentes modelos presentados en la literatura. El Anexo B contiene las imágenes de las simulaciones del modelo para los Número Reynolds de 5000, 10000 y 13000 (Ver Figuras B-1, B-2 y B-3).

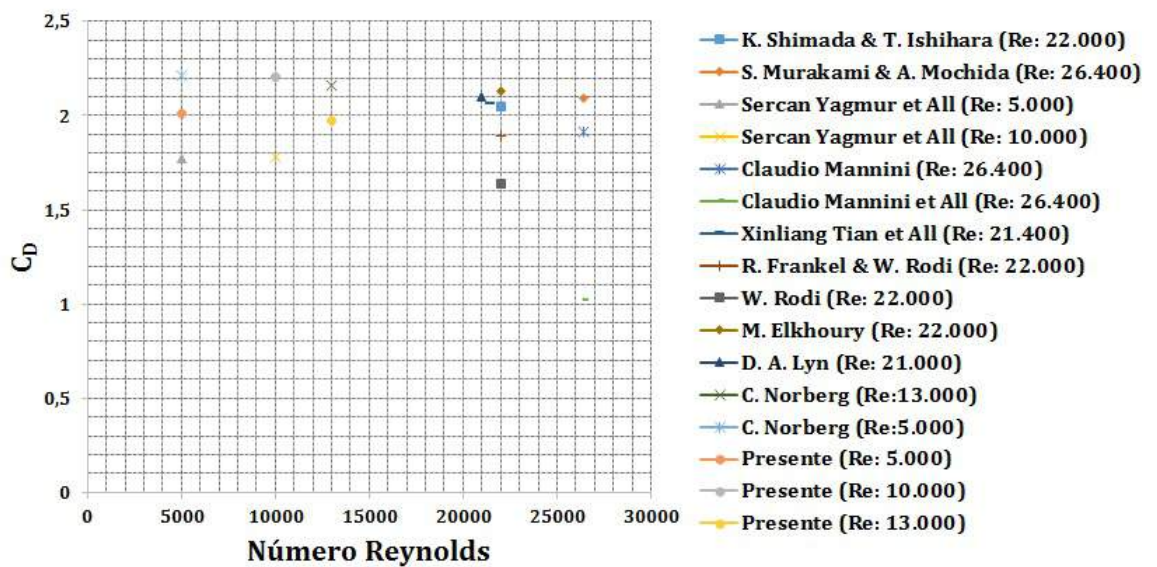


Figura 3-13.: Validación Modelo - Coeficiente de Drag Vs Reynolds.

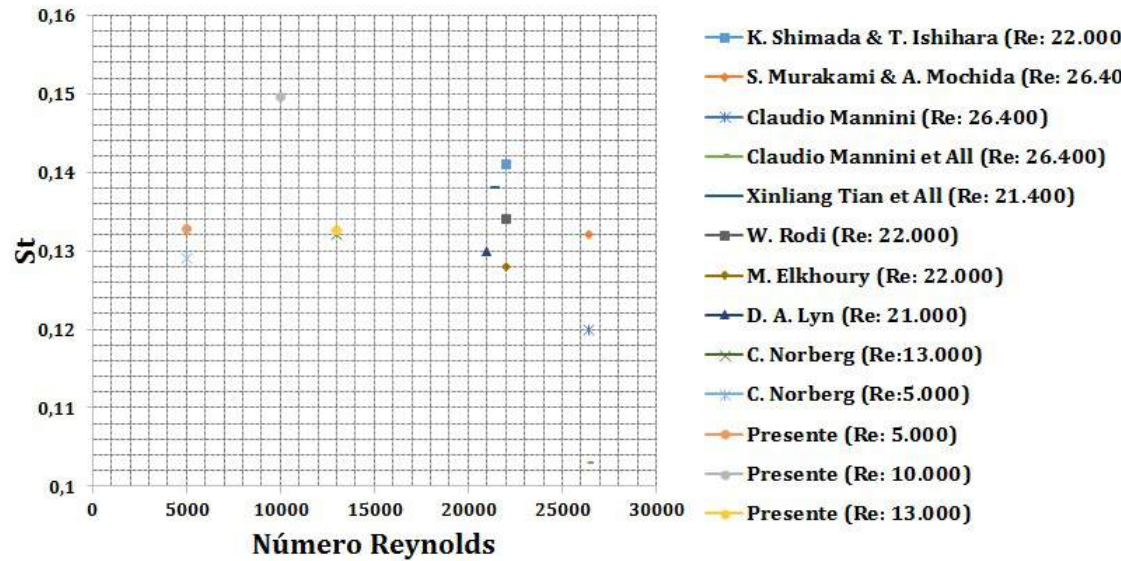


Figura 3-14.: Validación Modelo - Número Strouhal.

3.6. Estudios de Independencia de Malla

A continuación se presentan los parámetros y resultados de los estudios de independencia de malla desarrollados para los diferentes casos planteados. En total se realizan dos estudios de Independencia de Malla, uno para el dominio en vacío, es decir sin modelos en su interior; y otro para el dominio con un modelo (Cilindro Rectangular) en su interior.

3.6.1. Estudios de Independencia de Malla - Estudio de Independencia de Malla Dominio sin Modelo

En el estudio de independencia de Malla empleado para el dominio sin modelo, se establecen seis configuraciones de malla en las cuales se monitorea la velocidad a lo largo de la sección transversal del dominio por medio de *Probes*. La Tabla 3-10 presenta la numeración de cada *Probe* y su ubicación dentro del dominio. De acuerdo a los resultados obtenidos en cada configuración se determina la malla a emplear para los estudios computacionales que no requieran modelo.

Probe	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
X	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325
Y	0,0296	0,0496	0,0696	0,0896	0,1096	0,1296	0,1496	0,1696	0,1896	0,2096	0,2296	0,2496	0,2696	0,2896
Z	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

Tabla 3-10.: Estudio de Independencia de Malla Dominio sin Modelo - Posición *Probes*

Malla

El dominio presentado en la Figura 3-8 se divide en 5 bloques, tal como se muestra en la Figura 3-15, para los cuales se asigna un número determinado de celdas.

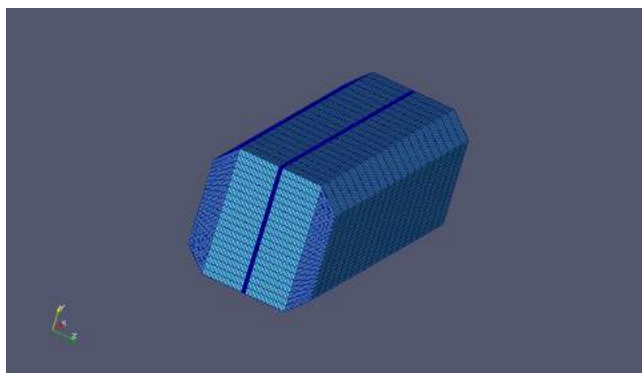


Figura 3-15.: Estudio de Independencia de Malla Dominio sin Modelo - Configuración de Bloques

La Tabla 3-11 presenta el número de elementos asignados para el refinamiento de cada malla, el avance se realiza aumentando el valor inicial de elementos (Malla 1) al doble, siendo esta la configuración de la Malla_2_ FHz y así sucesivamente.

MALLA	Malla_1	Malla_2	Malla_3	Malla_4	Malla_5	Malla_6
No ELEMENTOS	40.000	87.800	135.000	320.000	625.000	831.875

Tabla 3-11.: Estudio de Independencia de Malla Dominio sin Modelo - Número de elementos por malla.

Resultados y Análisis

En el presente desarrollo computacional el estudio de convergencia para cada factor de velocidad (6 Hz y 60 Hz), se hace con base a los datos de velocidad proporcionados por los *Probes* dispuestos a lo largo de la sección transversal del dominio. Los datos son tomados en

el último tiempo de simulación en donde esta ya se encuentra estable y no presenta oscilaciones numéricas.

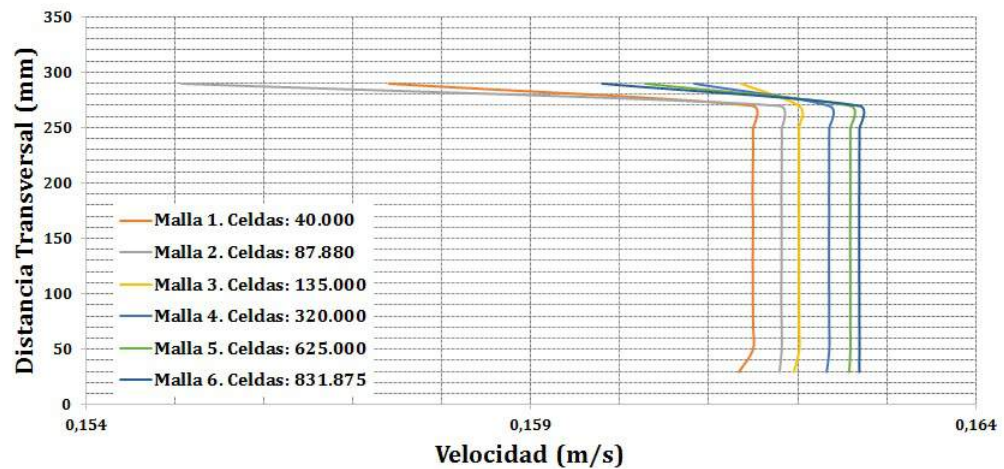


Figura 3-16.: Estudio de Independencia de Malla Dominio sin Modelo - Perfil de Velocidades 6 Hz.

Las Figuras 3-16 y 3-17, presentan los perfiles de velocidad obtenidos en las seis Mallas dispuestas para las frecuencias de 6 Hz y 60 Hz. Como se puede observar, a medida que se aumenta el número de elementos, la diferencia entre los datos de velocidad en los diferentes puntos disminuye, lo que significa que el error presentado en las simulaciones ya no está siendo influenciado por el error intrínseco de la malla.

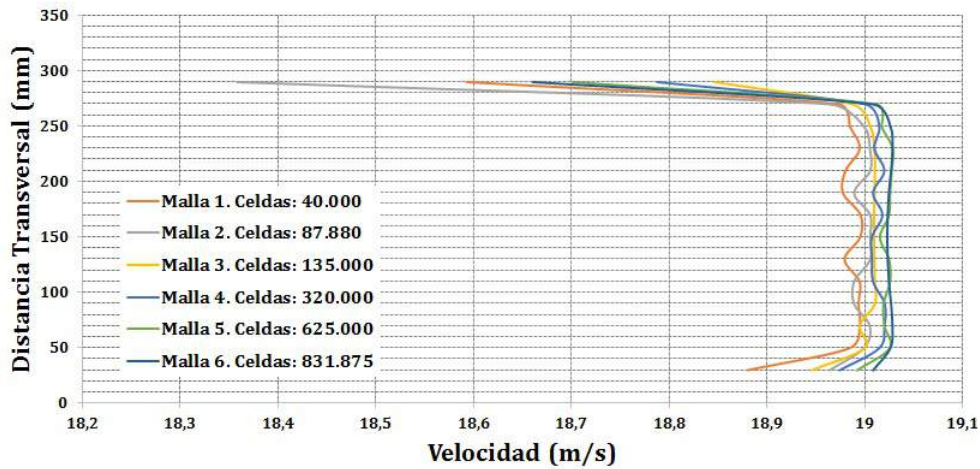


Figura 3-17.: Estudio de Independencia de Malla Dominio sin Modelo - Perfil de Velocidades 60 Hz.

Gráficamente se puede concluir que la Malla 6 es la más apta para desarrollar los estudios computacionales que no requieran modelos. Sin embargo se desarrolla un análisis estadístico de los datos obtenidos en las simulaciones respecto a los datos obtenidos de forma experimental en el Túnel de Viento con el fin de corroborar los resultados obtenidos de forma gráfica.

Como se observa en las Tablas **C-1** y **C-2**, presentes en el Anexo C, el porcentaje de error promedio respecto a los datos obtenidos experimentalmente es el más bajo tanto en la configuración de 6 Hz como en la de 60 Hz, por lo cual se escoge que la configuración de la Malla 6 para el desarrollo de los estudios computacionales que no requieran modelos.

3.6.2. Estudios de Independencia de Malla - Estudio de Independencia de Malla Dominio con Modelo

En el estudio de independencia de Malla empleado para el dominio con modelo, se establecen siete configuraciones de malla en las cuales se monitorea el promedio de la velocidad y la presión en la sección intermedia entre el cilindro rectangular y la pared superior del dominio.

Malla

Para el estudio de independencia de malla de la zona de pruebas con modelo, se emplea el dominio presentado en la Figura **3-8** con un Cilindro Rectangular de 15x15 en el interior de este.

Este dominio se divide en 44 bloques con el fin de refinar en las zonas cercanas al cilindro rectangular tal como se muestra en la Figura 3-18, para los cuales se asigna un número determinado de celdas.

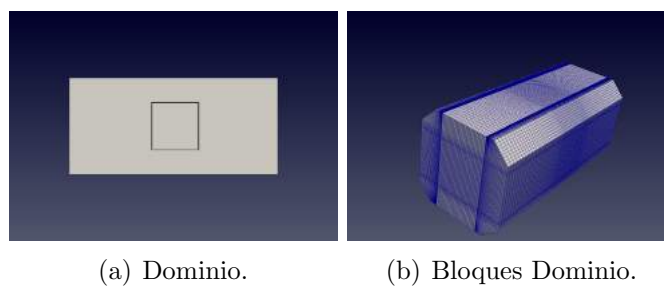


Figura 3-18.: Estudio de Independencia de Malla Dominio con Modelo - Dominio y Bloques.

La Tabla 3-12 presenta el número de elementos asignados para el refinamiento de cada malla, el avance se realiza de la misma forma en que se realiza en el Estudio de Independencia de Malla del Dominio sin Modelo, aumentando el número de elementos al doble en cada corrida.

MALLA	M.1	M.2	M.3	M.4	M.5	M.6	M.7
No ELEMENTOS	76.032	149.040	300.040	632.700	811.408	1.210.140	1.537.464

Tabla 3-12.: Estudio de Independencia de Malla Dominio con Modelo - Número de elementos por malla.

Resultados y Análisis

En el presente estudio computacional se monitorea el comportamiento de la velocidad y la presión promedio en la parte superior del cilindro rectangular. Tal como se observa en las Figuras 3-19 y 3-20 a medida que se aumenta el número de elementos, la diferencia entre los datos de velocidad y presión promedio para cada malla disminuye, lo cual significa que el error presentado en las simulaciones ya no está siendo influenciado por el error intrínseco de la malla.

Gráficamente se puede concluir que la Malla 6 es la más apta para desarrollar los estudios computacionales que requieran modelos. Sin embargo se calculan los porcentajes de error entre mallas con el fin de establecer la diferencia entre los resultados de cada una.

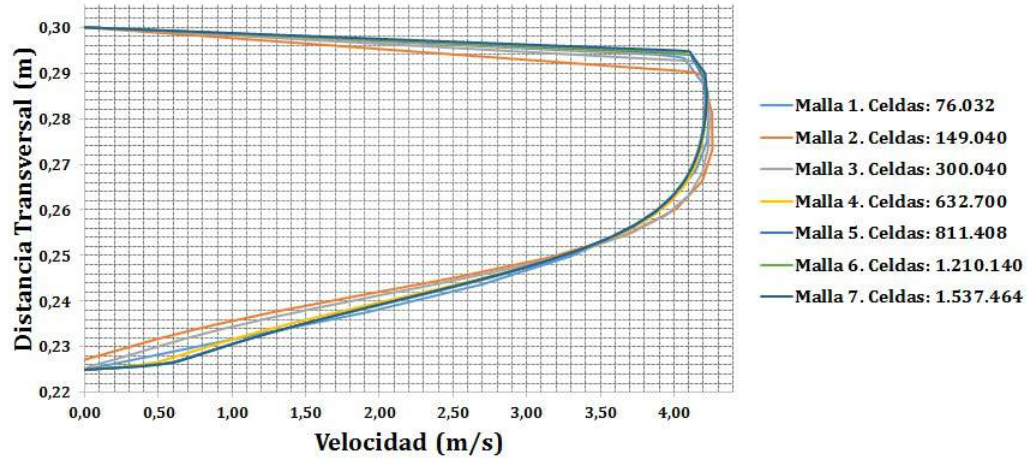


Figura 3-19.: Estudio de Independencia de Malla Dominio con Modelo - Velocidad Promedio.

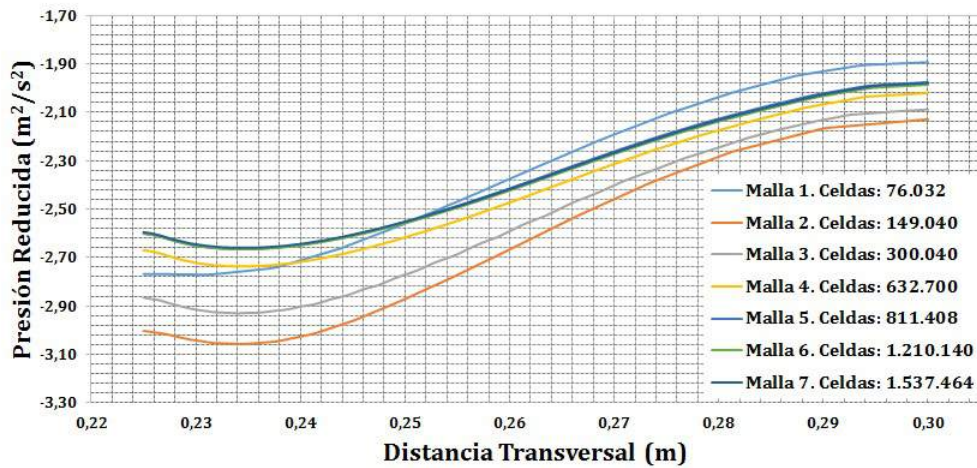


Figura 3-20.: Estudio de Independencia de Malla Dominio con Modelo - Presion Promedio.

Como se observa en la Tabla C-3, presente en el Anexo C, el porcentaje de error entre mallas 6 y 7 es de 0.24% en los datos de presión y 0.07% en los datos de velocidad, lo cual es un indicio de que los datos no están variando de forma significativa si se sigue aumentando el número de elementos. Es por esto que se opta por la configuración de la Malla 6 para el desarrollo de los estudios computacionales que requieran modelos, ya que proporciona resul-

tados similares a los obtenidos en la malla 7 con un tiempo de simulación mucho menor.

3.7. Estudios Perfil de Velocidad

Debido a las modificaciones que tuvieron lugar en la zona de pruebas, se realiza el presente estudio para observar el comportamiento del perfil de velocidad. De acuerdo al diseño computacional planteado en la Sección 3.2.3 se toman los dos extremos de frecuencia que maneja el Túnel de Viento real para observar el perfil de velocidad en el nivel más bajo de frecuencia y en el más alto.

Con el fin de monitorear la velocidad a lo largo de la sección transversal del dominio se posicionan *Probes* cada 2cm con las mismas coordenadas que se especifican en la Tabla **3-10** que se encuentra en la Sección 3.6.1.

3.7.1. Estudios Perfil de Velocidad - Malla

El dominio empleado para el presente estudio es el presentado en la Figura **3-8** en el cual para las condiciones del estudio no se requiere modelo dentro de la zona de pruebas. De acuerdo a lo anterior se emplea la Malla especificada en el estudio Independencia de Malla sin Modelo (Ver sección 3.6.1) con un total de 831.875 elementos.

3.7.2. Estudios Perfil de Velocidad - Resultados y Análisis

Las Figuras **3-21** y **3-22** presentan los perfiles de velocidad obtenidos para las frecuencias de 6 Hz y 60 Hz. En la Tabla **D-1** del Anexo D se presentan los datos de velocidad para las frecuencias de 6 Hz y 60 Hz tomados en cada *Probe* a lo largo de la sección transversal. Como se puede observar la velocidad se mantiene a lo largo de la sección transversal a excepción de los puntos próximos a las paredes.

De acuerdo a los resultados, la forma que tiene el perfil de velocidad para la Frecuencia de 6 Hz es igual al perfil de velocidad de un flujo turbulento, esto puede generarse debido a que se tiene una velocidad de 0.15 m/s en donde el flujo no se encuentra estable. En cuanto al perfil de velocidad de 60 Hz, la forma se aproxima a lo que sería un régimen turbulento, sin embargo se verifica de forma experimental que no se presentan vorticidades al interior de la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, por lo cual se concluye que la forma de perfil se debe a que la velocidad se mantiene constante a lo largo de la sección transversal del dominio.

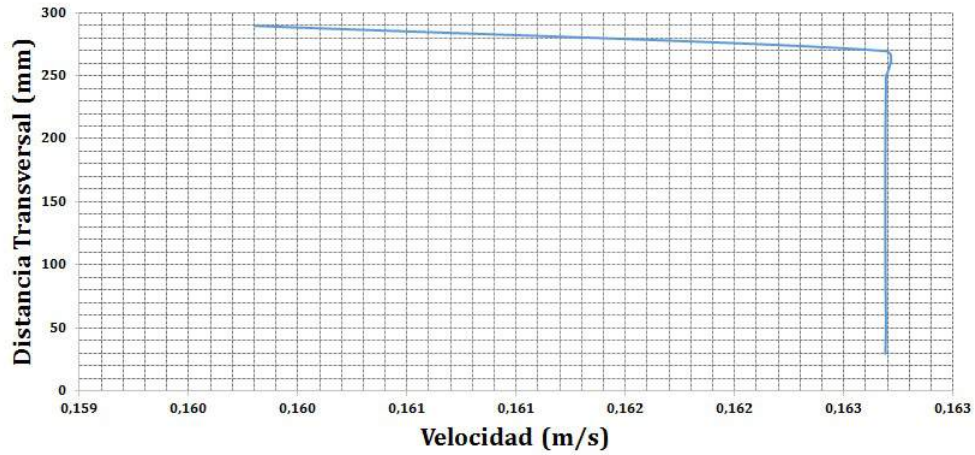


Figura 3-21.: Estudios Perfil de Velocidad - Perfil de Velocidad 6 Hz.

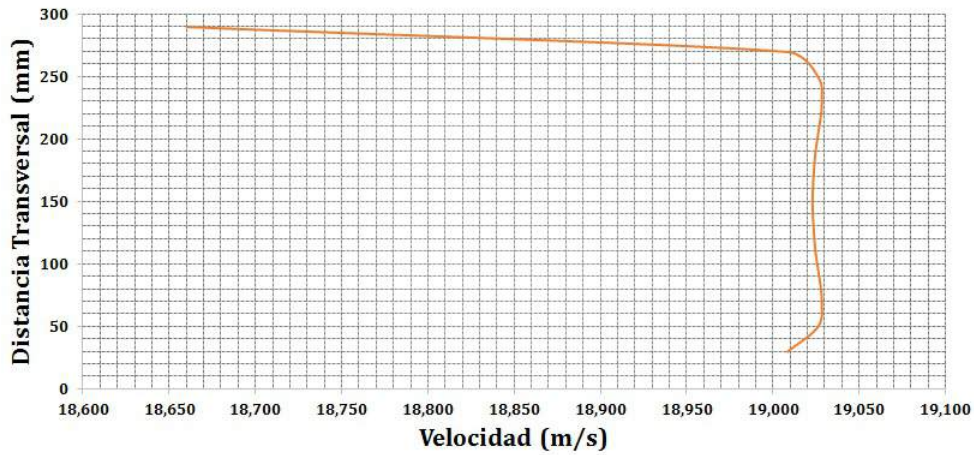


Figura 3-22.: Estudios Perfil de Velocidad - Perfil de Velocidad 60 Hz.

Cabe aclarar que en los puntos cercanos a las paredes la velocidad disminuye debido al efecto de pared y a las funciones de pared aplicadas en el modelo RANS $k - \varepsilon$, esto se hace con el fin de asemejar las condiciones cercanas a la pared real de la zona de pruebas del Túnel de Viento.

El comportamiento turbulento de los perfiles de velocidad para las frecuencias de operación límites del Túnel de Viento, se puede extrapolar a las demás Frecuencias en las que opera.

Posiblemente la única diferencia que se pueda presentar es la posición del perfil en el eje de velocidad, ya que como se ha indicado previamente, la velocidad aumenta de forma lineal a medida que se aumenta la Frecuencia.

Con el fin de validar los resultados obtenidos en las simulaciones de perfil de velocidad, se procede a calcular el porcentaje de error de los datos de velocidad tomados en los *Probes*, respecto a los datos experimentales tomados en las pruebas preliminares en la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 para los mismos puntos.

La Tabla **D-2** presente en el Anexo D, relaciona los porcentajes de error obtenidos para los datos de velocidad en cada *Probe*. Se puede observar que los porcentajes de error mas altos se encuentran en los puntos cercanos a las paredes, sin embargo no afecta significativamente en los resultados del estudio ya que la intencion es tener una idea del comportamiento del perfil de velocidad y determinar los puntos apropiados para posicionar los instrumentos de medida a la hora de las pruebas experimentales.

Al detallar los resultados de los *Probes* ubicados en la zona intermedia del dominio, se observan porcentajes de error de menos del 1 % para la frecuencia de 60 Hz, lo cual valida en su totalidad los resultados obtenidos en la simulación. Al observar los datos para la frecuencia de 6 Hz, se tienen porcentajes de error de menos del 10 % los cuales son un poco más altos que los resultados obtenidos para la frecuencia de 60 Hz, pero que validan de igual forma estudio ya que el porcentaje de error obtenido sigue siendo bajo para una comparación directa con datos experimentales.

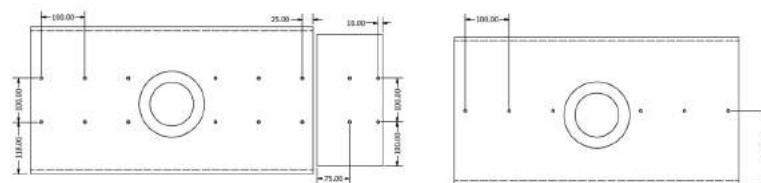
Una de las posibles razones por las que se tiene un porcentaje de error un poco más alto en los resultados para la simulación de 6 Hz, se debe a que al tener una velocidad tan baja, el Número Reynolds se ubica en el rango de 3000 a 4000, más exactamente de 3197. Usualmente cuando se tienen esas condiciones se deben aplicar condiciones de frontera específicas para bajos Reynolds. Sin embargo como el rango de operación del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 varía de 6 a 60 Hz, alcanzando Números Reynolds cercanos a los 400.000; no se ve la necesidad de incluir condiciones de frontera especiales.

3.8. Estudios Configuración Toma de Presión

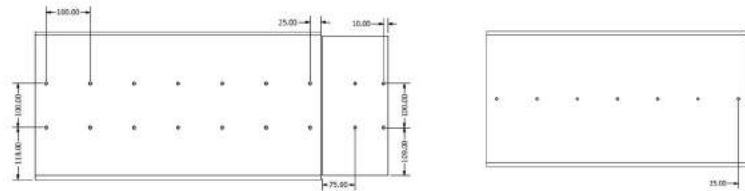
A continuación se presentan los parámetros y resultados del presente estudio cuya intención es definir la configuración de tomas de presión que más se ajusta a la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01. Siguiendo el diseño computacional presentado en la sección 3.2.4, se establecen 2 configuraciones de tomas de presión estática con el fin de verificar si se generan cambios de presión respecto a la línea principal en las velocidades mínima y máxima (6 Hz y 60 Hz). La Configuración 1 asignada a las líneas principales de tomas de

presión estática ubicadas en la zona central de las tapas superior e inferior y la Configuración 2 que se compone de dos líneas separadas entre si a una distancia de 100 mm ubicadas a 50 mm de la línea principal en las tapas superior e inferior.

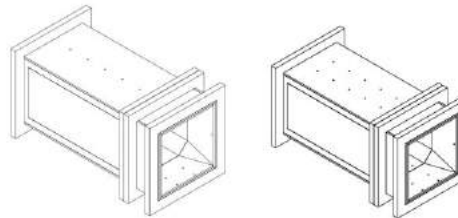
En la Figura 3-23, se observan las dos configuraciones establecidas para el presente estudio en donde la ubicación de las tomas de presión estática es simulada por medio *Probes*. Las Tablas E-1 y E-2 del Anexo E, presentan la numeración de cada *Probe* y su ubicación dentro del dominio en cada configuración.



(a) Tapa Inferior. Izquierda-Configuración 2, Derecha-Configuración 1.



(b) Tapa Superior. Izquierda-Configuración 2, Derecha-Configuración 1.



(c) Vista 3D. Izquierda-Configuración 2, Derecha-Configuración 1.

Figura 3-23.: Estudios Configuración Toma de Presión - Bosquejo Tomas de Presión. (Cotas en mm).

3.8.1. Estudios Configuración Toma de Presión - Malla

En los estudios computacionales para la configuración de tomas de presión, es necesario hacer uso de los dos dominios establecidos en el estudio de Independencia de Malla ya que el comportamiento del flujo se ve afectado cuando se tienen objetos dentro del dominio. Con ambos dominios se pueden evidenciar las diferencias o similitudes que pueden tener los datos de presión registrados en cada una de las configuraciones.

Los Dominios empleados son los presentados en las Figuras **3-15** para las simulaciones sin modelo y **3-18** para las simulaciones con modelo. Se emplea el dominio usado en el estudio de independencia de malla presentado en la Figura **3-15**. El total de elementos asignados para el refinamiento de la malla en el presente estudio, es el establecido en cada uno de los estudios de independencia de malla para el dominio con modelo y para el dominio sin modelo.

3.8.2. Estudios Configuración Toma de Presión - Resultados y Análisis

Sin Modelo

La Figura **3-24** presenta los datos de presión registrados en cada Probe en cada una de las configuraciones establecidas. Como se observa ya que no se tienen modelos dentro del dominio que afecten las condiciones de flujo, la presión se mantiene estable a lo largo de este y por lo tanto los datos son iguales en ambas configuraciones. Debido a que los datos no presentan diferencia en las configuraciones establecidas, se omite el paso de observar el error presentado entre configuraciones.

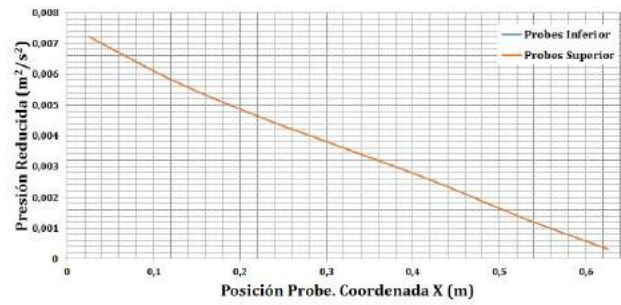
Con Modelo

En los estudios de Configuración de tomas de presión con modelo, se hizo uso de un modelo de 5x5 y uno 15x15 con el fin de observar el comportamiento del registro de datos cuando se tienen objetos pequeños y objetos muy grandes dentro de la zona de pruebas. La Figura **3-25** presenta los datos de presión registrados a 6 Hz y a 60 Hz en cada uno de los probes cuando se tiene un modelo de 5x5. Tal como se observa es evidente que los datos de presión de la Configuración 2 cambian respecto a los datos de presión de la Configuración 1.

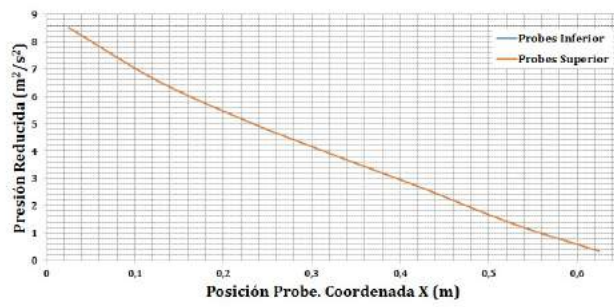
Se evidencia que a bajas velocidades, los datos proporcionados por los *Probes* de la Configuración 2 difieren de los datos proporcionados por la Configuración 1. Caso que se va incrementando a medida que se aumenta la velocidad ya que las presiones registradas son mayores.

Otro factor que se observa es que cuando se tienen modelos pequeños, los valores de presión son mas estables que cuando se tienen modelos grandes, presentando diferencias menores entre los resultados de ambas configuraciones. Razón por la cual se concluye que el gradiente de presión depende del modelo y la velocidad empleada en el dominio.

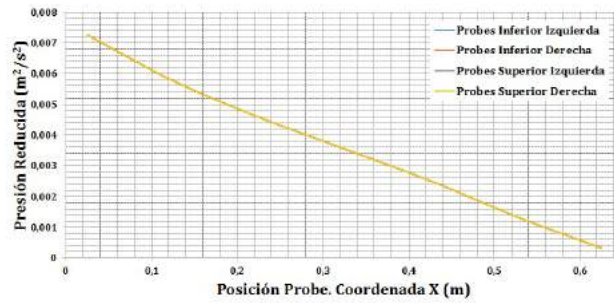
La Figura **3-26** presenta la diferencia que se presenta entre los datos registrados en las líneas Superior e Inferior de la Configuración 1 respecto a los datos de presión registrados en las líneas Inferior Izquierda, Inferior Derecha, Superior Izquierda y Superior Derecha.



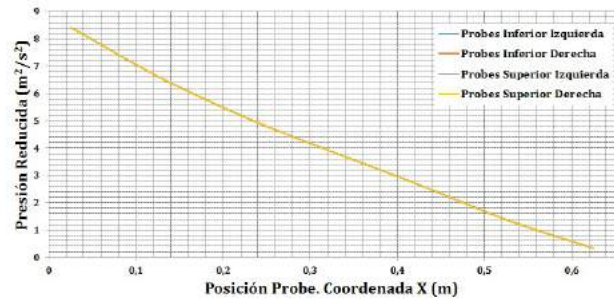
(a) Configuración 1. 6 Hz.



(b) Configuración 1. 60 Hz.



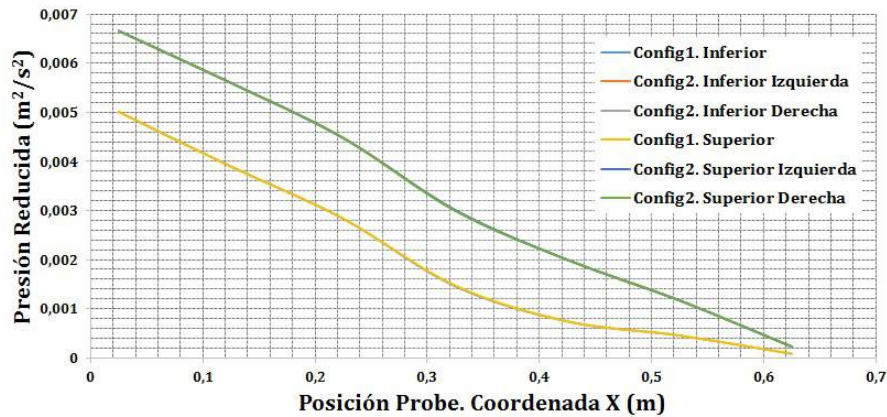
(c) Configuración 2. 6 Hz.



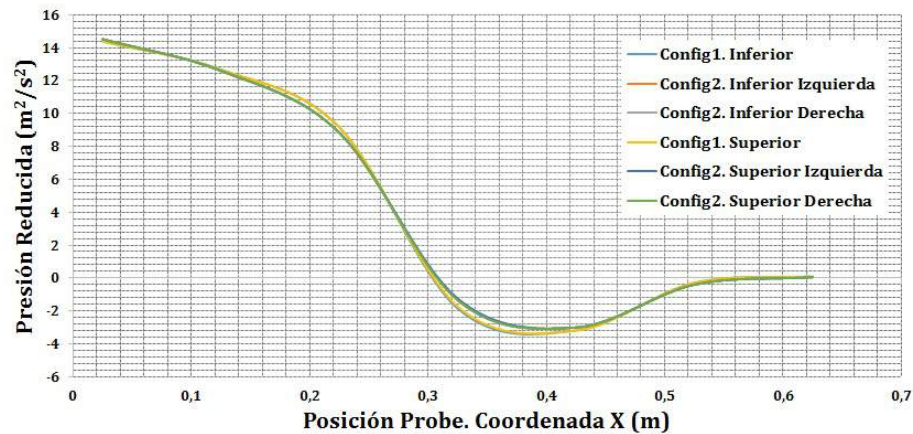
(d) Configuración 2. 60 Hz.

Figura 3-24.: Estudios Configuración Toma de Presión - Presión Vs Posición Probe. Sin Modelo.

De acuerdo a lo establecido anteriormente, se observa que para la Frecuencia de 6 Hz se tienen diferencias entre 0,0014 y 0,0016 unidades en los probes ubicados en las zonas inmediatas al modelo, con una tendencia a disminuir a medida que se aproxima a la salida del dominio. Esto es un indicio de que la presión está variando a lo largo del dominio por acción del objeto presente. Cuando se observa la gráfica para 60 Hz, la diferencia entre resultados tiende a aumentar en las zona aledañas al modelo presentando bajos resultados en la entrada y salida del dominio.

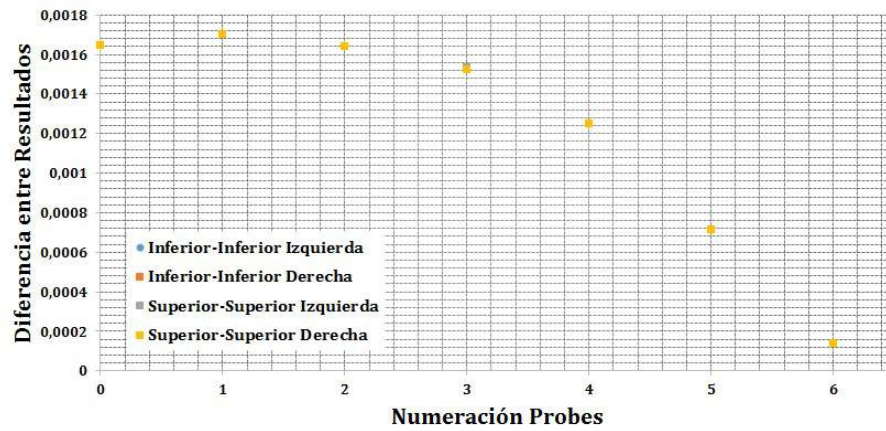


(a) Modelo 5x5. 6 Hz.

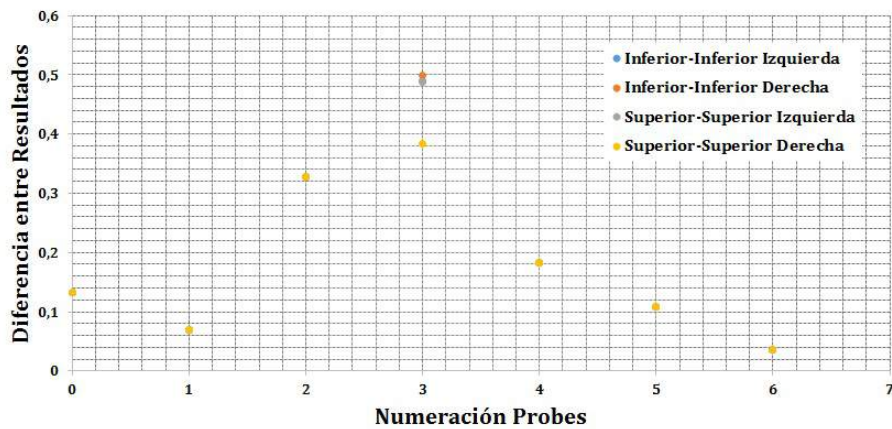


(b) Modelo 5x5. 60 Hz.

Figura 3-25.: Estudios Configuración Toma de Presión - Presión Vs Posición Probe. Con Modelo. Modelo 5x5.



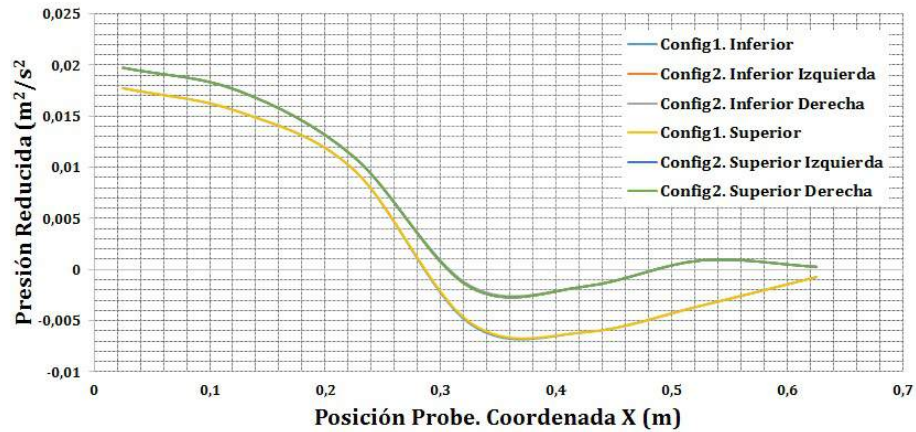
(a) 6Hz



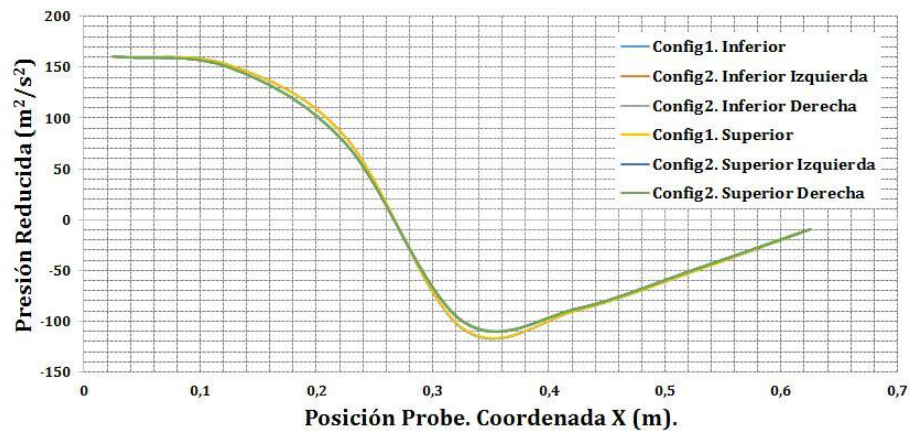
(b) 60 Hz.

Figura 3-26.: Estudios Configuración Toma de Presión - Diferencia de Resultados Entre Configuraciones. Con Modelo. Modelo 5x5.

La Figura 3-27 presenta los datos de presión registrados a 6 Hz y a 60 Hz en cada uno de los probes cuando se tiene un modelo de 15x15. Tal como se observó en el modelo de 5x5 para la Frecuencia de 6 Hz la diferencia de los datos de presión de la Configuración 2 respecto a los datos de presión de la Configuración 1 es notoria, evidenciándose aun más en los probes ubicados en las zona adyacentes al modelo.



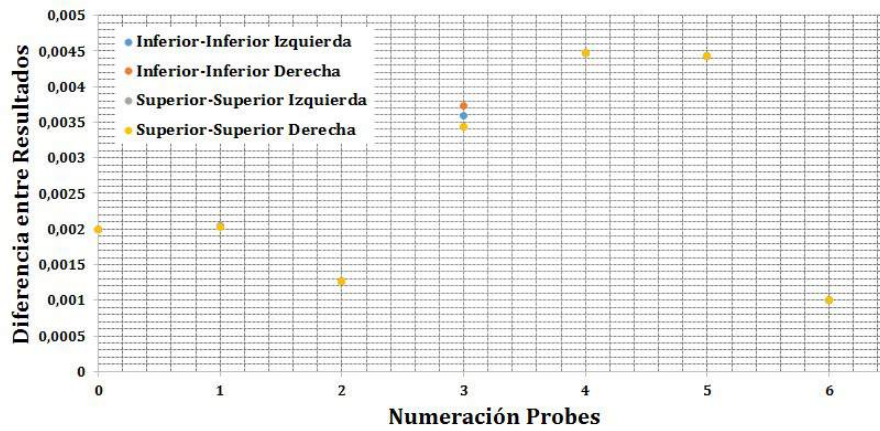
(a) Modelo 15x15. 6 Hz.



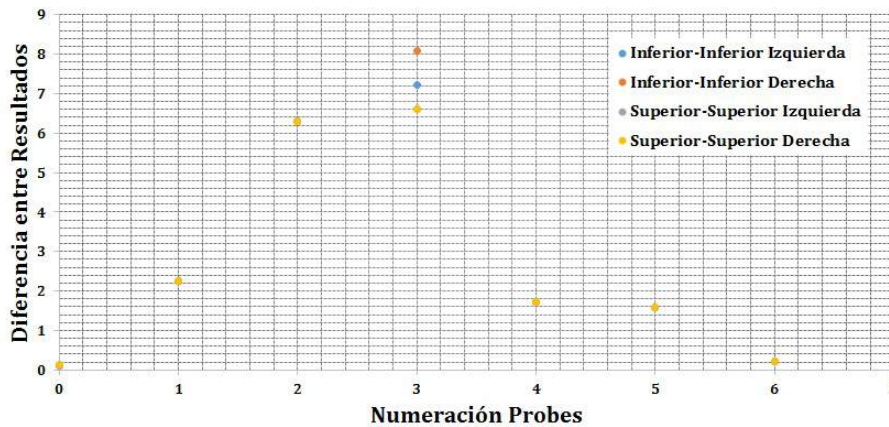
(b) Modelo 15x15. 60 Hz.

Figura 3-27.: Estudios Configuración Toma de Presión - Presión Vs Posición Probe. Con Modelo. Modelo 15x15.

Al igual que se hizo con el modelo de 5x5, se realiza un análisis para determinar la diferencia entre los datos registrados en las tomas de presión de la Configuración 2 respecto a los datos registrados en la Configuración 1. Tal como se observa en la Figura 3-28 para los datos de 6 Hz la diferencia más alta se ubica en los probes que abarcan la estela del objeto a la salida del dominio. Para los datos de 60 Hz, la diferencia más grande que se tiene se encuentra alrededor de las 8 unidades.



(a) 6Hz



(b) 60 Hz.

Figura 3-28.: Estudios Configuración Toma de Presión - Diferencia de Resultados Entre Configuraciones. Con Modelo. Modelo 15x15.

Conclusiones Generales

En base a los resultados presentados en las secciones anteriores, se evidencia que la presencia de un modelo dentro de la zona de pruebas influye directamente sobre el comportamiento del gradiente de presión. Cuando se tienen modelos muy grandes, como es el caso del modelo de 15x15, al estar más cerca de las tomas de presión, los datos registrados entre configuraciones presentan una mayor variación de la registrada cuando se tiene el modelo de 5x5 cuyas paredes se encuentran más alejadas de las líneas de presión.

La velocidad es otro factor que influye a la hora de registrar los datos. Como se observa en las gráficas de diferencia entre resultados, a bajas velocidades se registran variaciones de presión a lo largo del dominio, las cuales se van incrementando a medida que se aumenta la velocidad. De igual forma se evidencian variaciones en los datos registrados por los probes ubicados a la salida del dominio en donde se forma la estela del objeto. En este punto encontramos velocidades cercanas a cero y el comportamiento del flujo es desordenado, razón por la cual los datos de presión en las líneas de la Configuración 2 no son los mismos a los registrados en la línea principal de la Configuración 1.

A pesar de que se registran diferencias en las lecturas de ambas configuraciones, no es necesario instalar más líneas de presión en la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, ya que como se ha evidenciado anteriormente, el gradiente de presión depende del modelo y velocidad usada. Para identificar el perfil de presiones de la zona de pruebas, basta con las líneas de presión establecidas en la Configuración 1, ya que como se observó en el estudio sin modelo, los datos de presión se mantienen estables a lo largo del dominio.

En caso de que se desee conocer en otros proyectos de investigación o prácticas académicas todos los registros de presión presentes en la zona de pruebas cuando se tiene determinado modelo, se recomienda ubicar más líneas de tomas de presión estática para ser más exactos en la toma de datos.

3.9. Estudio Caso de Flujo Externo

El presente estudio tiene como objetivo establecer los límites en los que se puede tener un objeto dentro del dominio, sin que este se vea afectado por el efecto de pared. De acuerdo a lo recomendado por los diseñadores del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, para tener condiciones de similitud de flujo, el modelo no debe superar el 10% del total de la sección transversal de la zona de pruebas; sin embargo se debe corroborar esta información ya que el Túnel de Viento ha sido sometido a modificaciones.

De igual forma se debe observar el comportamiento del flujo cuando este es sometido a la interacción con un objeto que no cumple con las especificaciones dadas, ya que se debe tener en cuenta que el Túnel de Viento es de tipo académico y puede estar sujeto a ser empleado con modelos que sobrepasan los límites de dimensionamiento para pruebas que solo requieran visualización de flujo.

De acuerdo a lo planteado en el diseño computacional para el Caso de flujo externo (Ver Sección 3.2.5) se toma como modelo de prueba un Cilindro Rectangular de tipo cuadrado de relación de aspecto 1, el cual es uno de los casos de flujo externo más estudiados tanto en el ámbito de la dinámica de fluidos computacional como en la dinámica de fluidos experimental

y el cual ha sido validado previamente. Se escoge la configuración cuadrada ya que el volúmen ocupado por el cubo permite abarcar de forma similar un amplio rango de modelos cuyas dimensiones pueden ocupar el mismo espacio que ocupa este cuando se pongan a prueba en el Túnel de Viento.

CILINDRO	ALTURA (m)	ANCHO (m)	LONGITUD (m)
3x3	0,03	0,03	0,03
5x5	0,05	0,05	0,05
10x10	0,10	0,10	0,10
15x15	0,15	0,15	0,15

Tabla 3-13.: Estudio Caso de Flujo Externo - Dimensiones Cilindros Rectangulares

MEDICIÓN	X(m)	Y (m)	Z (m)
Entrada Dominio	0,16625	0-0,30	0,15
Salida Dominio	0,4875	0-0,30	0,15
Línea Media	0-0,65	0,15	0,15
Cilindro-Pared Superior	0,33	Ver Nota	0,15

NOTA = La coordenada Y cambia respecto al modelo empleado. Modelo 3x3: 0,165-0,30; Modelo 5x5: 0,175-0,30; Modelo 10x10: 0,2-0,30; Modelo 15x15: 0,225-0,30.

Tabla 3-14.: Estudio Caso de Flujo Externo - Coordenadas Puntos de Medición Perfiles Cilindros Rectangulares

Para el estudio se establecen 4 modelos cuyas dimensiones se relacionan en la Tabla **3-13**. Estos modelos son probados a las Frecuencias de 6 Hz y 60 Hz. Para definir los límites en los cuales la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 permite tener condiciones de similitud de flujo, es decir que se puede realizar el estudio de las características aerodinámicas de un objeto sin que estas se vean afectadas por las paredes, y caracterizar el comportamiento del flujo con un objeto que se encuentra fuera de estos límites; se realizan mediciones de velocidad y presión tanto en el Cilindro Rectangular como en el Dominio.

Con el fin de observar el comportamiento aerodinámico de cada modelo, se grafican los perfiles de velocidad y presión para las zonas adyacentes al modelo, línea media que atraviesa el Dominio y la zona comprendida desde la pared superior del modelo hasta la pared superior del Dominio. La Tabla **3-14** relaciona las coordenadas de los puntos en donde se toman las mediciones.

Por otro lado se realiza el estudio de la distribución de presión a lo largo de la superficie Cilindro Rectangular tal como se muestra en la Figura 3-29, en la cual la distancia de la superficie es adimensionalizada por medio de cuatro puntos que identifican cada sección de pared.

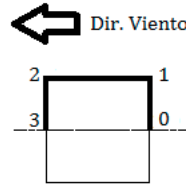
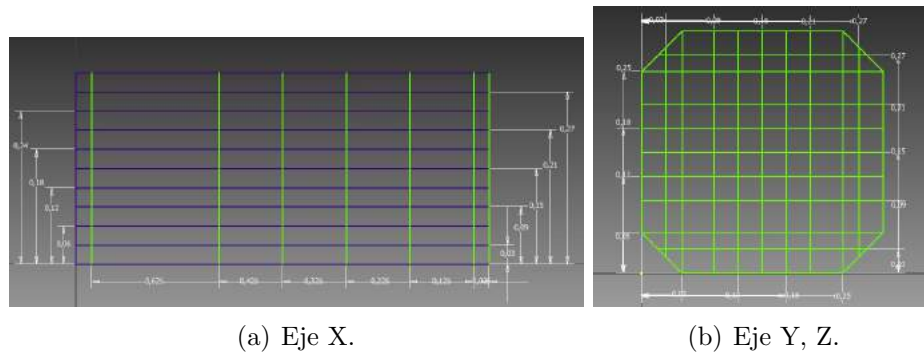


Figura 3-29.: Estudio Caso de Flujo Externo - Puntos de Medición Distribución de Presión Estática Cilindro Rectangular.



(a) Eje X.

(b) Eje Y, Z.

Figura 3-30.: Estudio Caso de Flujo Externo - Puntos de Medición en el Dominio Ejes X,Y,Z.

Para identificar las condiciones de similitud de flujo en la zona de pruebas, se toman puntos a lo largo de los ejes X, Y y Z del dominio para graficar los perfiles de velocidad y presión. En la Figura 3-30 se pueden observar las líneas trazadas sobre los distintos ejes en donde se tomaron las mediciones. Las Tablas F-1 y F-2 del Anexo F, especifican las coordenadas de los puntos tomados para dichas mediciones.

3.9.1. Estudio Caso de Flujo Externo - Malla

Para el presente estudio se requiere un total de cuatro Dominios, en donde el Cilindro Rectangular ubicado en el centro de la cavidad, modifica el tamaño de los bloques adyacentes pero se mantiene el número de elementos presente en cada bloque. El dominio empleado para el presente estudio es el presentado en la Figura 3-18 en donde la configuración de este se adapta al modelo que requiera el estudio. Se emplea la Malla especificada en el estudio de

Independencia de Malla con Modelo (Ver sección 3.6.2) con un total de 1.210.140 elementos.

3.9.2. Estudio Caso de Flujo Externo - Resultados y Análisis

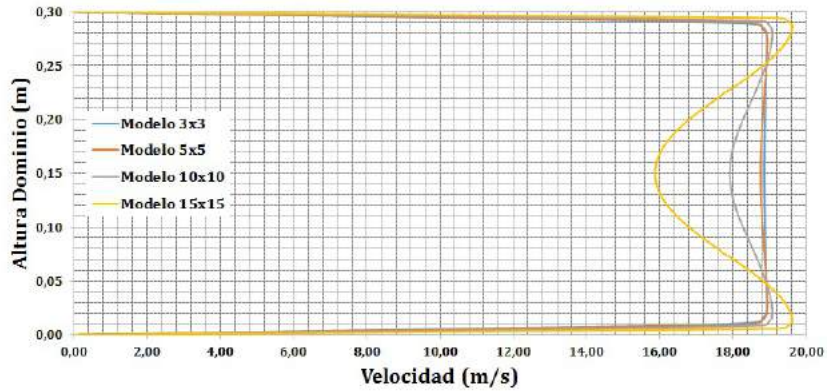
A continuación se presentan los resultados y conclusiones del estudio computacional para el Caso de Flujo Externo. Debido a la extensión de los resultados, estos se presentan en distintas secciones que permiten una mayor organización de la información y por último se entregan las conclusiones generales. Con el fin de no saturar el presente capítulo, se presentan solo las gráficas con los resultados más destacados, la información restante es indexada en el Anexo F.

Características Aerodinámicas Cilindros Rectangulares

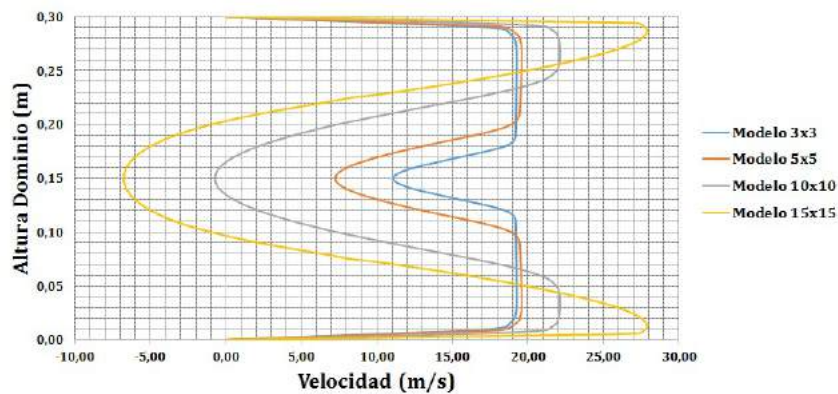
Como se menciona anteriormente, se debe observar el comportamiento del flujo cuando este interactúa con objetos cuyas dimensiones son diferentes. Para esto, se toman mediciones de velocidad y presión en las zonas adyacentes al modelo. Para empezar La Figura **3-31** presenta los perfiles de Velocidad para la Frecuencia de 60 Hz en las zonas de Ingreso y Salida del Dominio para los diferentes modelos estudiados. Como se puede observar, a medida que aumenta la sección transversal del Cilindro Rectangular, las condiciones de flujo de la entrada se ven afectadas por el impacto del flujo con el modelo, disminuyendo la velocidad en la zona central del Dominio.

Al comparar los resultados de la Frecuencia de 60 Hz con los resultados obtenidos para la Frecuencia de 6 Hz (Ver Figura **F-1**, Anexo F), se evidencian ligeras variaciones en la zona central de los perfiles de velocidad para los modelos de 3x3 y 5x5, de igual forma se observan cambios más bruscos en las zonas cercanas a la pared para los modelos de 10x10 y 15x15 y una disminución de velocidad mucho más aguda en la zona central de los perfiles.

Este comportamiento es de esperarse ya que como se ha mencionado en secciones anteriores el flujo a esta Frecuencia se encuentra en estado de transición, por lo cual no se tiene la misma velocidad a lo largo del Dominio. Razón por la cual no se tiene el mismo comportamiento observado en los perfiles de 60 Hz.



(a) Perfil de Velocidad. Entrada Dominio. 60 Hz.

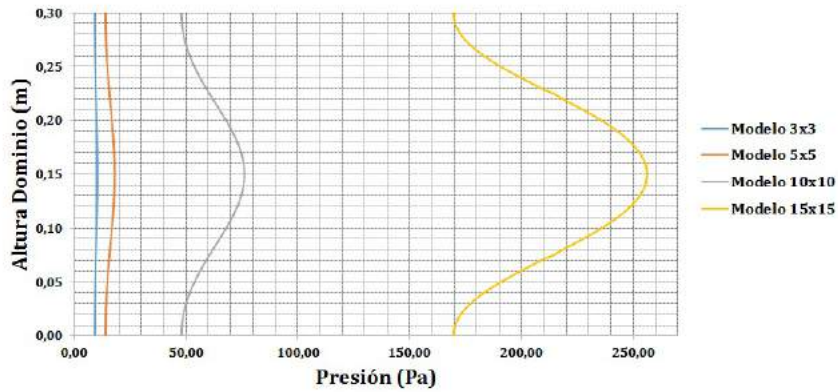


(b) Perfil de Velocidad. Salida Dominio. 60 Hz.

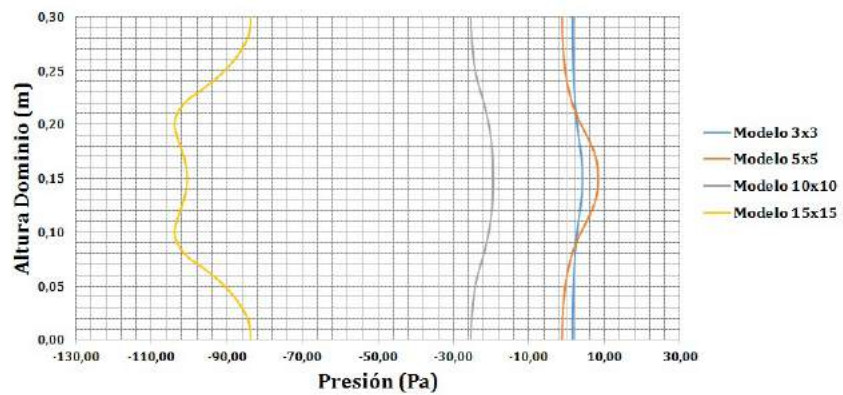
Figura 3-31.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfiles de Velocidad. Entrada y Salida del Dominio. 60 Hz.

El comportamiento del perfil de presión para los diferentes modelos sigue la misma tendencia observada en los perfiles de velocidad. Tal como se observa en la Figura 3-32, a medida que se aumenta la sección transversal del modelo, la presión va aumentando en la zona central

afectando las condiciones de entrada del flujo.



(a) Perfil de Presión. Entrada Dominio. 60 Hz.



(b) Perfil de Presión. Salida Dominio. 60 Hz.

Figura 3-32.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfiles de Presión. Entrada y Salida del Dominio. 60 Hz.

En la salida del dominio se observa un comportamiento similar al de las condiciones de

entrada para el modelo de 3x3, los demás modelos presentan un aumento de la presión de la zona central, a excepción del modelo de 15x15 el cual presenta un perfil de presiones anormal.

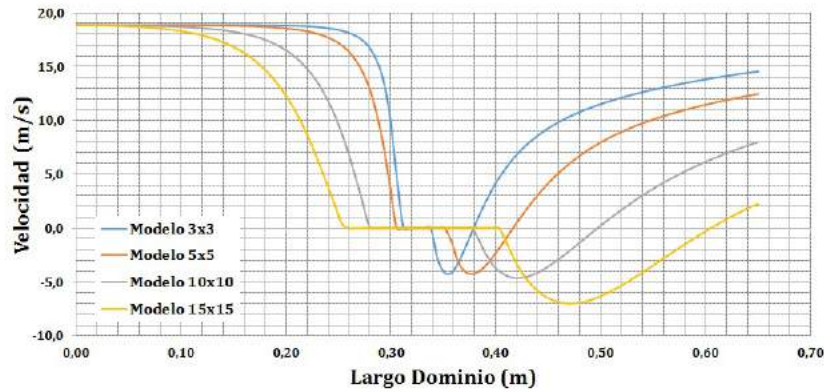
Si se observan los resultados presentado en las gráficas de la Figura **F-2** presente en el Anexo F, el comportamiento de la presión a la frecuencia de 6 Hz es igual al observado a la Frecuencia de 60 HZ, teniendo en cuenta que las presiones son mucho menores debido a que la velocidad es de $0,15m/s$.

Continuando con el análisis del comportamiento aerodinámico que presenta el modelo cuando este se encuentra dentro de la zona de pruebas, se toman mediciones de Velocidad y Presión a lo largo de la línea media del dominio. La Figura **3-33** presenta los perfiles de velocidad y presión para la frecuencia de 60 Hz en esa zona. Como se observa la distribución de la velocidad para cada uno de los modelos presenta un comportamiento similar al observado en las distribuciones de velocidad que se encuentran en la bibliografía.

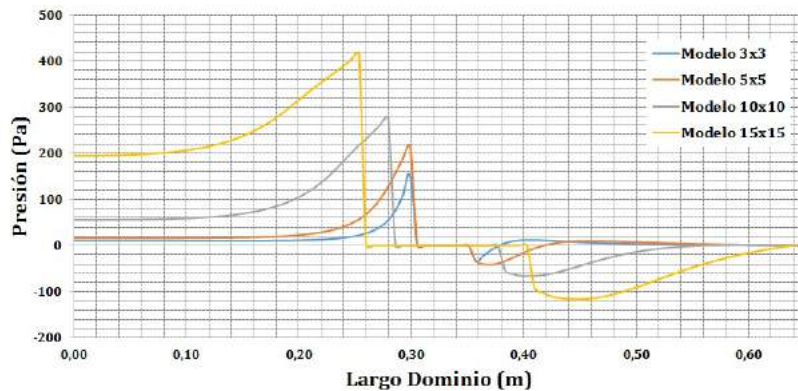
Para el caso pertinente a el presente estudio, se observa que el modelo de 3x3 mantiene condiciones de velocidad estables hasta las zonas inmediatas al modelo. En la zona de estela las velocidades se van a cero, pero tiende a recuperar la velocidad de entrada. A medida que se aumenta la sección transversal del modelo, el comportamiento de la velocidad tiende a no mantener las condiciones de velocidad entrada hasta llegar el caso observado en el modelo de 15x15, el cual no presenta estabilidad respecto a las condiciones de entrada.

En el caso de la presión el comportamiento evidenciado para el modelo de 3x3 mantiene condiciones estables inclusive en la zona de estela, comportamiento que no se ve reflejado en los modelos restantes ya que la presión se ve afectada desde la zona de ingreso. Los perfiles de Velocidad observados en la Figura **F-3** del Anexo F para la frecuencia de 6 Hz poseen distribuciones similares a las observadas en la frecuencia de 60 Hz. La Presión se ve afectada por la velocidad del flujo, más que todo en la zona de la estela, ya que inclusive para el modelo de 3x3, esta no mantiene condiciones de entrada sino hasta llegar a la salida del dominio.

La Figura **3-34** presenta el perfil de velocidad y presión para los diferentes modelos en la zona comprendida entre la pared superior del modelo y la pared superior del Dominio. En este punto las condiciones de velocidad y presión establecidas en la entrada no se obtienen debido a la reducción de área que se presenta por la ubicación del modelo, lo que conlleva a un aumento de la velocidad y de la presión en esta zona. Sin embargo se observa que en los modelos de 3x3 y 5x5 se presenta velocidad constante a lo largo de la sección transversal de la zona comprendida entre las paredes, caso que no ocurre en los modelos restante ya que la velocidad va aumentando a lo largo de esta zona.



(a) Perfil de Velocidad. Línea Media del Dominio. 60 Hz.

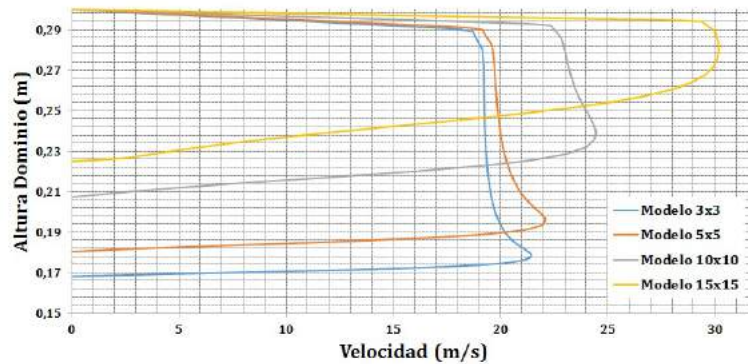


(b) Perfil de Presión. Línea Media del Dominio. 60 Hz.

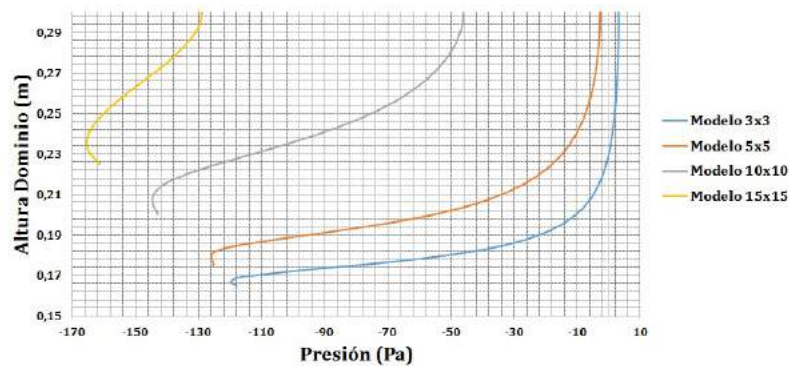
Figura 3-33.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfiles de Velocidad y Presión. Línea Media del Dominio. 60 Hz.

En el caso de la presión, los modelos de 3x3 y 5x5 tienen un comportamiento en donde los datos tienden a cero a medida que se acercan a la pared, caso que no ocurre en los modelos de 10x10 y 15x15, cuya presión se encuentra por debajo de cero inclusive, en las zonas aledañas

a la pared superior del Dominio. Este comportamiento se evidencia también en los perfiles de velocidad y presión para la frecuencia de 6 Hz (ver Figura F-4, Anexo F).



(a) Perfil de Velocidad. Cilindro Rectangular-Pared Superior Dominio. 60 Hz.

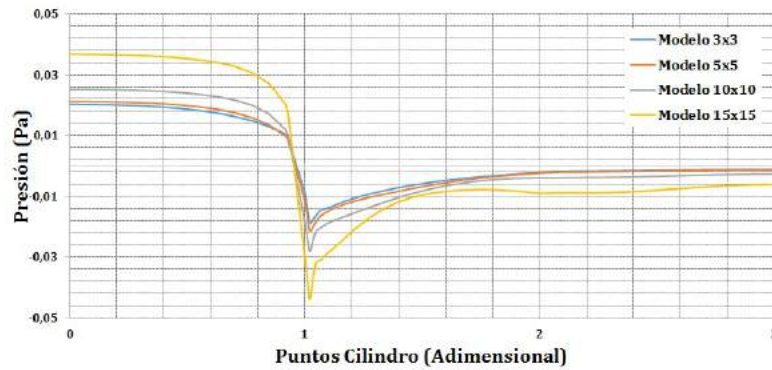


(b) Perfil de Presión. Cilindro Rectangular-Pared Superior Dominio. 60 Hz.

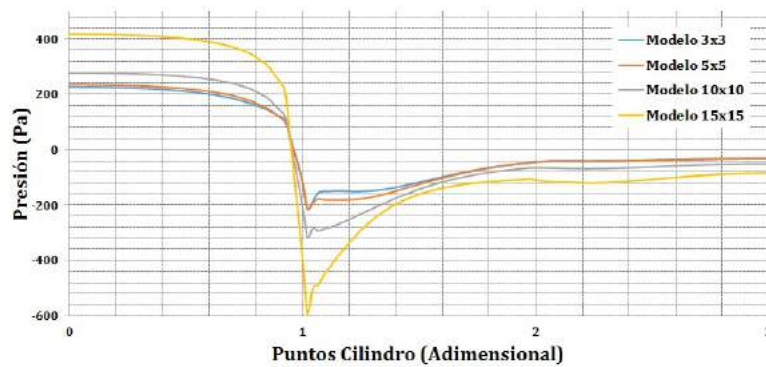
Figura 3-34.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfiles de Velocidad y Presión. Cilindro Rectangular-Pared Superior Dominio. 60 Hz.

Para finalizar el análisis del comportamiento aerodinámico del modelo, se presenta la dis-

tribución de presión a lo largo de la superficies superiores del Cilindro Rectangular para las Frecuencias de 6 Hz y 60 Hz. Tal como se observa en la Figura 3-35, el comportamiento es parecido al de las distribuciones de presión sobre cilindros rectangulares de relación de aspecto 1 encontradas en la bibliografía.



(a) 6 Hz.



(b) 60 Hz.

Figura 3-35.: Estudio Caso de Flujo Externo - Distribución de Presión sobre Cilindro Rectangular

La tendencia observada del comportamiento de la presión es similar al encontrado en los perfiles de velocidad realizados sobre la línea media del Dominio, en donde se encuentran presiones altas en la zona 0-1 que es la que golpea el flujo, es decir la zona de ingreso, hasta pasar a la zona 1-2 en donde la presión se va por debajo de cero debido a que en este punto se empiezan a generar los vórtices propios de este tipo de configuraciones.

Por último, la zona 2-3, presenta un comportamiento de la presión en donde esta tiende a cero ya es un área que no tiene contacto directo con el flujo, y como lo que importa son los datos sobre la superficie, esto no se ven afectados por los vórtices generados en la parte posterior del Cilindro Rectangular.

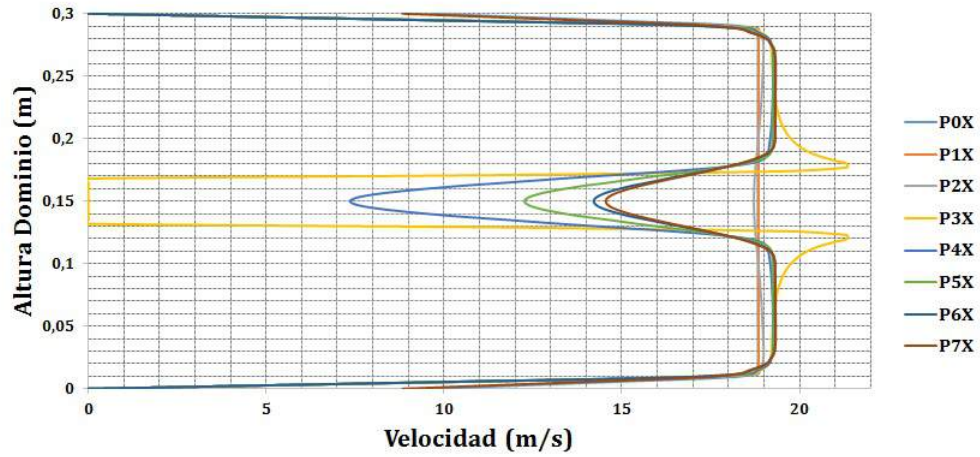
Características Aerodinámicas Dominio

Para determinar las características del flujo dentro del dominio cuando este se encuentra en contacto con un objeto, y corroborar si se mantienen condiciones de similitud de flujo en las zonas adyacentes al modelo, se toman mediciones de velocidad y presión a lo largo de los ejes X, Y y Z. La Figura **3-36** presenta los perfiles de velocidad a lo largo del eje X para los modelos de 3x3 y 15x15 a la frecuencia de 60 Hz. Como conclusión principal se tiene que el modelo influye directamente sobre el comportamiento del flujo, en este caso el modelo de 3x3 presenta condiciones de similitud de flujo hasta el punto 3X en donde ya se empiezan a evidenciar cambios en la velocidad.

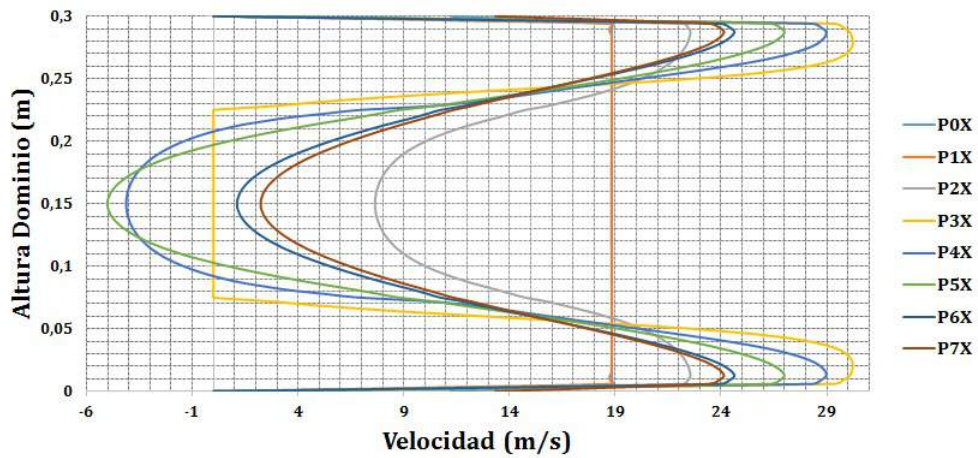
Los puntos restantes muestran las campanas propias del objeto en si y de la estela de este en la zona central, manteniendo condiciones de velocidad estables por encima y por debajo del modelo. Este comportamiento cambia por completo al analizar el perfil de velocidad para el modelo de 15x15, en donde las condiciones de velocidad son afectadas desde la zona de ingreso al dominio, expandiéndose a lo largo de la sección transversal de este.

Cuando se observan los perfiles de velocidad a lo largo de los Ejes Y y Z presentados en las Figuras **3-37** y **3-38** para los modelos de 3x3 y 15x15 a la frecuencia de 60 Hz, se evidencia un comportamiento estable de la velocidad en las zonas adyacentes al modelo de 3x3. Para el modelo de 15x15 no se repite esta condición ya que por estar el modelo tan cerca a las paredes del dominio, las zonas adyacentes son mas estrechas y por lo tanto el efecto de pared afecta las condiciones del flujo.

Al igual que lo ocurrido en el eje X para el modelo de 3x3, se presentan campanas propias del objeto en si y de la estela de este en la zona central, manteniendo condiciones de velocidad estables en las zonas adyacentes a las paredes laterales del Dominio. Para el modelo de 15x15, el poco espacio que queda entre las paredes laterales del dominio y el objeto, afectan las condiciones de flujo, lo cual no permite que se generen condiciones de similitud de flujo en estas zonas.

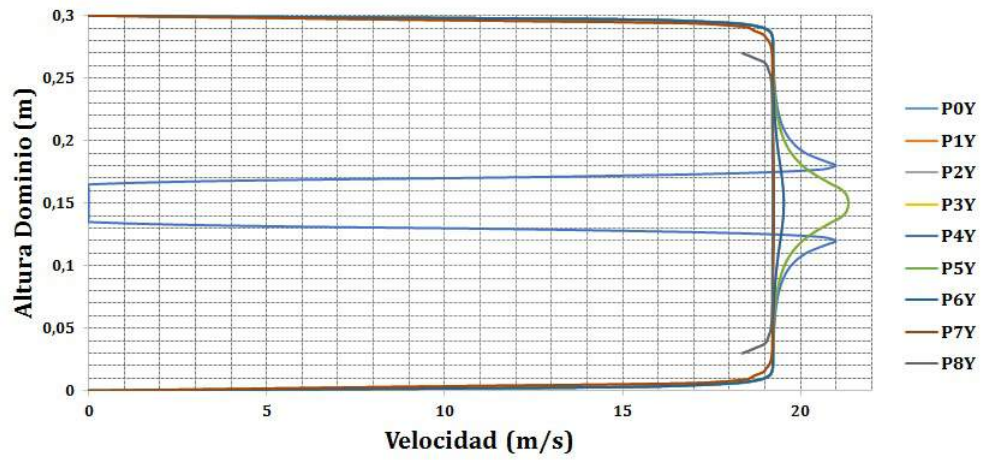


(a) Modelo 3x3.

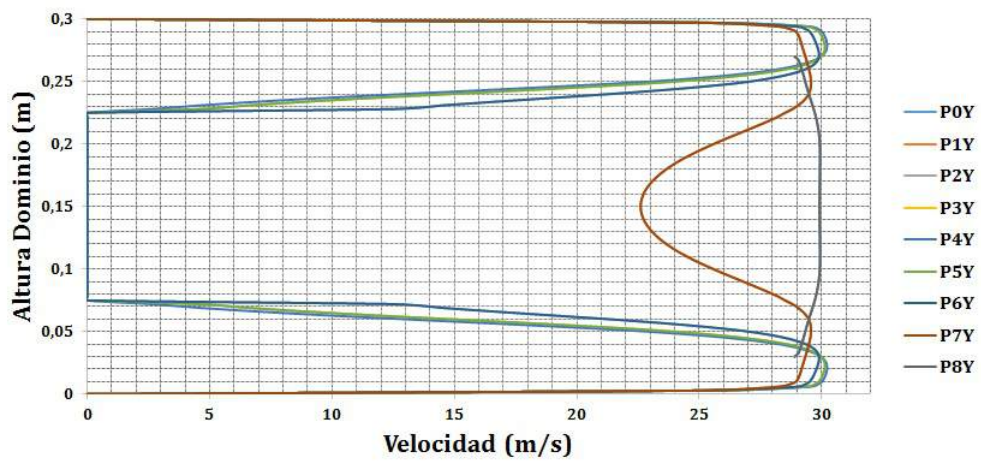


(b) Modelo 15x15.

Figura 3-36.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Velocidad a lo largo del eje X. Modelos 3x3 y 15x15. 60 Hz.

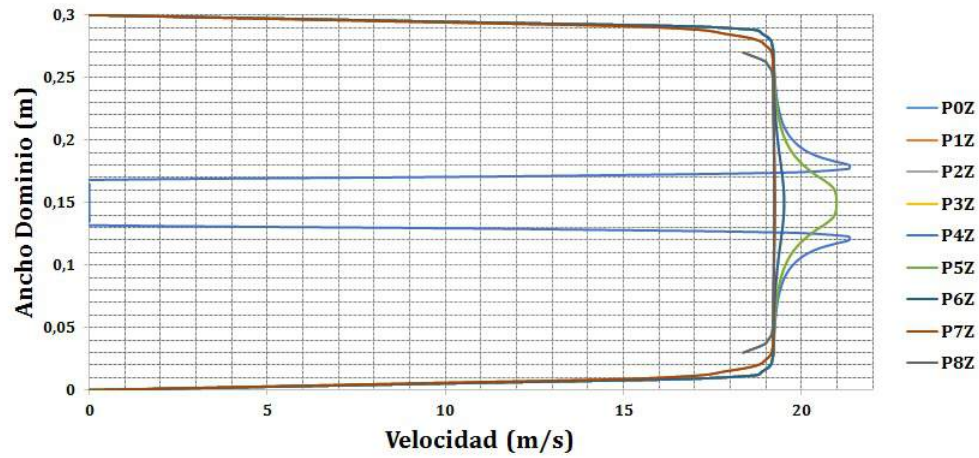


(a) Modelo 3x3.

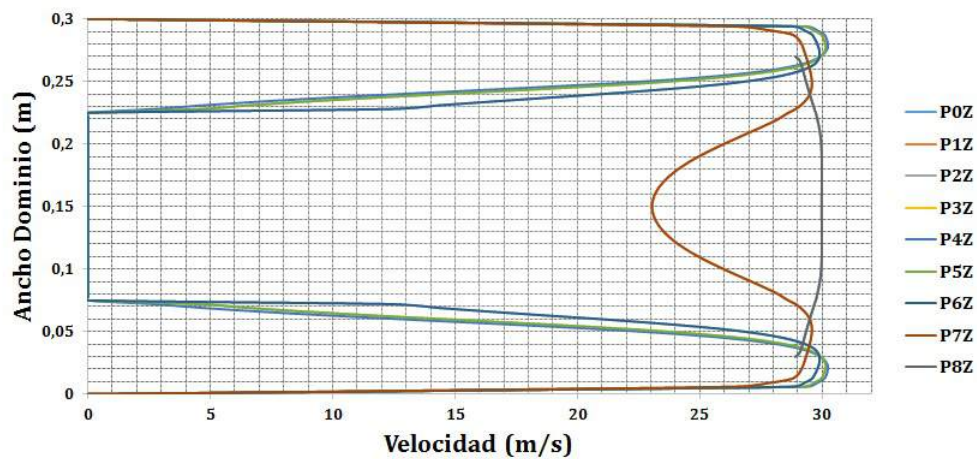


(b) Modelo 15x15.

Figura 3-37.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Velocidad a lo largo del eje Y. Modelos 3x3 y 15x15. 60 Hz.



(a) Modelo 3x3.



(b) Modelo 15x15.

Figura 3-38.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Velocidad a lo largo del eje Z. Modelos 3x3 y 15x15. 60 Hz.

Cuando se comparan estos resultados con los resultados observados en los perfiles de velocidad de los modelos de 5x5 y 10x10 para los Ejes X, Y y Z del Anexo F, Figuras **F-6**, **F-12** y **F-16**. Se evidencia que a medida que se va aumentando la sección transversal del objeto, las condiciones de flujo no son estables. Se puede decir que el modelo de 5x5 alcanza condiciones de similitud de flujo, pero en el modelo de 10x10 ya empiezan a presentar inestabilidades en la velocidad a lo largo de la sección transversal del dominio.

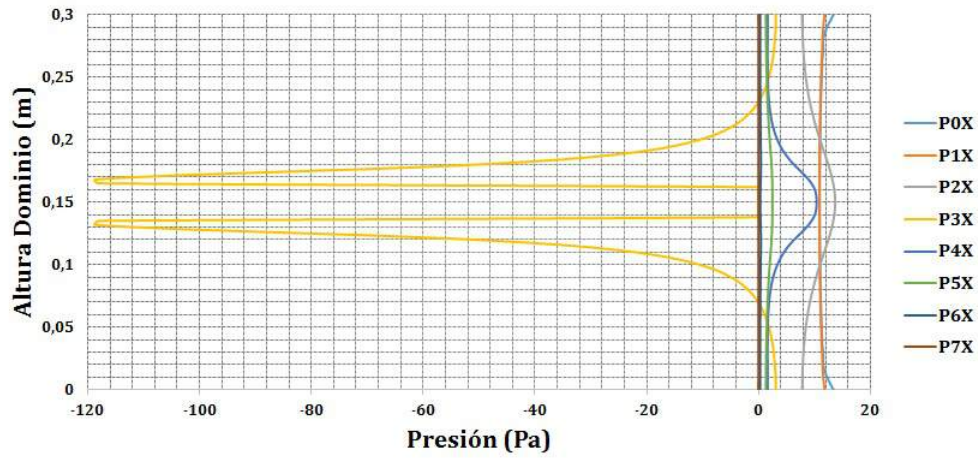
Los Perfiles de velocidad para los diferentes modelos a la Frecuencia de 6 Hz se encuentran en el Anexo F, Figuras **F-5**, **F-11** y **F-15**. El comportamiento de los perfiles evidenciado en el análisis respecto a cada eje, es similar al comportamiento evidenciado para los análisis con Frecuencia de 60 Hz.

Las Figuras **3-39**, **3-40** y **3-41**, presentan los perfiles de presión para los modelos de 3x3 y 15x15 a la frecuencia de 60 Hz, a lo largo de los ejes X, Y y Z. El comportamiento de los datos a lo largo de los ejes, corrobora la hipótesis establecida en análisis anteriores, en donde a medida que se aumenta la sección transversal del modelo (Complementar con Figuras **F-6**, **F-12** y **F-16**, Anexo F), no se presentan condiciones de similitud de flujo en las zonas adyacentes a este.

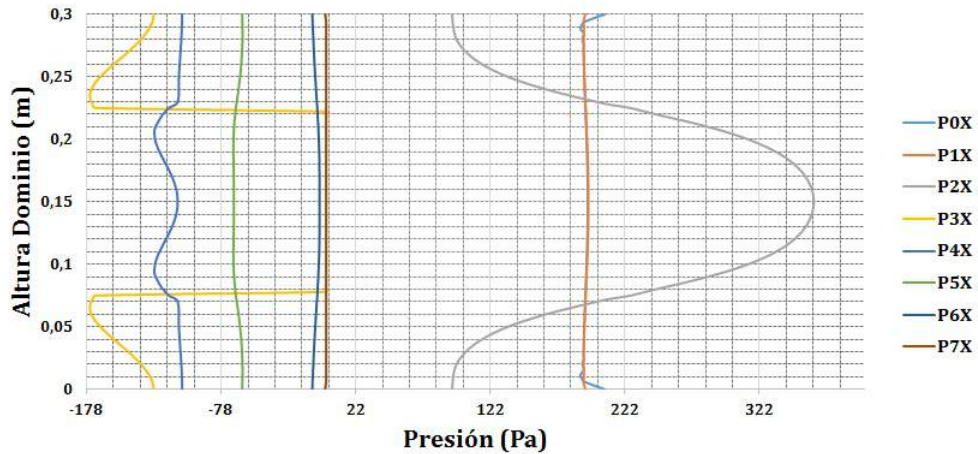
Al observar el perfil de presiones del modelo de 3x3, se encuentran cambios leves de presión en los puntos ubicados en la zona de ingreso del dominio; los puntos que se encuentran en las zonas inmediatas al modelo, tienen comportamientos inestables que se extienden hasta los puntos ubicados en la salida del dominio. En el caso del modelo de 15x15, el comportamiento del flujo es afectado en todos los puntos a lo largo del Dominio, esto se debe a que las paredes del modelo se encuentran muy cerca a las paredes del Dominio, lo que generan zonas de presión altas y bajas en toda la región.

En los perfiles de Presión a lo largo de los Ejes Y y Z, se evidencia un comportamiento más estable de los datos en las zonas adyacentes a las paredes del modelo de 3x3, lo que indica que se tienen condiciones de similitud de flujo en las paredes laterales del Dominio. Para el modelo de 15x15 no se repite esta condición ya que por estar el modelo tan cerca a las paredes del Dominio, las zonas adyacentes son mas estrechas y por lo tanto el efecto de pared afecta las condiciones del flujo.

Este comportamiento también se puede evidenciar en los perfiles de presión a lo largo de los ejes X, Y y Z, para la frecuencia de 60 Hz, presentados en las Figuras **F-7**, **F-13** y **F-17** del Anexo F.

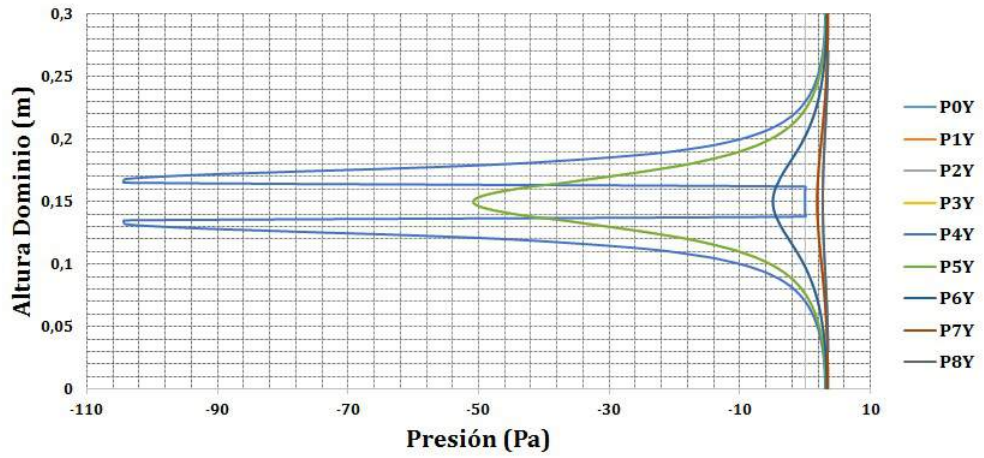


(a) Modelo 3x3.

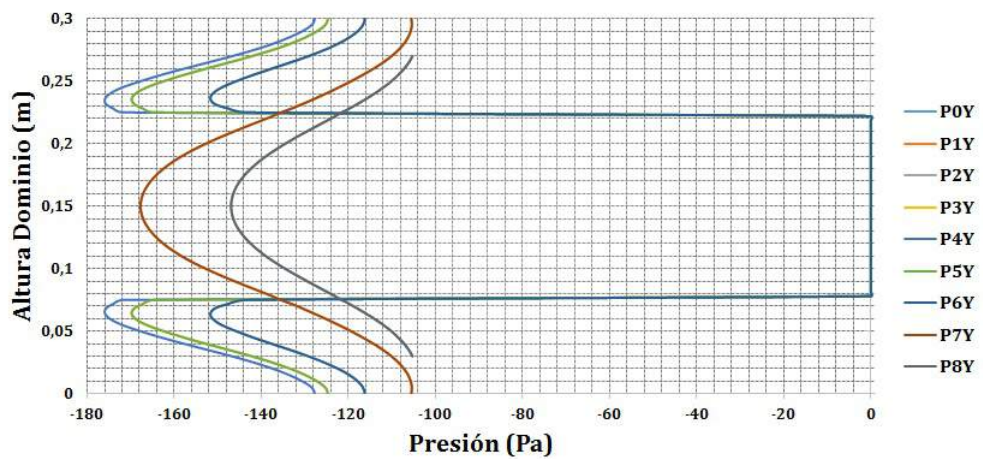


(b) Modelo 15x15.

Figura 3-39.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Presión a lo largo del eje X. Modelos 3x3 y 15x15. 60 Hz.

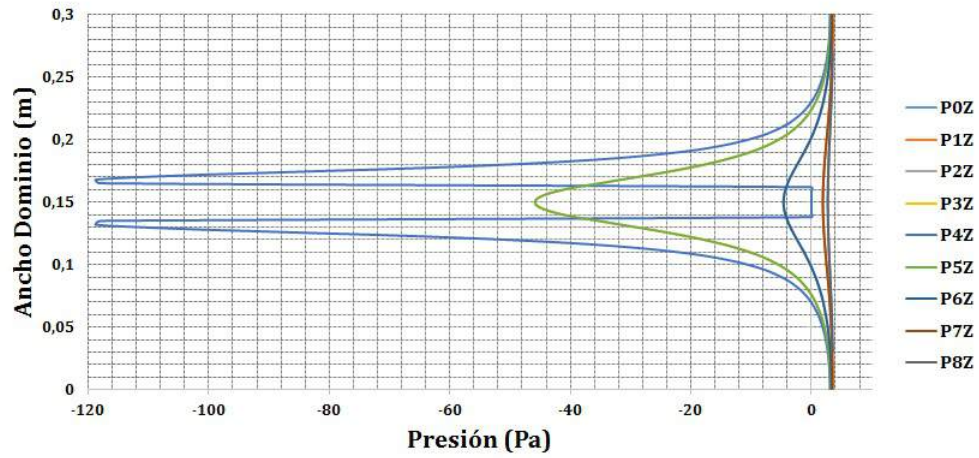


(a) Modelo 3x3.

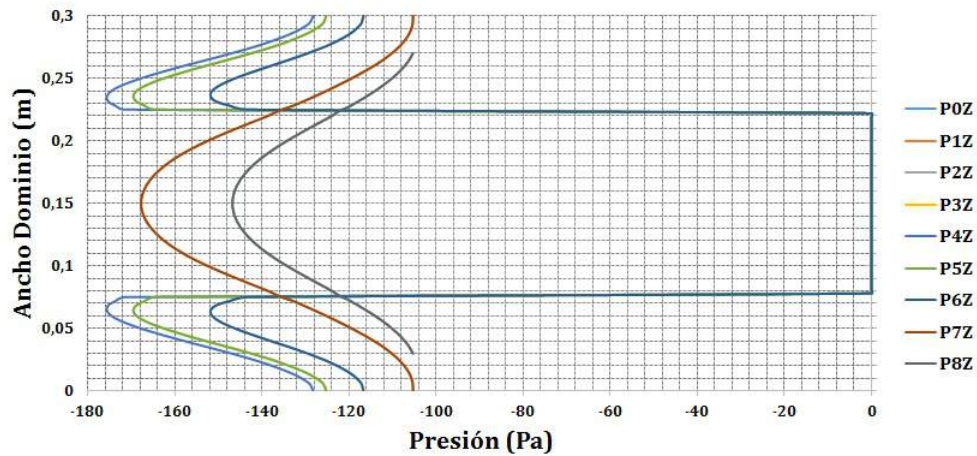


(b) Modelo 15x15.

Figura 3-40.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Presión a lo largo del eje Y. Modelos 3x3 y 15x15. 60 Hz.



(a) Modelo 3x3.



(b) Modelo 15x15.

Figura 3-41.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Presión a lo largo del eje Z. Modelos 3x3 y 15x15. 60 Hz.

Con el fin de determinar que tanto cambian las condiciones de entrada (Punto 0X), respecto a los demás puntos a lo largo del eje X, se presenta la Figura **3-42**. Tal como se había observado previamente en los perfiles de velocidad y presión para los modelos de 3x3 y 15x15, el modelo de 3x3 presenta mejores condiciones de similitud de flujo a lo largo de la sección transversal del dominio, ya que la mayor diferencia entre datos se ubica en las zonas próximas al objeto.

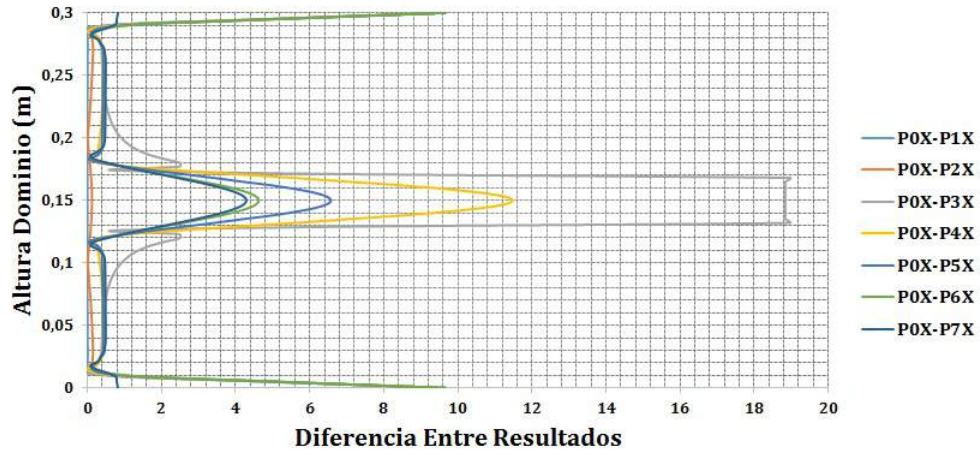
Este Caso no se presenta en los datos del modelo de 15x15, donde se tienen diferencias entre datos entre 20 y 25 unidades en las zonas adyacentes al modelo. Las Figuras **F-9** y **F-10** del Anexo F, presentan la diferencia entre resultados para los modelos restantes a las frecuencias de 6 Hz y 60 Hz.

De igual forma se realiza otro análisis a lo largo del eje X, en donde se monitorea la velocidad y la presión del flujo desde el punto de ingreso hasta el punto de salida dentro del Dominio. En este estudio se varía la altura de las mediciones con el fin de limitar las zonas dentro del Dominio donde se encuentran condiciones de similitud de flujo cuando se tienen los diferentes modelos.

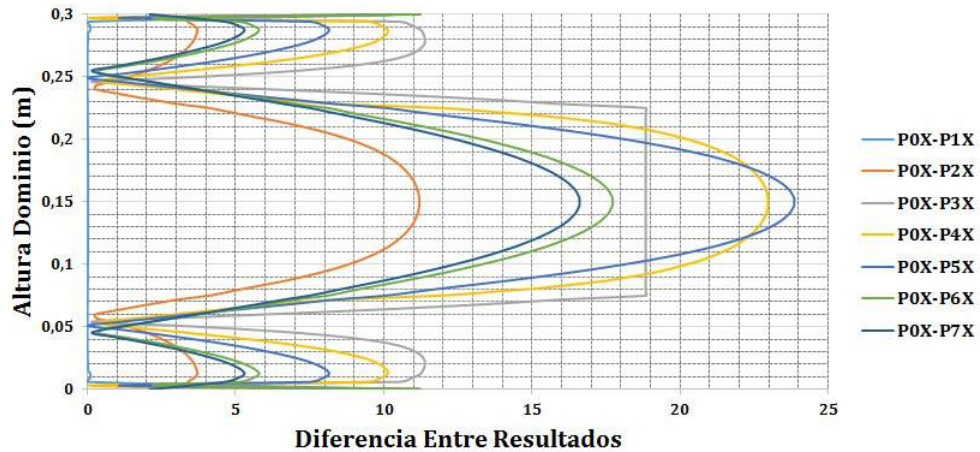
La Figura **3-43** presenta los perfiles de velocidad de los modelos de 3x3 y 15x15 para la frecuencia de 60 Hz. Al comparar ambos perfiles, se evidencia que el modelo de 3x3 presenta condiciones de similitud de flujo en todos los puntos, a excepción de los puntos cercanos a las paredes tanto del modelo como del dominio. Caso que no se evidencia el modelo de 15x15 en donde por acción del volumen ocupado por el modelo, no se permiten tener condiciones de similitud de flujo dentro del Dominio.

Si se observa la Figura **F-20** del Anexo F, el modelo de 5x5 presenta también condiciones de similitud de flujo, lo que indica un límite en la dimensión de sección transversal del objeto, ya que en los perfiles de velocidad del modelo de 10x10 ya se empiezan a evidenciar inconsistencias en cuanto a los datos de velocidad.

Cuando se analizan los perfiles de velocidad para la frecuencia de 6 Hz presentados en la Figura **F-19** del Anexo F, se observa que para los modelos de 3x3 y 5x5, se presentan variaciones de la velocidad en los diferentes puntos a lo largo del dominio, caso contrario a lo observado en los perfiles de velocidad para la frecuencia de 60 Hz. Esto se debe a que el flujo a frecuencias bajas está en régimen transitorio, razón por la cual la velocidad no se mantiene a lo largo del Dominio. Los perfiles de velocidad se hacen más inestables a medida que se aumenta la sección transversal del modelo, corroborando la conclusión dada anteriormente, en donde el volumen del objeto afecta de igual forma las condiciones del flujo al interior del Dominio.

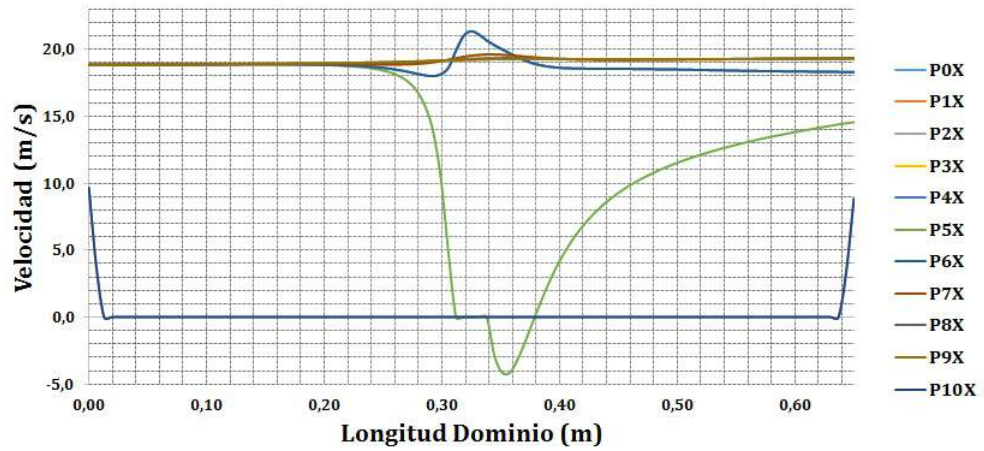


(a) Modelo 3x3.

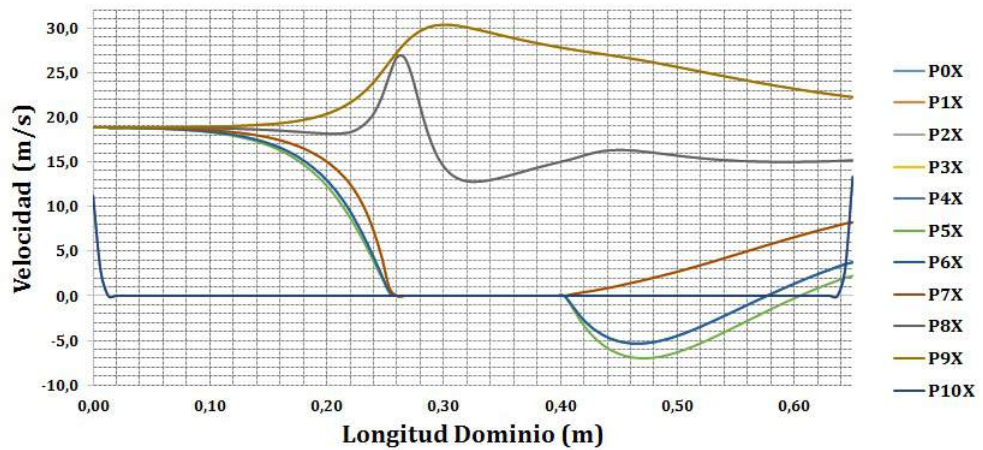


(b) Modelo 15x15.

Figura 3-42.: Estudio Caso de Flujo Externo - Diferencia Entre Resultados Respecto a Datos de Entrada. Eje X. Modelos 3x3 y 15x15. 60 Hz.



(a) Modelo 3x3.



(b) Modelo 15x15.

Figura 3-43.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Velocidad. Análisis Eje X Lateral. Modelos 3x3 y 15x15. 60 Hz.

La Figura **3-44** presenta los perfiles de presión para los modelos de 3x3 y 15x15 a la frecuencia de 60 Hz. Como se observa, al igual que en el caso de los perfiles de velocidad presentados anteriormente, se evidencia que para el modelo de 3x3, el comportamiento de la presión es estable en los puntos ubicados en la zona de ingreso del dominio, a medida que se van acercando al modelo, se generan ciertas perturbaciones por acción de las paredes de este, pero los datos se estabilizan al llegar a los puntos de la salida del dominio.

Para el modelo de 15x15, los datos de presión presentan inconsistencia a lo largo de todos los puntos que recorren el Dominio, razón por la cual este tipo de configuración no permite condiciones de similitud de flujo dentro de este.

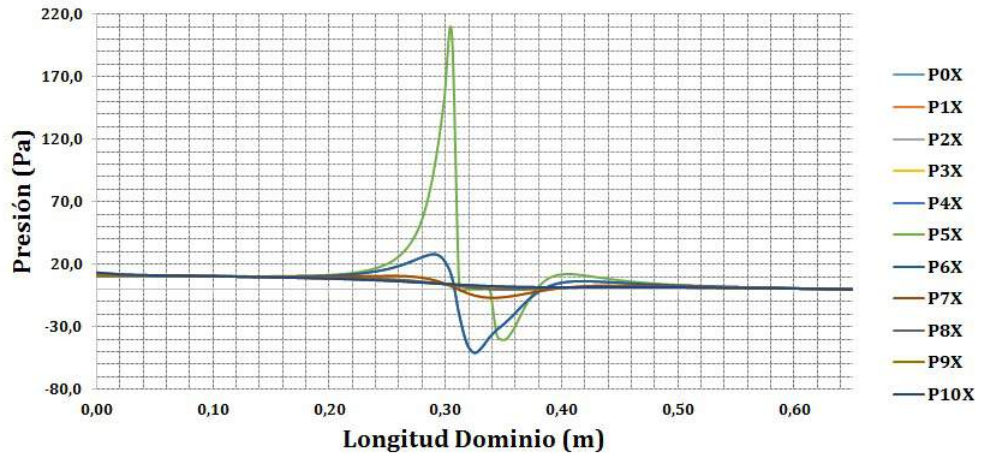
El modelo de 5x5 alcanza a presentar condiciones de similitud de flujo, de igual forma como se establece en el perfil de velocidades, pero a partir del modelo de 10x10, estas condiciones desaparecen por acción del aumento de sección transversal del objeto (Ver Figura **F-22**, Anexo F).

Analizando los perfiles de presión para la frecuencia de 6 Hz (Ver Figura **F-21**, Anexo F), se observa que la presión no presenta condiciones de similitud de flujo, incluso en los modelos de 3x3 y 5x5. Esto se debe al régimen transitorio en el que se encuentra el flujo, razón por la cual se concluye que para el desarrollo de experimentos al interior de la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, es necesario colocar frecuencias en donde el flujo se encuentre en régimen turbulento, es decir que las condiciones de flujo sean estables a lo largo de la zona de pruebas.

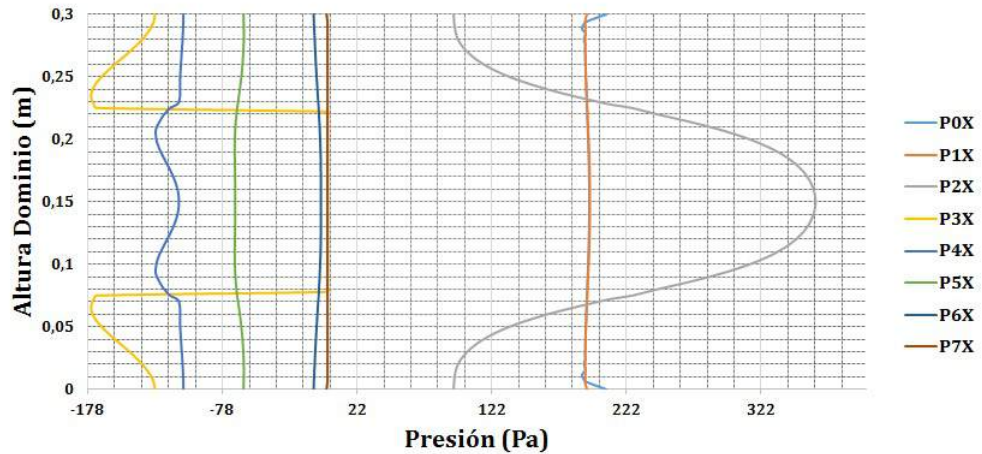
Para finalizar este análisis, se obtienen la diferencia de resultados de los datos de velocidad y presión tomados en los diferentes puntos, respecto a los datos proporcionados por los puntos ubicados en la entrada del Dominio. Esto con el fin de identificar que tanto cambia la velocidad y la presión a medida que el flujo recorre la zona de pruebas.

La Figura **3-45** presenta el diferencia que se tiene respecto a los datos de velocidad de entrada de los modelos 3x3 y 15x15 a la frecuencia de 60 Hz. Como se observa, el modelo 3x3 presenta diferencias menores a 5 unidades en los puntos que se encuentran cerca a las paredes del objeto con diferencias mínimas en los demás puntos, a excepción de las paredes las cuales presentan un tratamiento diferente. El modelo de 15x15 presenta una diferencia entre datos alta, por lo cual se concluye que esta configuración no permite tener condiciones de similitud de flujo dentro del Dominio.

En las Figuras **F-24** y **F-23** del Anexo F, se presenta la diferencia entre resultados para los diferentes modelos a las frecuencias de 6 Hz y 60 Hz.

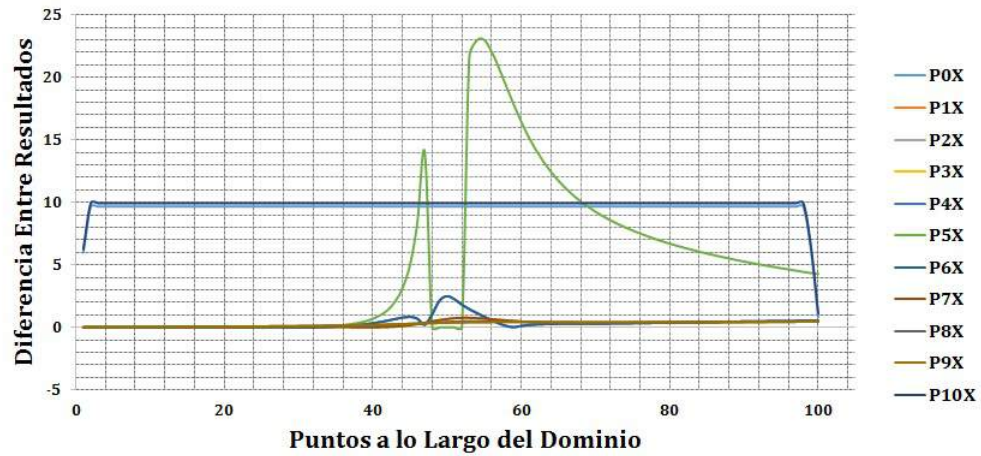


(a) Modelo 3x3.

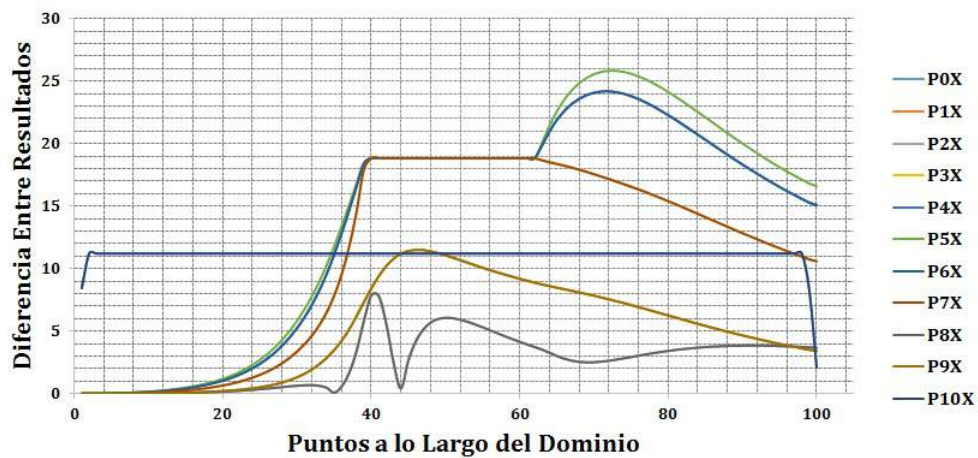


(b) Modelo 15x15.

Figura 3-44.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Presión. Análisis Eje X Lateral. Modelos 3x3 y 15x15. 60 Hz.



(a) Modelo 3x3.



(b) Modelo 15x15.

Figura 3-45.: Estudio Caso de Flujo Externo - Diferencia Entre Resultados Respecto a Datos de Velocidad de Entrada. Análisis Eje X Lateral. Modelos 3x3 y 15x15. 60 Hz.

En el caso de la presión, tal como se observa en la figura **3-46**, la diferencia entre resultados es un poco más alta, en especial en los puntos ubicados en las zonas adyacentes al objeto, para el modelo de 3x3. Sin embargo se presentan condiciones de similitud de flujo en los puntos ubicados en la zona de ingreso del dominio, lo cual permite realizar toma de datos al interior de la zona de pruebas, sin que estos se vean afectados por el efecto de pared.

A medida que se aumenta la sección transversal del modelo (Complementar con Figura **F-26**, Anexo F), se observan diferencias entre resultados de hasta el 400 unidades en los puntos ubicados en las zonas adyacentes al modelo. Razón por la cual se concluye que las dimensiones del objeto de estudio, influyen directamente en las condiciones de similitud de flujo que se quieran tener. La Figura **F-25** del Anexo F, presenta las diferencias entre datos para los diferentes modelos a la frecuencias de 6 Hz.

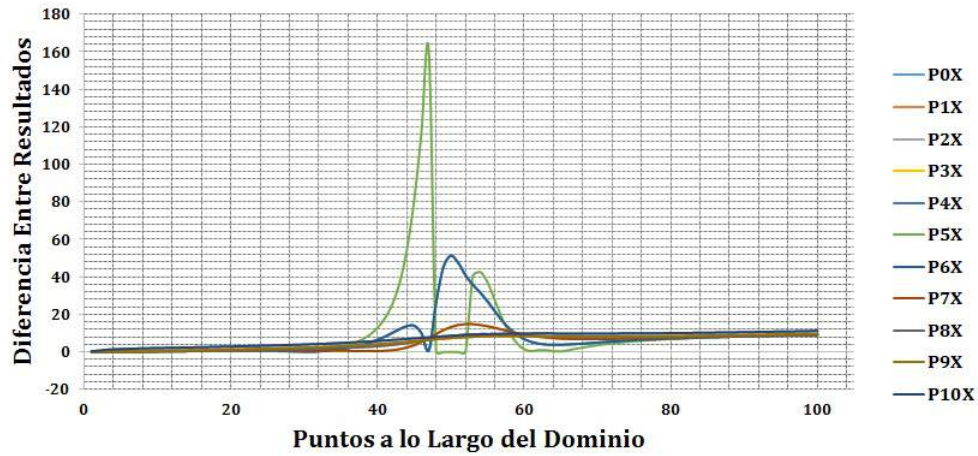
De forma gráfica, tal como se observa en las Figuras **3-47**, **3-48**, **3-49** y **3-50**, se corrobora lo especificado en los resultados presentados anteriormente. El modelo de 3x3 presenta condiciones de similitud de flujo, caso contrario a lo observado en el modelo de 15x15 donde se observan puntos de concentración que no permite condiciones de flujo estables. En el Anexo F, se encuentran las imágenes de las simulaciones para los diferentes modelos a las Frecuencias de 6 Hz y 60 Hz.

Conclusiones Generales

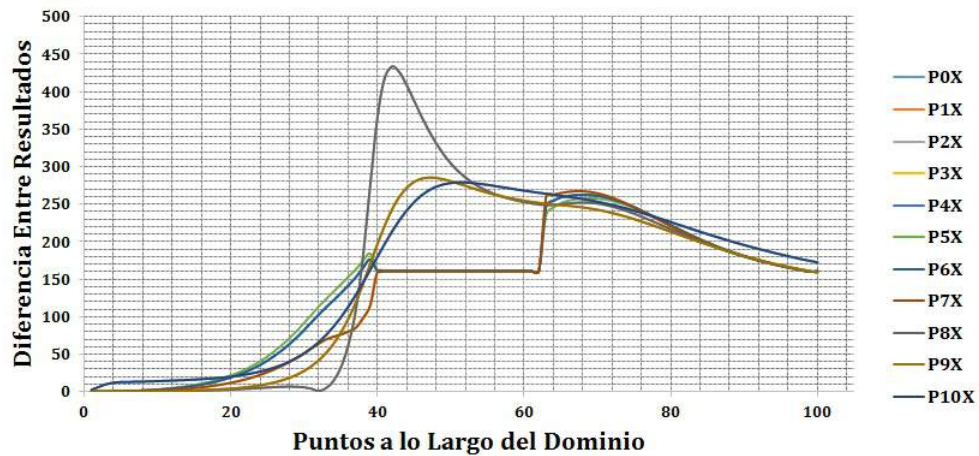
Como conclusión principal se tiene que las dimensiones que posee el modelo influyen directamente en el comportamiento del flujo, dado que el volumen ocupado por este puede permitir o afectar las condiciones de similitud de flujo al interior del Dominio.

De acuerdo a la información brindada por los diseñadores del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, los cuales recomendaban que el modelo no debe superar el 10 % del total de la sección trasnversal de la zona de pruebas, se verifica que efectivamente el modelo de 3x3 (Cuyas dimensiones representan el 10 % del total de la sección transversal de la Zona de Pruebas), permite establecer condiciones de similitud de flujo dentro del Dominio.

De igual forma se evidencia que el modelo de 5x5 también presenta buenos resultados de similitud de flujo al interior del Dominio, por lo cual se toman como límites las dimensiones establecidas para este modelo, ya que los modelos cuya sección transversal es más grande, presentan inconsistencias en los resultados y por lo tanto no permiten condiciones de similitud de Flujo al interior del Dominio.



(a) Modelo 3x3.



(b) Modelo 15x15.

Figura 3-46.: Estudio Caso de Flujo Externo - Diferencia entre Resultados Respecto a Datos de Presión de Entrada. Análisis Eje X Lateral. Modelos 3x3 y 15x15. 60 Hz.

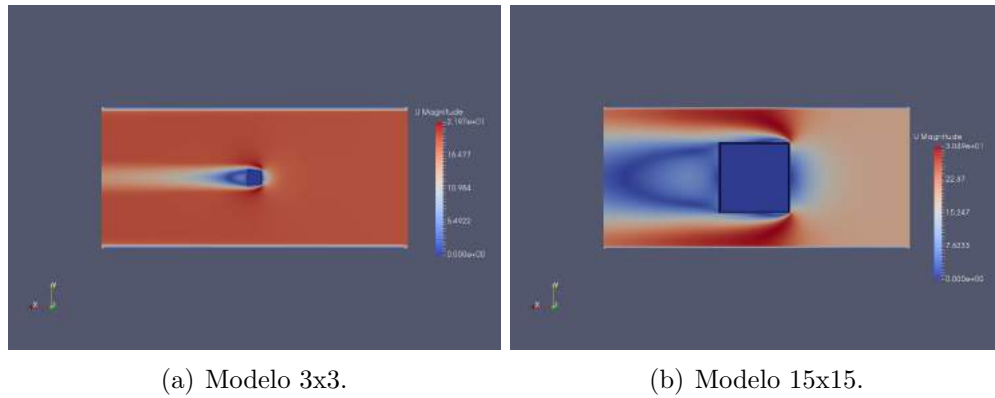


Figura 3-47.: Estudio Caso de Flujo Externo - Imágen Simulación. Velocidad Costado Lateral. Modelos 3x3 y 15x15. 60 Hz.

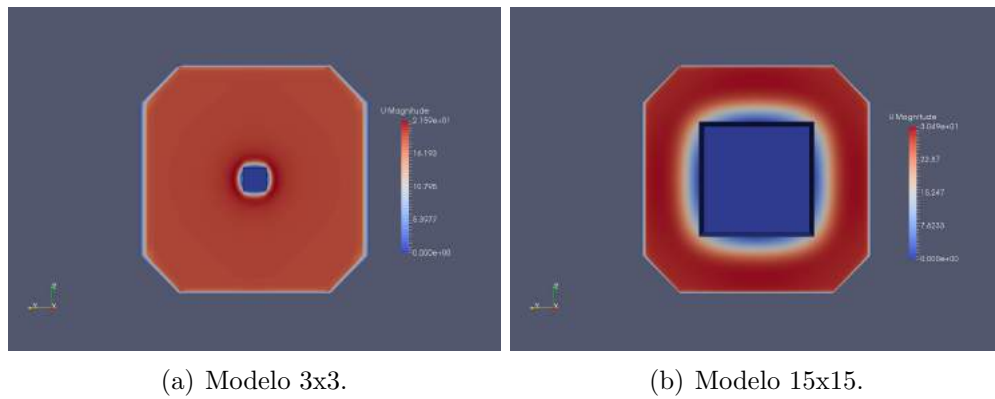


Figura 3-48.: Estudio Caso de Flujo Externo - Imágen Simulación. Velocidad Costado Frontal. Modelos 3x3 y 15x15. 60 Hz.

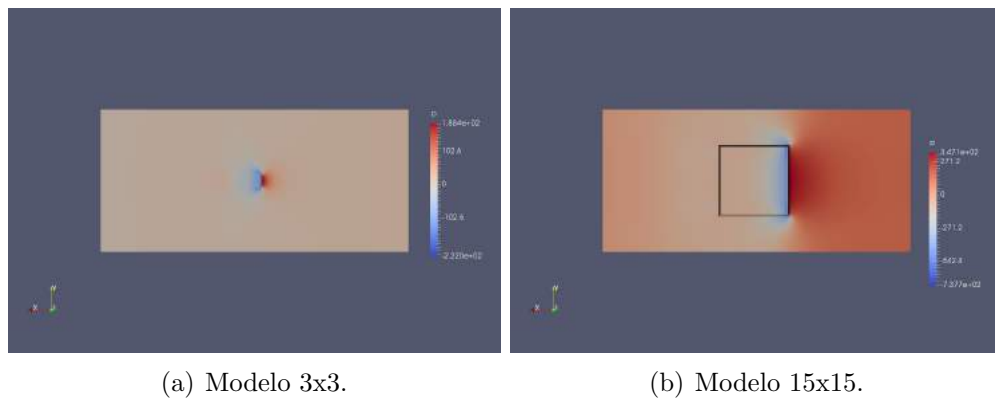
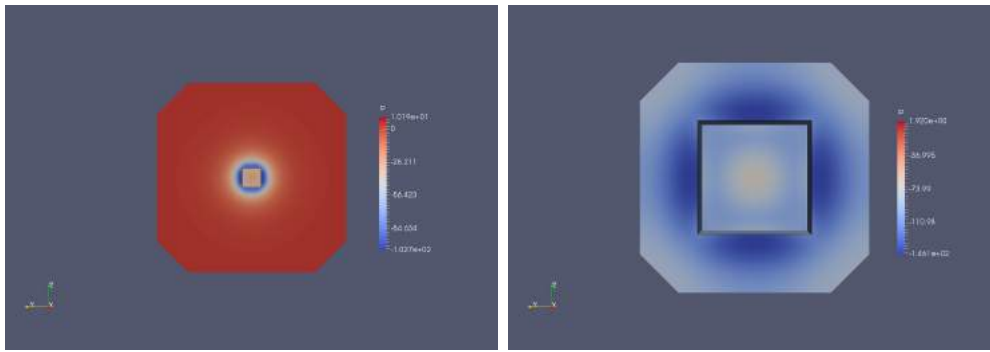


Figura 3-49.: Estudio Caso de Flujo Externo - Imágen Simulación. Presión Costado Lateral. Modelos 3x3 y 15x15. 60 Hz.



(a) Modelo 3x3.

(b) Modelo 15x15.

Figura 3-50.: Estudio Caso de Flujo Externo - Imágen Simulación. Presión Costado Frontal. Modelos 3x3 y 15x15. 60 Hz.

4. PROCESOS DE MANUFACTURA

En el presente capítulo se relacionan todos los procesos de verificación, diseño y manufactura, que tienen lugar en el Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01. Los Anexos N y Ñ presentan las fotografías y los planos de todas las piezas que componen el Banco de Pruebas.

4.1. Evaluación Preliminar

Los procesos de manufactura se hacen con base a una evaluación preliminar realizada en el Banco de Pruebas en donde se analiza su desempeño y requerimientos de operación. La configuración inicial del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 se presenta en la Figura 4-1 con la cual se tiene una velocidad máxima en la zona de pruebas de $16m/s$.

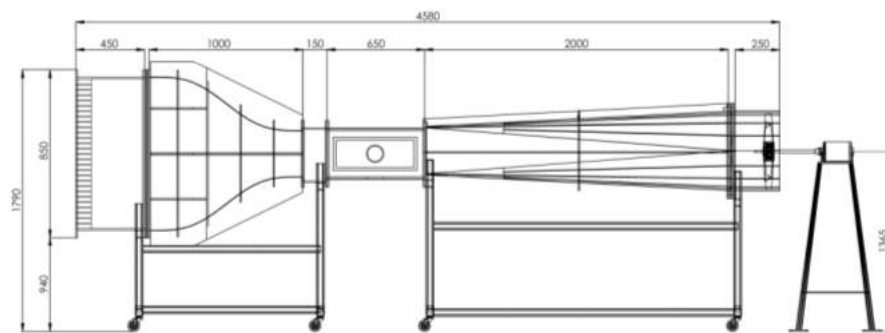


Figura 4-1.: Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01. Diseño Inicial (Cotas en mm).

Como se observa, la sección de potencia está dividida en dos partes, una parte anclada a la estructura del túnel en donde se encuentra el estator que tiene como función soportar el extremo del eje que atraviesa el ventilador; y la otra parte, que es la que soporta el motor y alberga los controles de operación del túnel (Ver Figura 4-2).



Figura 4-2.: Sección de Potencia Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01. Diseño Inicial.

Al momento de evaluar el diseño inicial del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, se registran grandes pérdidas de flujo en las diferentes secciones que lo componen, lo que conlleva a una disminución de la velocidad en la zona de pruebas. De igual forma se evidencian vibraciones a lo largo de la estructura del túnel debido al tipo de montaje presentado en la sección de potencia, además de que no permite el desarrollo de pruebas experimentales con un solo operario, ya que los controles se encuentran alejados de la zona de pruebas.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la evaluación preliminar se establecen los siguientes requerimientos en los cuales se plantean dos modificaciones al diseño inicial y tres implementaciones al conjunto de secciones.

1. Rediseño de sección de potencia.
2. Rediseño de sistema de juntas.
3. Implementación de sistemas de visualización de flujo.
4. Implementación de Sistema de toma de Datos.

A continuación se relacionan los procesos de rediseño y manufactura llevados a cabo en el Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, de acuerdo a los anteriores requerimientos. Para identificar la efectividad de los diseños elaborados se hace un análisis por elementos finitos empleando el software CAD Inventor 2014 ¹ [7] teniendo en cuenta la funcionalidad y el desempeño de los mismos.

4.2. Sistema de Potencia

Para el diseño del sistema de potencia se establecen los siguientes parámetros:

¹Herramienta para el diseño mecánico, documentación y simulación de productos

- Que el sistema sea lo suficientemente estable para que las vibraciones en la sección de potencia se mantengan al mínimo y de esta forma no sean transmitidas al resto de secciones que componen el túnel.
- Que el sistema permita el fácil mantenimiento e intercambio de partes que lo componen (Motor, Malla-zaranda, Eje, Acople flexible, Hélice, Gomas anti-vibración).

De acuerdo a estos parámetros se plantea la modificación de la estructura que sostiene las secciones 6 y 5, de forma que permita la ubicación de los sistemas de control cerca a la zona de pruebas y soporte los esfuerzos que se ejercen cuando el túnel está en funcionamiento. Por medio de este diseño se garantiza la rigidez de la estructura sin tener deformaciones significativas que afecten el movimiento relativo entre piezas, se evita que se generen vibraciones exageradas y no afecta la condición del flujo de trabajo.

La estructura es dimensionada de tal forma que cumple con las limitantes del área de trabajo. La Figura 4-3 presenta el diseño establecido para esta estructura la cual posee 2,419m de largo y 1,293m de alto.

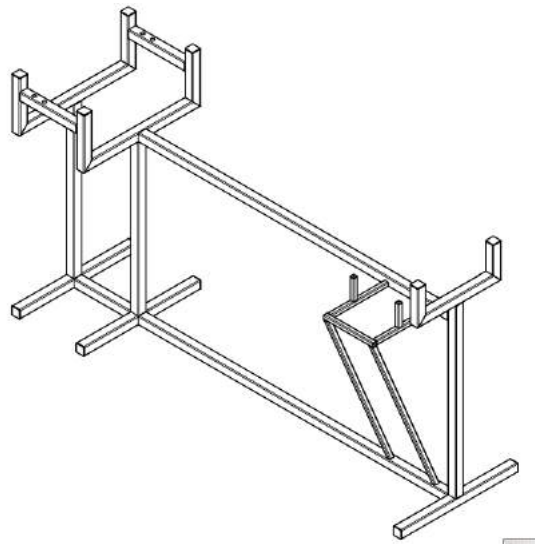


Figura 4-3.: Estructura de Soporte Secciones 5 y 6 Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01. Diseño Final.

La evaluación funcional contempla que la estructura de la sección de potencia soporte el peso de los elementos de las secciones 5 y 6. Inicialmente se realiza un análisis estático de esta y luego se analiza durante el funcionamiento del túnel. Como se observa en la Figura 4-4 la deformación máxima se presenta en la estructura que soporta la sección de potencia, sin embargo dicha deformación no supera los 40 mm de deformación con respecto a la estructura inicial.

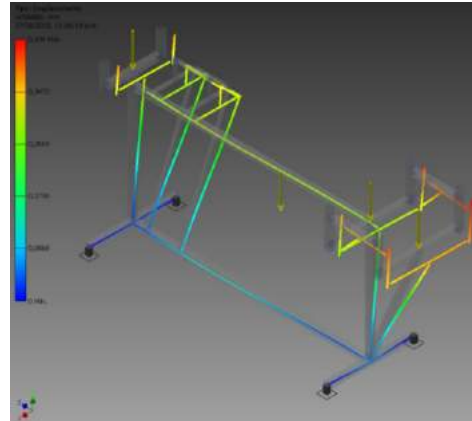


Figura 4-4.: Desplazamiento Estructura de Soporte Secciones 5 y 6 Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

Se emplea Perfil cuadrado ASTM A500 de $2in$ para los anexos a la estructura inicial soldados con electrodo E6010 mediante soldadura por arco eléctrico. La sección de potencia se diseña de forma que el motor se encuentra dentro de la estructura del túnel para evitar pérdidas de flujo. Esta consta de un tambor rolado, dos láminas cuadradas para la presentación con la sección 5, una lámina horizontal que atraviesa el tambor rolado para el soporte del motor, la hélice, el acople, el motor y el sistema de gomas anti-vibración. La Figura 4-5 presenta el diseño establecido para esta sección.

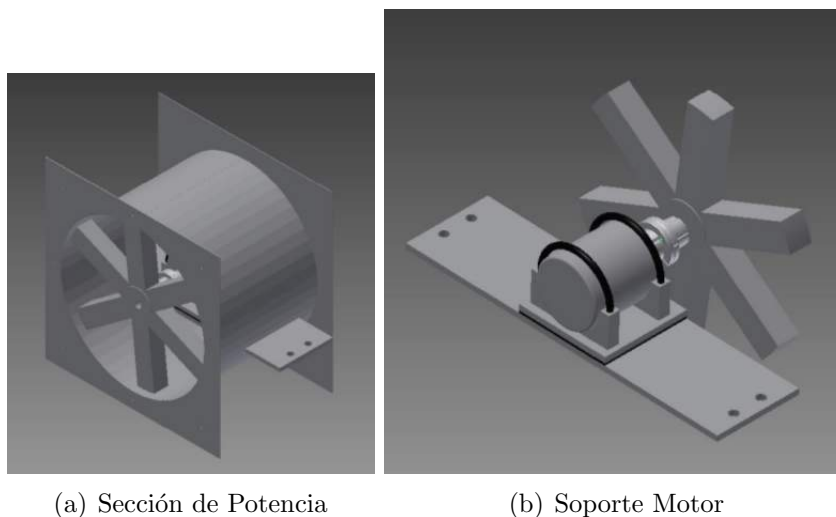


Figura 4-5.: Diseño Sección de Potencia Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01

Para soldar la carcasa del motor se hace uso de electrodo de níquel 100. Se emplea un acople rígido para transmitir el movimiento del motor a la hélice y reducir vibraciones en el conjunto. Se tiene especial cuidado en posicionar el eje de la hélice con respecto al eje central del Túnel de Viento, la hélice se ubica a $5mm$ de la malla que separa el difusor con

la sección de potencia, con el fin de incrementar la succión de aire. La Figura 4-6 presenta la sección de potencia final ensamblada al Túnel de viento.

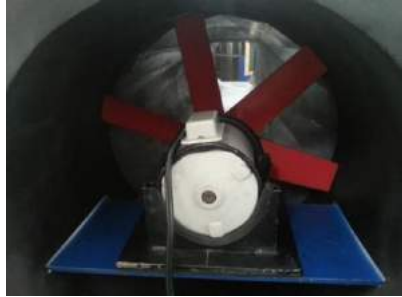


Figura 4-6.: Sección de Potencia Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

4.3. Sistema de Juntas

Para el diseño del sistema de juntas se establecen los siguientes requerimientos:

- El sistema debe garantizar el empalme de todas las secciones que componen el túnel, haciendo posible el montaje y desmontaje de cada una de ellas.
- El sistema debe evitar filtraciones del flujo de trabajo, es decir la junta debe compactar generando cierre entre las secciones asociadas.
- El sistema debe evitar desniveles a la hora del empalme en las diferentes secciones, por lo cual las juntas se deben alinear con las secciones con el fin de que no se presente un cambio de sección brusco que puedan alterar la condición del flujo de trabajo.

El material empleado para el sistema de juntas es CAUCHO NATURAL de 10 mm de espesor. Su selección se hace con base a las propiedades de resistencia a la rotura, a la compresión y a la abrasión. En la Tabla 4-1 se relacionan las especificaciones técnicas del material.

PROPIEDAD	CARACTERÍSTICAS
Color	Negro
Tipo de polímero	Caucho Natural
Dureza	60/65 – Shore A
Densidad	1,49g/cm ³
Temperatura operativa	-20 °C a 70 °C
Carga a rotura	4MPa
Resistencia a desgarro	12N/mm
Resistencia a la abrasión	480mm ³
Deformación máxima	43%

Tabla 4-1.: Especificaciones Técnicas Caucho Natural. Sistema de Juntas

El sistema de juntas planteado consta en 4 elementos para cada unión, la cantidad de uniones modificadas son 3, la restante es ajustada conservando el diseño inicial. El sistema de junta se une con silicona gris la cual presenta buenas propiedades de adherencia permitiendo fijar completamente la junta a la pared lo que aumenta la fuerza de la unión, además, es ideal para empalmes donde es necesario evitar fugas.

Por medio de modelamiento CAD se verifica el ajuste que tiene la junta entre cada sección y la tolerancia aproximada que se tiene al realizar el montaje. La Figura 4-7 muestra la vista lateral del ensamble del sistema de juntas en la sección de pruebas, en color negro se indican las juntas y en rojo los elementos del túnel.

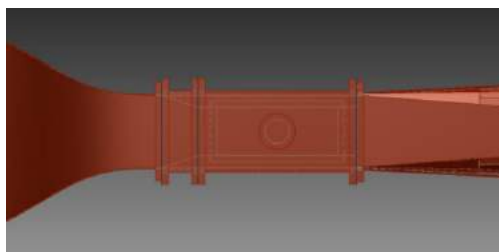


Figura 4-7.: Sistema de Juntas Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01. Vista lateral.

La Figura 4-8 muestra como queda la junta cuando esta se adhiere a la cara frontal de la sección de pruebas.

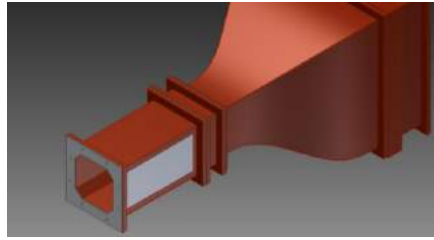


Figura 4-8.: Sistema de Juntas Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01. Vista en isométrico.

Se hace un acercamiento (Ver Figura 4-9) en donde se mide la diferencia entre la cara de la sección y la cara de la junta. El valor obtenido es de $0,455\text{mm}$ el cual se considera aceptable dentro del rango de tolerancia entre secciones (Diferencia entre secciones de 2mm).

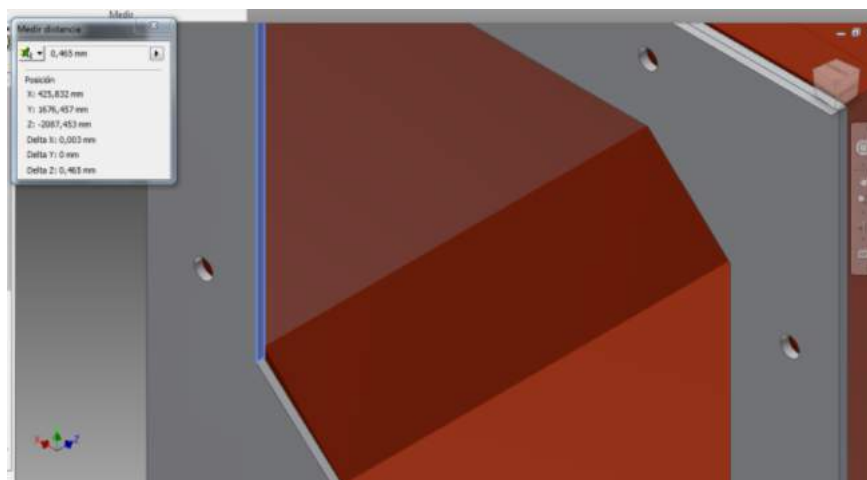


Figura 4-9.: Sistema de Juntas Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01. Tolerancia.

En la Tabla 4-2 presenta los cálculos para la presión ejercida por un tornillo M12 x 1.75

Diámetro Nominal	12	mm
Paso	1.75	-
Área Resistencia	84.266	m^2
Par Apriete	42	N.m
Fa	150,796	N
Presión	1.78951753	MPa
Presión Total	10.7371052	MPa

Tabla 4-2.: Cálculos de Presión Sistema de Juntas

Se genera una malla con tamaño medio de 0.1 para cada elemento a un ángulo de 60° (Ver Figura 4-10).

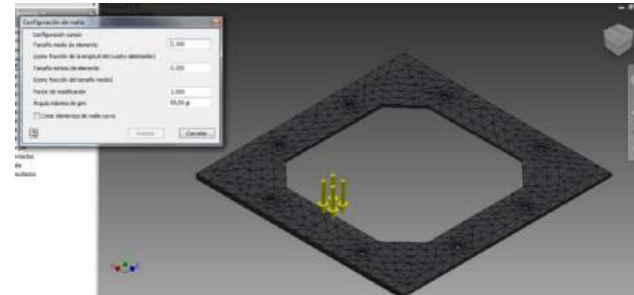


Figura 4-10.: Sistema de Juntas Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01. Malla.

De acuerdo con los cálculos presentados en la Tabla 4-2, la carga de presión que ejercen 6 tornillos es de $10,73\text{MPa}$, sin embargo debido a que la mayoría de secciones estas hechas de madera, el análisis se realiza con una presión de 8MPa . Las carga es aplicada al 100% y al 10% sobre la junta. La Figura 4-11 presenta los desplazamientos obtenidos en las puntas de la Junta, se obtienen valores máximos de $0,00135\text{mm}$ y $0,000308\text{mm}$ en la parte interna.

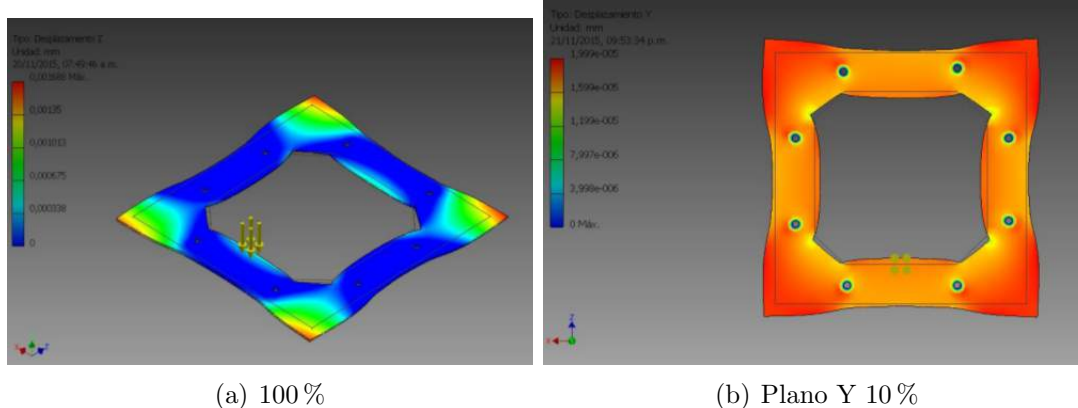


Figura 4-11.: Desplazamientos (mm)

Los mayores esfuerzos sobre la junta se encuentran entre las uniones de los tornillos con un valor de 5.8MPa (Ver Figura 4-12).

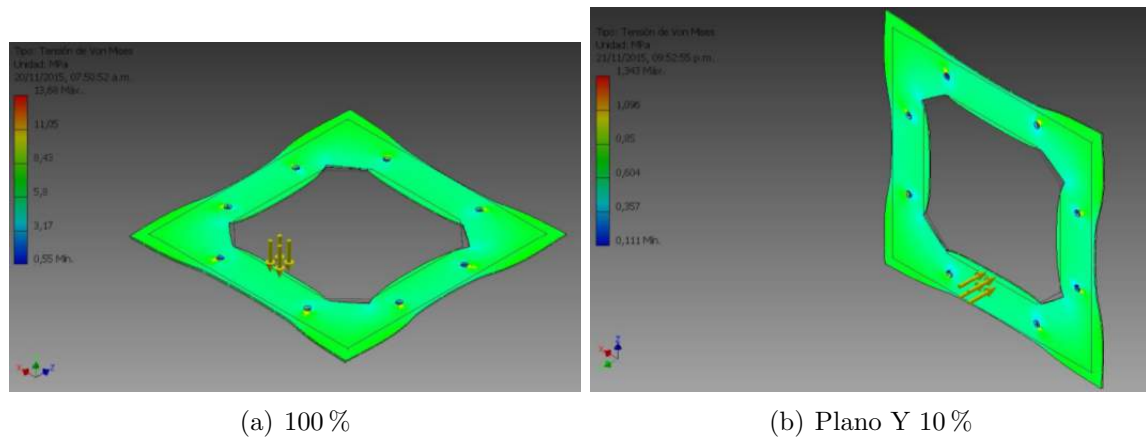


Figura 4-12.: Esfuerzo de Von Misses

Los valores obtenidos son aceptables ya que con una tolerancia inferior a 0.05 mm el nivel de las superficies de la junta no es perceptible al tacto, además de que el sobre salto generado no produce perturbaciones significativas en el Túnel.

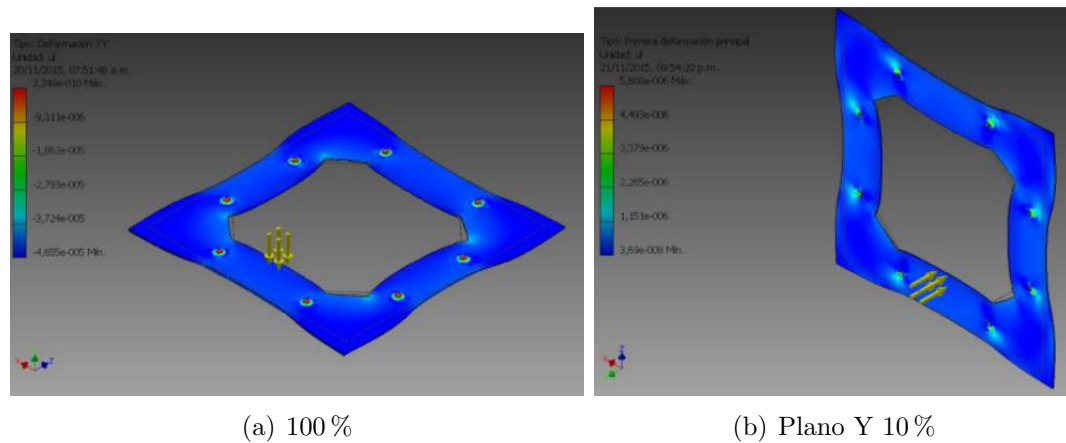
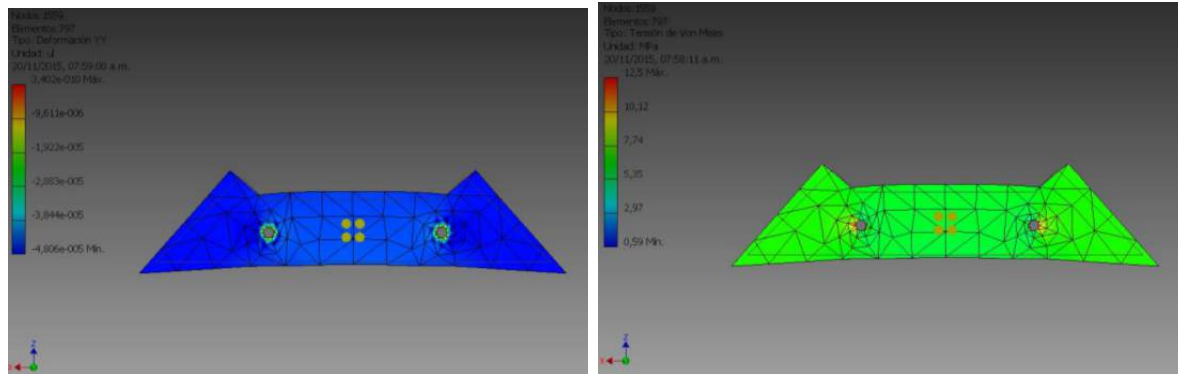


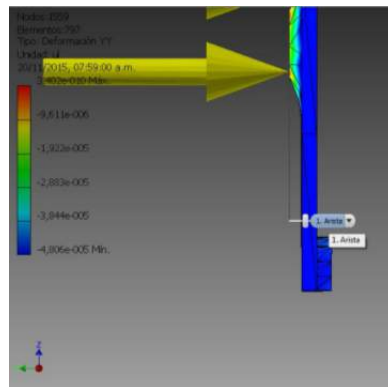
Figura 4-13.: Deformación YY

Se analiza de forma individual el elemento que conforma a la junta con el fin de determinar si la silicona empleada permite tener buen ajuste sin pérdidas en la forma de esta. Se determina que la junta tiende a deformarse en el centro con un valor menor a 0.05 mm el cual es aceptable en el rango de tolerancias dado para el Túnel (Ver Figura 4-14).



(a) Deformación en el centro de la junta

(b) Von Misses



(c) Deformación YY

Figura 4-14.: Análisis pieza individual de junta

La fabricación de los empaques para las juntas se hace de manera artesanal cortando por medio de una plantilla los 4 elementos necesarios para formar la unión, el corte se hace con una cuchilla fina que permita tanto precisión como calidad estética de cada elemento. La Figura 4-15 presenta el producto final.

**Figura 4-15.:** Sistema de Juntas Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

4.4. Sistema de Visualización de Flujo

Uno de los sistemas principales con el que debe contar un Túnel de Viento es el sistema de visualización de flujo. Este permite observar los patrones y líneas de flujo en un montaje determinado con el fin de establecer el comportamiento y características del modelo cuando se pone en contacto con el flujo de aire. Con esto en mente se procede a diseñar y construir un sistema de visualización de flujo que se ajuste a las características del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

Para el diseño del sistema de visualización de flujo, el cual se compone de dos secciones, Generador de Humo y Sistema de iluminación, se establecen los siguientes requerimientos:

Generador de Humo:

- **Movible:** El sistema debe ser versátil y que permita movilidad.
- **Fácil Mantenimiento:** El sistema debe permitir acceso a todos los componentes para mantenimiento preventivo y correctivo.
- **Flujo Constante:** El Generador de Humo debe contener un sistema de linealización que permita un flujo constante a lo largo de la sección transversal de la zona de pruebas y evite formación de vórtices a la salida del ducto. De igual forma debe asegurar que la velocidad y presión de salida del humo sean constantes.
- **Conexión sin Fugas:** El Generador de Humo debe garantizar una conexión sellada entre el sistema de generación de humo y el sistema de linealización. Se debe evitar fugas y goteos no deseados tanto en la superficie del Túnel como en la parte interna de la zona de pruebas.

Sistema de iluminación:

- **No Interferencia:** El Sistema de Iluminación debe ubicarse de forma tal que no altere el flujo de aire.
- **Control Externo:** Los controles de la iluminación deben estar ubicados en el panel de control del Túnel de Viento. Esta ón se especifica respetando la intención general que se tiene para el banco de pruebas, de que pueda ser operado por una sola persona.
- **Contraste:** El Sistema de Iluminación debe generar un efecto de contraste entre el humo y el tono mate de la superficie interna de la zona de pruebas del Túnel de Viento. Este contraste es el que permite la visualización de líneas de flujo en los montajes experimentales.

- **Ubicación:** Debido a la configuración que posee la zona de pruebas y dado que se tienen dos puntos de acceso para modelos en esta, el Sistema de Visualización debe garantizar la iluminación completa de todos los puntos que abarca la zona de pruebas sin afectar el flujo.

De acuerdo a las especificaciones dadas anteriormente se presenta a continuación los procesos de diseño y construcción para las dos secciones que componen el sistema de visualización de flujo del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

4.4.1. Sistema de Visualización de Flujo - Generador de Humo

El diseño del Generador de Humo parte de un sistema de generación de humo que se encuentra disponible en el mercado, razón por la cual los elementos diseñados se deben adaptar a las especificaciones del equipo. Se tiene dos limitantes importantes en el diseño, la primera es que la línea de conducción principal del sistema de distribución en la zona de acople debe asegurar un diámetro de 10 milímetros con una rosca de paso fino de 0,75 milímetros. La segunda es que debido a las pérdidas por conducción y dado el hecho de que en la salida de la caldera del generador de humo se tiene vapor saturado, se presenta condensación en las paredes del tubo. Por esta razón, en la parte final del sistema de distribución es necesario acoplar una válvula de esfera que se encargue de evacuar el condensado una vez se use el Generador de Humo.

A partir de las especificaciones anteriores se empieza con el modelado de las dimensiones del Generador de Humo. En la Figura 4-16 se presentan las dimensiones generales con las que cuenta la zona interior de la zona de pruebas, de acuerdo a estas medidas se determina las dimensiones de línea de conducción principal del tubo de distribución.

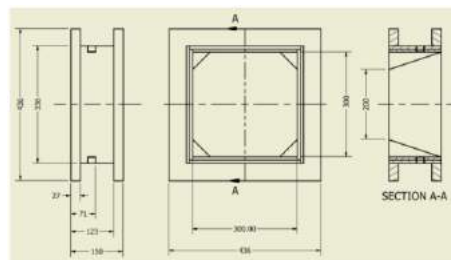


Figura 4-16.: Generador de Humo - Dimensiones Zona de Conexión.

Con el fin de permitir una instalación rápida y un fácil acceso a todos los componentes del generador de Humo, se deja un espacio de 30mm (Cota A, Figura 4-17) entre la superficie superior del Túnel y la zona más baja de la caldera, tal como se muestra en la Figura 4-17.

La pieza señalada como **1**, representa el tubo de conducción principal.

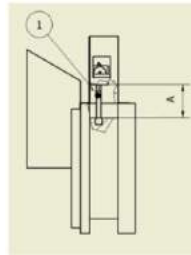


Figura 4-17.: Generador de Humo - Montaje Sistema de Generacion de Humo.

Una de las restricciones espaciales que se impone ante el diseño de la carcasa del Generador de humo es la de los marcos externos de la *Settling Chamber 2*. Como se observa en la Figura 4-18, estos marcos son usados como los elementos sujeción de la carcasa, por lo cual el ancho máximo que puede tener es de 185mm . Con el fin de generar una sujeción mecánica rígida en el diseño de la carcasa, se especifica una longitud máxima de 436mm para esta.

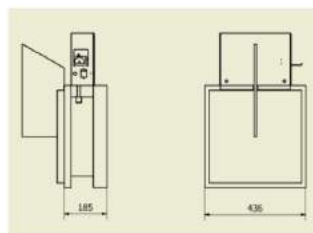


Figura 4-18.: Generador de Humo - Restricciones Espaciales Generador de Humo.

El Generador de Humo posee dos puntos de acople con el Túnel de Viento tal como se muestra en la Figura 4-19. El primero es en la zona donde se encuentran las aletas de la carcasa, su función es generar la presión necesaria sobre las paredes con las que están en contacto, para restringir los grados de libertad de la carcasa. La presión de sujeción es producida por el eje de la carcasa.

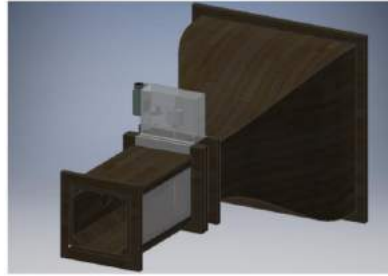


Figura 4-19.: Generador de Humo - Puntos de Acople Generador de Humo al Túnel de Viento.

En la Figura 4-20 se puede observar el detalle de la aleta sobre la pared del Túnel de Viento. El agujero mostrado presenta la ubicación donde van acoplados los eje de la carcasa, estos se sujetan con tuercas que transmiten la fuerza necesaria para mantener el Generador de Humo sin movimiento.

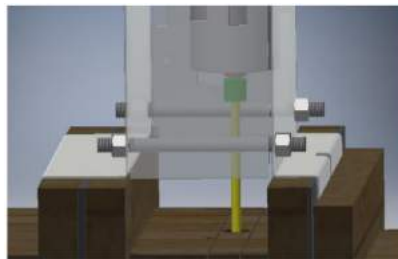


Figura 4-20.: Generador de Humo - Detalle Zona de Sujeción del Generador de Humo al Túnel de Viento.

El segundo punto de Acople se encuentra en las paredes superior e inferior de la *Settling Chamber 2* en donde se sujeta el tubo de conducción principal. Debido a que se requieren altas temperaturas para mantener el vapor en la línea de conducción principal, es necesario aislar térmicamente las paredes del Túnel de Viento para evitar daños en la madera. Para esto se diseña un tapon en bronce al cual se ajusta un *O-Ring* que sella el sistema. Este permite sujetar el tubo de conducción principal y permite la inserción de Tomas Estáticas cuando se requiera. La Figura 4-21 muestra el diseño del acople que sujeta el tubo de conducción principal a lo largo de *Settling Chamber 2*. En las Figuras 4-22 y 4-23 se presenta el mecanizado de los Tapones para la zona de Pruebas.

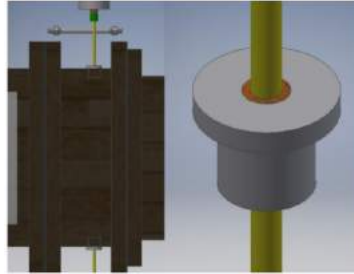


Figura 4-21.: Generador de Humo - Detalle Acople del Tubo de Conducción Principal al Túnel de Viento.



Figura 4-22.: Generador de Humo - Acople Generador de Humo al Túnel de Viento.



Figura 4-23.: Generador de Humo - Acople Generador de Humo con implementación de *O-Ring* .

El proceso de generación de humo es evaluado en base a un modelo computacional realizado en Autodesk-CFD ² [8]. Como se observa en la Figura 4-24, el flujo se expande tomando una forma cónica a medida que sale de los agujeros. Esto evidencia la necesidad de tener en cuenta el cono de expansión cuando se realizan las pruebas en el Generador de Humo, ya

²Software que provee Herramientas para simulaciones termodinámicas y de dinámica computacional de fluidos

que puede generar un mezclado indeseado y por consiguiente un flujo no linealizado.

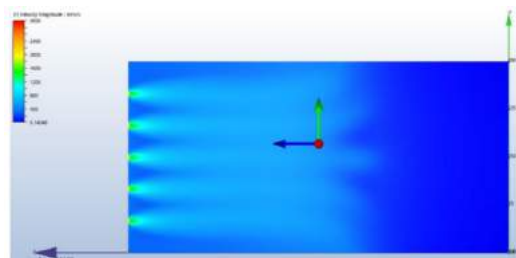


Figura 4-24.: Generador de Humo - Simulación Salida de Vapor Tubo de Conducción Principal.

Es de anotar que mientras haya flujo de vapor desde la caldera hacia el ducto, el fenómeno se mantiene en un estado estable. Debido a que el vapor sale de la caldera en condiciones de vapor saturado, es inevitable tener cierta cantidad de condensado a medida que se usa el Generador de Humo. Por esta razón, es recomendable instalar una válvula al final tubo de conducción de la línea principal para depositar el condensado y retirarlo del sistema una vez culmine la prueba.

4.4.2. Sistema de Visualización de Flujo - Sistema de Iluminación

El diseño del sistema de iluminación se enfoca en encontrar la mejor distribución de los elementos dentro de la zona de pruebas Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, sin interferir con el flujo de aire dentro de esta. Después de realizar una evaluación preliminar de la posición de las luces y de acuerdo a los requerimientos dados anteriormente, se decide emplear los ángulos de 45° dispuestos en la pared frontal de la zona de pruebas para la posición de las luces (Pared señalada en color azul, Figura 4-25).

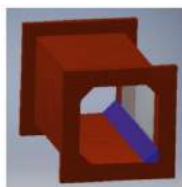


Figura 4-25.: Sistema de Iluminación - Ubicación Sistema de Iluminación Túnel de Viento.

Con el fin de crear un alojamiento para las luces, se diseña un ranurado en las paredes de la zona de pruebas tal como se muestra en la Figura 4-26.

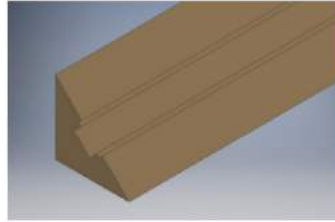


Figura 4-26.: Sistema de Iluminación - Geometría Ranurado Alojamiento Luces.

Una vez instaladas las luces en el alojamiento, este se sella con una tapa de acrílico que se coloca a ras de la superficie de la zona de pruebas con el fin de que evitar el contacto del sistema de iluminación con el flujo de aire, y de esta forma, mantener las condiciones de flujo sin que se generen puntos generadores de turbulencia (Ver Figura 4-27).

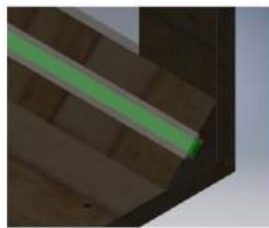


Figura 4-27.: Sistema de Iluminación - Selle del Sistema de Iluminación en la Zona de Pruebas.

Con el fin de que las luces no irradien directamente al usuario y abarquen completamente la zona de pruebas, se establecen puntos de iluminación solo en los laterales adyacentes a la pared de acrílico. En la Figura 4-28 se presenta el diseño y la ubicación del Sistema de Iluminación en la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.



Figura 4-28.: Sistema de Iluminación - Ensamble Sistema de Iluminación en Zona de Pruebas.

Uno de los requerimientos dados para el Sistema de Iluminación es el de emplear un tipo de luz que genere contraste. Para esto se desarrollaron una serie de pruebas con el fin de observar el tipo de luz mas apropiado para los montajes experimentales. Para esto se emplearon luces LED de color Amarillo, Azul, Rojo y Verde (Ver Figura 4-29).

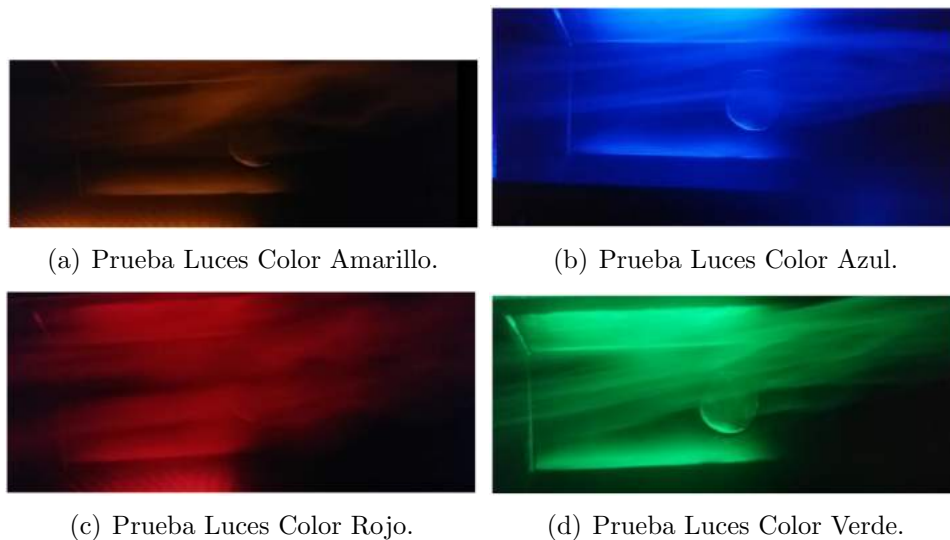


Figura 4-29.: Sistema de Iluminación - Pruebas Contraste de Luz

Como se puede observar en las imágenes, los colores que mejor generan contraste son el Azul y el Verde, sin embargo, realizando un *Benchmarking* del tipo de luces empleadas en otros túneles de viento, se toma el color Verde como el color de luz para el Sistema Iluminación del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

Para aumentar la claridad y la versatilidad de este sistema y de acuerdo a las pruebas realizadas, se opta por ubicar dos líneas de luces en cada una de las ranuras de las paredes de la zona de pruebas para un total de 4 líneas de iluminación. Cada una de las líneas esta conectada de forma independiente a Switches, de esta forma se permite al usuario controlar que luces se encuentran encendidas de acuerdo a las condiciones que este requiera para la prueba. Las configuraciones que permite el Sistema de Iluminación varían entre sólo iluminación inferior, sólo superior, completa con las 4 líneas de luces o parcial con 2 (una arriba y una abajo).

Para evitar problemas de fugas, perturbaciones en el flujo e interferencias en las condiciones del aire, se dejan fijos los acrílicos que cubren los canales de luces. Sin embargo el diseño de los canales permite fácil acceso al sistema de iluminación para propósitos de mantenimiento tanto correctivo como preventivo, o en caso de que se requiera cambiar el tipo de luces para pruebas determinadas.

4.5. Sistema de Toma de Datos

El sistema de toma de datos se compone de tres subsistemas, el sistema de tomas estáticas dispuesto a lo largo de la Zona de Pruebas y la *Settling Chamber 2*, el sistema de tomas para ingreso de instrumentos los cuales se ubican en la Zona de Pruebas, y por último,

el Multimanómetro de Presión construido para mediciones de diferencial de presión en el Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

4.5.1. Sistema de Toma de Datos - Tomas Estáticas

Este sistema se compone de doce tomas estáticas ubicadas sobre la línea central de la pared superior y la pared inferior de la Zona de Pruebas. La Figura 4-30 presenta el modelado de las tomas estáticas, la pieza esta compuesta por un buje en bronce de un cuarto de pulgada de diámetro externo y 1 mm de diámetro interno. A este buje va incrustado un tubo de acero inoxidable el cual posee un diámetro de $1,3\text{ mm}$ que permite el acople con las mangueras.

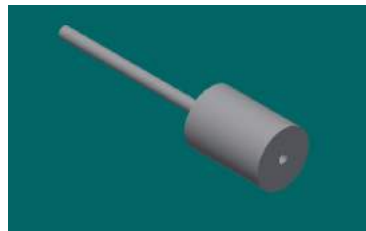


Figura 4-30.: Sistema de Toma de Datos - Modelado Tomas Estáticas.

Las tomas que se ubican en el buje de conexión del Generador de Humo, se acoplan mediante *O-Rings* para sellar el sistema. La Figura 4-31 presenta las piezas finales empleadas para las tomas estáticas.



(a) Pieza Mecanizada Tomas Estáticas.

(b) Pieza Mecanizada Tomas Estáticas con *O-Ring*

Figura 4-31.: Sistema de Toma de Datos - Pieza Ensamblada Tomas Estáticas.

4.5.2. Sistema de Toma de Datos - Tomas Ingreso de Instrumentos

El Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 cuenta con cuatro punto de ingreso para instrumentos, dos ubicados en la pared superior de la Zona de Pruebas y dos ubicados en la pared inferior. La Figura 4-32 presenta el modelado de las Tomas de ingreso de los instrumentos,

estas se componen de un buje en bronce de media pulgada de diámetro con un ámetro interno de 9,5 mm.

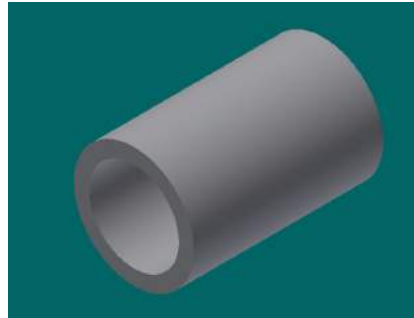


Figura 4-32.: Sistema de Toma de Datos - Modelado Tomas Ingreso de Instrumentos.

Se emplean tapones neumáticos para sellar el sistema cuando no se este haciendo uso de las Tomas. La Figura 4-33 presenta las piezas mecanizadas que componen la Toma.



(a) Tapon Neumático



(b) Pieza Mecanizada Tomas Ingreso de Instrumentos



(c) Ensamble Tomas Ingreso de Instrumentos con Tapon Neumático

Figura 4-33.: Sistema de Toma de Datos - Pieza Ensamblada Tomas Ingreso de Instrumentos.

4.5.3. Sistema de Toma de Datos - Multimanómetro de Presión

El multimanómetro de presión dispuesto para el Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, se ubica en la estructura de soporte de la sección de potencia a $4,5\text{ cm}$ de los controles de mando, sus dimensiones generales son de $76,5\text{ cm} \times 76,4\text{ cm}$. Su diseño permite la ubicación en serie de 20 tubos de vidrio de 6 mm de diámetro o 18 tubos de vidrio con espacio para la ubicación de un Manómetro de Tubo en U. La Figura 4-34 presenta el modelado del Multimanómetro de Presión.

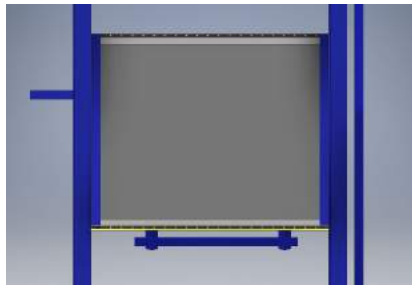


Figura 4-34.: Sistema de Toma de Datos - Modelado Multimanómetro de Presión.

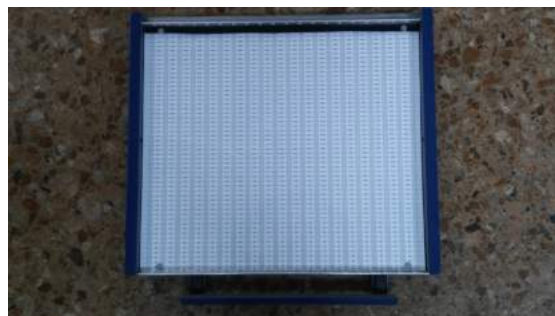
Las Figuras 4-35 y 4-36 presentan las fotografías del proceso de construcción y el ensamble final al Túnel de Viento.



(a) Base Manómetro Vista Delantera



(b) Base Manómetro Vista Posterior



(c) Manómetro con Adaptación de Regleta

Figura 4-35.: Sistema de Toma de Datos - Multimanómetro de Presión Proceso de Ensamble.



(a) Manómetro

(b) Manómetro Montaje Completo

Figura 4-36.: Sistema de Toma de Datos - Multimanómetro de Presión Ensamble en Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

5. PRUEBAS DE LABORATORIO

Los parámetros de operación de un Túnel de Viento se establecen de acuerdo a la estabilidad de la corriente de aire que se genera al interior de este. Para definir las condiciones que caracterizan esta corriente se deben conocer las distribuciones de presión, presión dinámica, velocidad y temperatura en la zona de pruebas que es el lugar de estudio.

El rango de velocidades con que opera un Túnel de Viento permite definir el Número Reynolds que caracteriza la corriente de aire y permite establecer las condiciones de flujo para el desarrollo de pruebas experimentales. Estas velocidades se rigen por la diferencia de presiones existentes a lo largo del sistema ya que al incrementar la Frecuencia en el motor, se genera una diferencia de presiones por la acción de la succión que ejerce la hélice sobre la corriente de aire.

Con el fin de identificar las características de la corriente de aire que se genera al interior del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, y por consiguiente establecer los parámetros de operación de este, se presenta el capítulo a continuación en donde se relacionan los conceptos, procesos de calibración, desarrollo de pruebas experimentales y pruebas de visualización de flujo propuestos para el presente proyecto de investigación.

5.1. Marco Teórico

Los conceptos relacionados a continuación establecen las ecuaciones y metodología empleada en el desarrollo de pruebas experimentales y procesamiento de datos para definir los parámetros de operación que se presentan en el Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

Se parte de la base en donde se establece que el fluido que transita al interior del sistema es de tipo incompresible en régimen subsónico, por lo cual se toman los principios físicos que influyen en el comportamiento del flujo de aire.

5.1.1. Marco Teórico - Ecuación de Bernoulli

Para examinar las fuerzas que actúan sobre una partícula determinada dentro de una línea de corriente, es necesario hacer uso de la Ecuación de Bernoulli. Esta es una de las ecuaciones fundamentales de la aerodinámica en donde describe la dinámica del campo de flujo [45].

Se deriva de la ecuación de momento, por lo tanto es un enunciado de la segunda ley de Newton para un flujo incompresible, inviscido en el cual no actúan fuerzas de cuerpo. Sin embargo, las dimensiones que se obtienen son de energía por unidad de volumen, por lo tanto, la ecuación de Bernoulli es también una relación de la energía mecánica en un flujo incompresible. Esta se define como:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho g z_2 = \text{const} \quad (5-1)$$

En donde g es la aceleración gravitacional, z_1 y z_2 son las alturas o elevaciones sobre el plano de referencia de los puntos 1 y 2 en la línea de corriente y p_1 , p_2 , V_1 y V_2 son las presiones y velocidades para cada punto.

En un Túnel de viento subsónico el aire entra a un contractor el cual posee un área A_1 , la corriente de aire ingresa con una presión p_1 y una velocidad V_1 , el contractor converge a un área más pequeña A_2 que es la zona de pruebas, haciendo que la velocidad se aumente a una velocidad V_2 y la presión disminuya a una presión p_2 . Después de pasar por la zona de pruebas, la corriente de aire se dirige a una sección divergente llamada difusor el cual posee un área A_3 , en donde la velocidad disminuye a una velocidad V_3 y la presión aumenta a una presión p_3 , lo que permite relacionar las presiones en varios puntos del túnel de viento mediante la Ecuación 5-2.

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 = p_3 + \frac{1}{2}\rho V_3^2 \quad (5-2)$$

5.1.2. Marco Teórico - Presión

El término presión denota la fuerza normal por unidad de área que se ejerce sobre una superficie por acción de la rata de tiempo o cambio de momento de las moléculas de gas que impactan sobre dicha superficie [5]. La presión en un punto determinado de un fluido se define como:

$$p = \lim \left(\frac{dF}{dA} \right) \quad dA \rightarrow 0 \quad (5-3)$$

De acuerdo a la Ecuación de Bernoulli (Ver Ecuación 5-2), el significado físico que tiene es que a medida que se incrementa la velocidad, la presión decrece y cuando la velocidad disminuye, la presión aumenta [45], principio fundamental que se observa en un túnel de viento subsónico.

Tipos de Presión

■ Presión absoluta

Se define como presión absoluta a la presión que se mide de acuerdo a un punto de referencia [2].

■ Presión Estática

Se define como presión estática a la presión que ejerce un fluido sin movimiento la cual es uniforme en todas las direcciones [2].

■ Presión Dinámica

La presión dinámica representa la disminución de la presión debido al incremento de la velocidad en el fluido [45], esta se define como:

$$q_{\infty} = \frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 \quad (5-4)$$

En un flujo incompresible la presión dinámica tiene un significado especial ya que se representa como la diferencia entre la presión absoluta y la presión estática.

$$q_{\infty} = p_0 - p_{\infty} \quad (5-5)$$

■ Presión Atmosférica

La presión atmosférica es la presión producida por el peso de la atmósfera que rodea la tierra, esta desciende a medida que se aumenta la altitud, cambia de acuerdo a los cambios climáticos que se generen[2].

Manómetro

Dispositivo empleado para medir diferencial de presiones. Consta de un tubo de vidrio en forma de U el cual alberga un líquido cuya densidad es conocida, la diferencia de alturas se mide por medio de una escala incrustada al dispositivo. El plano definido por las líneas centrales del tubo, se puede variar con el fin de adicionar sensibilidad a las mediciones.

La diferencia de presiones esta relacionada directamente con la diferencia de alturas que presenta el líquido en ambos extremos del tubo. Esta diferencia se puede describir mediante la relación de equilibrio hidrostático presentada en la Ecuación 5-6, en donde Δh es la diferencia de alturas en las columnas de agua, β es el angulo presente entre el plano horizontal y el plano paralelo a los tubos del manómetro, ρ_f corresponde a la densidad del fluido en el

manómetro y ρ_a es la densidad del aire en la mayoría de aplicaciones en Túneles de viento, pero puede corresponder a la densidad del fluido que llena la otra parte del manómetro [11].

$$p_2 - p_1 = \Delta h \sin \beta g_l (\rho_f - \rho_a) \quad (5-6)$$

En la Ecuación 5-6, g_l describe la aceleración gravitacional local la cual se calcula por medio de la Ecuación 5-7, esta es necesaria debido a que la gravedad local varía de acuerdo a la ubicación del punto en la tierra (Latitud φ) y la altitud (H) a la que este se encuentra.

$$g_l = 9,780327 [1 + 0,0053024 \sin^2 \varphi + 0,0000058 \sin^2 (2\varphi)] - 0,000003086H \quad (5-7)$$

En túneles de viento subsónicos, uno de los instrumentos que más se emplea para realizar mediciones de diferencial de presión es el manómetro de tubo. Este permite obtener lecturas con un mayor grado de precisión ya que su funcionamiento es de tipo análogo, por lo cual se emplea para calibrar y revisar otros instrumentos. Existen tres factores fundamentales que pueden limitar e influyen en la precisión y adquisición de los datos. Estos son la lectura de las columnas que depende de la destreza de quien este tomando los datos para realizar la medición, la precisión en el dato de la densidad y uniformidad que posee el líquido, y por último, la presencia de otras fuerzas diferentes a la de la aceleración gravitacional, tal como la tensión de superficie, que puede influir en el comportamiento del líquido. Sin embargo existen varios métodos para reducir el porcentaje de error que generan estos factores, por lo cual se pueden obtener buenas lecturas a partir de este instrumento [11].

Coefficiente de Presión

Es un coeficiente que permite representar los datos de presión y velocidad de forma adimensional [5], este se puede definir mediante las siguientes ecuaciones.

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{q_\infty} \quad (5-8)$$

$$C_p = \frac{p_\infty - p_0}{p_a - p_0} \quad (5-9)$$

En flujo incompresible C_p se puede expresar en términos de solo velocidad tal como se presenta en la siguiente ecuación.

$$C_p = 1 - \left(\frac{V}{V_\infty} \right)^2 \quad (5-10)$$

5.1.3. Marco Teórico - Temperatura

Las propiedades de los fluidos son críticas cuando se trabaja con operaciones que conciernen a desarrollo experimental o pruebas de dispositivos. Estas propiedades cambian dependiendo de las condiciones ambiente en las que se desarrolle el procedimiento, por esta razón es importante monitorear parámetros como temperatura, presión atmosférica, humedad relativa y saturación de vapor.

Usualmente cuando se trabaja con aire se toman como principios bases las condiciones ambiente estándar, pero con el fin de obtener datos precisos y verdaderos de velocidad, densidad y viscosidad, necesarios para calcular el Número de Reynolds y realizar el cálculo de coeficientes aerodinámicos, se deben monitorear a lo largo del desarrollo de la pruebas las condiciones ambiente.

Densidad

La Ecuación 5-11 permite calcular la densidad del aire en función de la Temperatura (T °K), presión (p Pa), humedad relativa (R_h) y presión de saturación de vapor de agua efectiva (e_s) [11].

$$\rho_a = \left(\frac{0,0034847}{T} \right) (p - 0,003796 R_h e_s) \quad (5-11)$$

La presión de saturación de vapor de agua efectiva (e_s) esta relacionada con la temperatura tal como se expresa en la Ecuación 5-12.

$$e_s = (1,7526 \times 10^{11}) e^{(-5315,56/T)} \quad (5-12)$$

Ley de Sutherland

Establece la relación de la variación de la viscosidad dinámica μ respecto a la temperatura [11], esta relación se expresa como:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T_K}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_0 + S}{T_K + S} \quad (5-13)$$

Donde $T_0 = 273,15K$, $\mu_0 = 1,716 \times 10^{-5} \text{ Kg/ms}$ y $S = 110,4K$ denominado como la temperatura de Sutherland.

5.1.4. Marco Teórico - Tubo Pitot-Estático

Un Tubo Pitot-Estático es un dispositivo que permite medir presión total, o denominada también como presión de cabeza, y presión estática en una corriente de aire. En la Figura 5-1 se presenta un Tubo Pitot-Estático estándar, como se puede observar, el orificio A sensa la presión total $p + \frac{1}{2}\rho V^2$ y el orificio B sensa la presión estática.

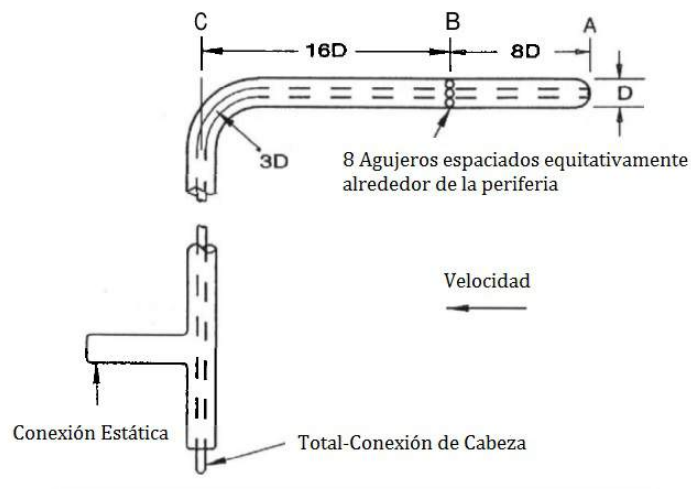


Figura 5-1.: Marco Teórico - Tubo Pitot-Estático [11]

Si las presiones de ambos orificios se conectan a un manómetro o un transductor de presión, el diferencial de presión será aproximadamente $\frac{1}{2}\rho V^2$, a partir de lo anterior se puede calcular la velocidad si se cuenta con el dato de la densidad, esta se calcula empleando la ecuación 5-11.

5.1.5. Marco Teórico - Visualización de Flujo

Se consideran dos amplias categorías para visualización de flujo, la primera es la categoría de visualización de flujo de superficie y la segunda es la categoría de visualización de flujo de campo. Entre los métodos correspondientes a la visualización de flujo directa sobre la superficie del modelo (visualización de flujo de superficie), se encuentran el método de hilo, flujo de aceite, puntos de tinta, arcilla china y cristales líquidos. En cuanto a la visualización de flujo cuyos métodos no se aplican sobre la superficie del modelo (visualización de flujo de campo), se encuentran la inyección de humo, burbujas de helio y los llamados *Streamers* [11].

Para el caso pertinente al Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 el cual posee un Generador de Humo adaptando para la configuración que este presenta, se amplia el marco teórico acerca de esta técnica de visualización de flujo.

Humo

Es el método de visualización de flujo más empleado después del método de hilos, el cual se puede producir de diferentes maneras siempre y cuando el humo sea direccionado. En la mayoría de túneles de viento de gran escala, se usa una vara de liberación para direccionar el humo directamente sobre el modelo. La cámara posee una bomba y un sistema de calentamiento para convertir el combustible en humo, este tipo de equipos emplean Polietileno de Glicol como combustible. En la Figura 5-2 se puede observar el Generador de Humo del Tunel de Viento Glenn L. Martin.



Figura 5-2.: Marco Teórico - Generador de HUmo con Vara de liberacion usando en el Tunel de Viento Glenn L. Martin [11].

Los filamentos de humo permiten encontrar localizaciones claves de puntos de estancamiento. De igual forma puede mostrar fácilmente que tan extensas son las regiones de separación de capa límite y el tamaño de las burbujas de separación. El humo también puede mostrar las características del recorrido de los vórtices de bordes de ataque o figuras geométricas.

Es necesario contar con fuentes de luz de contraste para observar las líneas de humo. Estas pueden complementarse con luces estroboscópicas para caso en donde se necesite sincronizar el período del fenómeno que se este estudiando.

5.2. Diseño de Experimentos Pruebas Experimentales

Se establecen 6 tipos de pruebas experimentales las cuales abarcan el total de experimentos requeridos para el presente trabajo de investigación, estos se presentan en la Figura 5-3.



Figura 5-3.: Diseño de Experimentos - Esquema Pruebas Experimentales

Cada uno de estos estudios posee diferentes factores potenciales de diseño que se emplean para determinar el número de experimentos a desarrollar por cada prueba, como lo que se busca es identificar los parámetros de operación del Túnel de Viento, la Frecuencia de Operación es el factor en particular que se emplea en todas las pruebas experimentales.

5.2.1. Diseño de Experimentos Pruebas Experimentales - Rango de Velocidad a lo Largo del Tiempo

1. **Problema de Investigación:** Verificar el comportamiento de la velocidad a lo largo del tiempo en el centro de la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.
2. **Parámetros Variables Controlables del Experimento:** Frecuencia del Variador (Hz).
3. **Parámetros Variables No Controlables del Experimento:** Presión Atmosférica ($mmHg$), Humedad Relativa ($\% R_H$), Temperatura ($^{\circ}C$).
4. **Parámetros Fijos de la Simulación:** Ubicación del Instrumento ($150mm$ desde la parte inferior de la zona de pruebas), Dimensiones de la zona de pruebas ($0,30m \times 0,30m \times 0,65m$), Instrumento empleado (Tubo Pitot-Estático).
5. **Parámetros a Medir:** Velocidad (m/s).
6. **Factores:**
 - **Factor A:** Frecuencia del Variador (Hz).
7. **Niveles:**
 - **Factor A:** 12 Niveles (6, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60).
8. **Número de Réplicas:** Se establece un tiempo de muestreo de $300s$ donde se toman datos cada $5s$.

8. Número de Experimentos Requeridos: 12.

FACTORES	NOMBRE FACTOR	NIVEL	NOMBRE NIVEL
1	Frecuencia Variador (Hz)	12	6
			10
			15
			20
			25
			30
			35
			40
			45
			50
			55
			60

Tabla 5-1.: Diseño de Experimentos - Rango de Velocidad a lo Largo del Tiempo.

5.2.2. Diseño de Experimentos Pruebas Experimentales - Perfil de Velocidad

1. **Problema de Investigación:** Obtener los perfiles de velocidad para el rango de Frecuencias de operación del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.
2. **Parámetros Variables Controlables del Experimento:** Frecuencia del Variador (Hz), Ubicación del Instrumento (Toma 1, Toma 2).
3. **Parámetros Variables No Controlables del Experimento:** Presión Atmosférica ($mmHg$), Humedad Relativa ($\% R_H$), Temperatura ($^{\circ}C$).
4. **Parámetros Fijos de la Simulación:** Puntos de Medición (Ver Anexo G, Sección G.1), Dimensiones de la zona de pruebas ($0,30m \times 0,30m \times 0,65m$), Instrumento empleado (Tubo Pitot-Estático).
5. **Parámetros a Medir:** Velocidad (m/s).
6. **Factores:**
 - **Factor A:** Frecuencia del Variador (Hz).

- **Factor B:** Ubicación del Instrumento.

7. Niveles:

- **Factor A:** 12 Niveles (6, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60).
- **Factor B:** 2 Niveles (Toma 1, Toma 2).

8. Número de Réplicas: 3.

8. Número de Experimentos Requeridos: 72.

		Factor A											
		6	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Factor B	Toma 1	T1-6	T1-10	T1-15	T1-20	T1-25	T1-30	T1-35	T1-40	T1-45	T1-50	T1-55	T1-60
	Toma 2	T2-6	T2-10	T2-15	T2-20	T2-25	T2-30	T2-35	T2-40	T2-45	T2-50	T2-55	T2-60

Tabla 5-2.: Diseño de Experimentos - Perfil de Velocidad

5.2.3. Diseño de Experimentos Pruebas Experimentales - Perfil de Presión

1. **Problema de Investigación:** Obtener los perfiles de presión para el rango de Frecuencias de operación del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.
2. **Parámetros Variables Controlables del Experimento:** Frecuencia del Variador (Hz), Ubicación del Instrumento (Toma 1, Toma 2).
3. **Parámetros Variables No Controlables del Experimento:** Presión Atmosférica ($mmHg$), Humedad Relativa ($\% R_H$), Temperatura ($^{\circ}C$).
4. **Parámetros Fijos de la Simulación:** Puntos de Medición (Ver Anexo G, Sección G.1), Dimensiones de la zona de pruebas ($0,30m \times 0,30m \times 0,65m$), Instrumento empleado (Tubo Pitot-Estático).
5. **Parámetros a Medir:** Presión (Pa).
6. **Factores:**
 - **Factor A:** Frecuencia del Variador (Hz).
 - **Factor B:** Ubicación del Instrumento.
7. **Niveles:**
 - **Factor A:** 12 Niveles (6, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60).

- **Factor B:** 2 Niveles (Toma 1, Toma 2).

8. Número de Réplicas: 3.

8. Número de Experimentos Requeridos: 72.

		Factor A											
		6	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Factor B	Toma 1	T1-6	T1-10	T1-15	T1-20	T1-25	T1-30	T1-35	T1-40	T1-45	T1-50	T1-55	T1-60
	Toma 2	T2-6	T2-10	T2-15	T2-20	T2-25	T2-30	T2-35	T2-40	T2-45	T2-50	T2-55	T2-60

Tabla 5-3.: Diseño de Experimentos - Perfil de Presión

5.2.4. Diseño de Experimentos Pruebas Experimentales - Distribución de Presión

1. **Problema de Investigación:** Verificar la distribución de presión en las tomas estáticas ubicadas en la *Settling Chamber 2* y la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.
2. **Parámetros Variables Controlables del Experimento:** Frecuencia del Variador (Hz).
3. **Parámetros Variables No Controlables del Experimento:** Presión Atmosférica (*mmHg*), Humedad Relativa ($\% R_H$), Temperatura ($^{\circ}C$).
4. **Parámetros Fijos de la Simulación:** Puntos de Medición (Ver Anexo G, Sección G.2), Dimensiones de la zona de pruebas ($0,30m \times 0,30m \times 0,65m$), Dimensiones de la *Settling Chamber 2* ($0,30m \times 0,30m \times 0,15m$), Instrumento empleado (Multimanómetro de Presión a 30°).
5. **Parámetros a Medir:** Presión Estática (Pa).
6. **Factores:**
 - **Factor A:** Frecuencia del Variador (Hz).
7. **Niveles:**
 - **Factor A:** 12 Niveles (6, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60).
8. Número de Réplicas: 3.
8. Número de Experimentos Requeridos: 36.

FACTORES	NOMBRE FACTOR	NIVEL	NOMBRE NIVEL
1	Frecuencia Variador (Hz)	12	6
			10
			15
			20
			25
			30
			35
			40
			45
			50
			55
			60

Tabla 5-4.: Diseño de Experimentos - Distribución de Presión.

5.2.5. Diseño de Experimentos Pruebas Experimentales - Mapa de Presión

1. **Problema de Investigación:** Verificar el comportamiento de la presión a lo largo del centro de la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, en las coordenadas X y Y.
2. **Parámetros Variables Controlables del Experimento:** Frecuencia del Variador (Hz), Ubicación del Instrumento (Coordenadas X y Y).
3. **Parámetros Variables No Controlables del Experimento:** Presión Atmosférica ($mmHg$), Humedad Relativa ($\% R_H$), Temperatura ($^{\circ}C$).
4. **Parámetros Fijos de la Simulación:** Puntos de Medición (Ver Anexo G, Sección G.1 para los puntos de la Coordenada Y y G.3 para los puntos de la Coordenada X), Dimensiones de la zona de pruebas ($0,30m \times 0,30m \times 0,65m$), Instrumento empleado (Tubo Pitot-Estático).
5. **Parámetros a Medir:** Presión Total (Pa).
6. **Factores:**
 - **Factor A:** Frecuencia del Variador (Hz).

- **Factor B:** Ubicación del Instrumento.

7. Niveles:

- **Factor A:** 12 Niveles (6, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60).
- **Factor B:** 2 Niveles (Coordenada X, Coordenada Y).

8. Número de Réplicas: 3.

8. Número de Experimentos Requeridos: 72.

		Factor A											
		6	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Factor B	Coordenada X	X-6	X-10	X-15	X-20	X-25	X-30	X-35	X-40	X-45	X-50	X-55	X-60
	Coordenada Y	Y-6	Y-10	Y-15	Y-20	Y-25	Y-30	Y-35	Y-40	Y-45	Y-50	Y-55	Y-60

Tabla 5-5.: Diseño de Experimentos - Mapa de Presión

5.2.6. Diseño de Experimentos Pruebas Experimentales - Caso de Flujo Externo

A continuación se relaciona el diseño de experimentos para dos estudios que se realizan en los Cilindros Rectangulares, perfil de velocidad y distribución de presión.

Perfil de Velocidad

1. **Problema de Investigación:** Obtener el perfil de velocidad para la zona comprendida entre la superficie del Cilindro Rectangular y la pared superior de la Zona de Pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.
2. **Parámetros Variables Controlables del Experimento:** Frecuencia del Variador (Hz), Dimensiones del Cilindro Rectangular (Ancho, Alto, Largo).
3. **Parámetros Variables No Controlables del Experimento:** Presión Atmosférica ($mmHg$), Humedad Relativa ($\% R_H$), Temperatura ($^{\circ}C$).
4. **Parámetros Fijos de la Simulación:** Puntos de Medición (Ver Anexo G, Sección G.4 Subsección G.4.1), Dimensiones de la zona de pruebas ($0,30m \times 0,30m \times 0,65m$), Instrumento empleado (Tubo Pitot-Estático).
5. **Parámetros a Medir:** Velocidad (m/s).
6. **Factores:**

- **Factor A:** Frecuencia del Variador (Hz).
- **Factor B:** Dimensiones del Cilindro.

7. Niveles:

- **Factor A:** 12 Niveles (6, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60).
- **Factor B:** 9 Niveles (5x5, 5x10, 5x15, 10x5, 10x10, 10x15, 15x5, 15x10, 15x15).

8. Número de Réplicas: 3.

8. Número de Experimentos Requeridos: 324.

		Factor A											
		6	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Factor B	5x5	5x5-6	5x5-10	5x5-15	5x5-20	5x5-25	5x5-30	5x5-35	5x5-40	5x5-45	5x5-50	5x5-55	5x5-60
	5x10	5x10-6	5x10-10	5x10-15	5x10-20	5x10-25	5x10-30	5x10-35	5x10-40	5x10-45	5x10-50	5x10-55	5x10-60
	5x15	5x15-6	5x15-10	5x15-15	5x15-20	5x15-25	5x15-30	5x15-35	5x15-40	5x15-45	5x15-50	5x15-55	5x15-60
	10x5	10x5-6	10x5-10	10x5-15	10x5-20	10x5-25	10x5-30	10x5-35	10x5-40	10x5-45	10x5-50	10x5-55	10x5-60
	10x10	10x10-6	10x10-10	10x10-15	10x10-20	10x10-25	10x10-30	10x10-35	10x10-40	10x10-45	10x10-50	10x10-55	10x10-60
	10x15	10x15-6	10x15-10	10x15-15	10x15-20	10x15-25	10x15-30	10x15-35	10x15-40	10x15-45	10x15-50	10x15-55	10x15-60
	15x5	15x5-6	15x5-10	15x5-15	15x5-20	15x5-25	15x5-30	15x5-35	15x5-40	15x5-45	15x5-50	15x5-55	15x5-60
	15x10	15x10-6	15x10-10	15x10-15	15x10-20	15x10-25	15x10-30	15x10-35	15x10-40	15x10-45	15x10-50	15x10-55	15x10-60
	15x15	15x15-6	15x15-10	15x15-15	15x15-20	15x15-25	15x15-30	15x15-35	15x15-40	15x15-45	15x15-50	15x15-55	15x15-60

Tabla 5-6.: Diseño de Experimentos - Caso de Flujo Externo Perfil de Velocidad Cilindros Rectangulares

Distribución de Presión

1. **Problema de Investigación:** Verificar la distribución de presión en las tomas estáticas ubicadas en la superficie superior de las diferentes configuraciones de Cilindros Rectangulares.
2. **Parámetros Variables Controlables del Experimento:** Frecuencia del Variador (Hz), Dimensiones del Cilindro Rectangular (Ancho, Alto, Largo).
3. **Parámetros Variables No Controlables del Experimento:** Presión Atmosférica ($mmHg$), Humedad Relativa ($\% R_H$), Temperatura ($^{\circ}C$).
4. **Parámetros Fijos de la Simulación:** Puntos de Medición (Ver Anexo G, Sección G.4 Subsección G.4.2), Dimensiones de la zona de pruebas ($0,30m \times 0,30m \times 0,65m$), Instrumento empleado (Multimanómetro de Presión a 30°).
5. **Parámetros a Medir:** Presión Estática (Pa).
6. **Factores:**

- **Factor A:** Frecuencia del Variador (Hz).
- **Factor B:** Dimensiones del Cilindro.

7. Niveles:

- **Factor A:** 12 Niveles (6, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60).
- **Factor B:** 9 Niveles (5x5, 5x10, 5x15, 10x5, 10x10, 10x15, 15x5, 15x10, 15x15).

8. Número de Réplicas: 3.

8. Número de Experimentos Requeridos: 324.

		Factor A											
		6	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Factor B	5x5	5x5-6	5x5-10	5x5-15	5x5-20	5x5-25	5x5-30	5x5-35	5x5-40	5x5-45	5x5-50	5x5-55	5x5-60
	5x10	5x10-6	5x10-10	5x10-15	5x10-20	5x10-25	5x10-30	5x10-35	5x10-40	5x10-45	5x10-50	5x10-55	5x10-60
	5x15	5x15-6	5x15-10	5x15-15	5x15-20	5x15-25	5x15-30	5x15-35	5x15-40	5x15-45	5x15-50	5x15-55	5x15-60
	10x5	10x5-6	10x5-10	10x5-15	10x5-20	10x5-25	10x5-30	10x5-35	10x5-40	10x5-45	10x5-50	10x5-55	10x5-60
	10x10	10x10-6	10x10-10	10x10-15	10x10-20	10x10-25	10x10-30	10x10-35	10x10-40	10x10-45	10x10-50	10x10-55	10x10-60
	10x15	10x15-6	10x15-10	10x15-15	10x15-20	10x15-25	10x15-30	10x15-35	10x15-40	10x15-45	10x15-50	10x15-55	10x15-60
	15x5	15x5-6	15x5-10	15x5-15	15x5-20	15x5-25	15x5-30	15x5-35	15x5-40	15x5-45	15x5-50	15x5-55	15x5-60
	15x10	15x10-6	15x10-10	15x10-15	15x10-20	15x10-25	15x10-30	15x10-35	15x10-40	15x10-45	15x10-50	15x10-55	15x10-60
	15x15	15x15-6	15x15-10	15x15-15	15x15-20	15x15-25	15x15-30	15x15-35	15x15-40	15x15-45	15x15-50	15x15-55	15x15-60

Tabla 5-7.: Diseño de Experimentos - Caso de Flujo Externo Distribución de Presión Cilindros Rectangulares

5.3. Configuración Experimental

5.3.1. Configuración Experimental - Instrumentos de Medición

Para el desarrollo de pruebas experimentales se hace uso de un Tubo Pitot-Estático marca EXTECH [1] cuyas especificaciones se encuentran en el Anexo I y un Multimanómetro de Presión cuyas especificaciones de diseño se encuentran en la Sección 4.5.3.

En la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, se encuentran cuatro puntos de ingreso para instrumento. En el caso del Tubo Pitot-Estático, los montajes experimentales se realizan con la ayuda de dos soportes cuyo uso depende de la toma por donde se vaya a ingresar el instrumento. Estos soportes poseen cada uno una regleta en *mm* incrustada sobre su eje, que permite ubicar el instrumento a la altura deseada. Los montajes para los diferentes ingresos se presentan en las Figuras 5-4 y 5-5. La ubicación de la cabeza del Tubo Pitot-Estático se realiza apuntando en sentido opuesto a la dirección del flujo.



Figura 5-4.: Configuración Experimental - Soporte 1 Montaje Experimental Tubo Pitot-Estático

El Multimanómetro de Presión se encuentra ubicado en la estructura que soporta el difusor, lo que permite fácil acceso para las diferentes conexiones que se requieren. Este se posiciona a 30° con respecto al plano central del manómetro con el fin de brindar mayor sensibilidad al instrumento. Las Figuras 5-6 y 5-7 presentan las conexiones y montaje para las pruebas experimentales que requieran del Multimanómetro de Presión.



Figura 5-5.: Configuración Experimental - Soporte 2 Montaje Experimental Tubo Pitot-Estático

Con el fin de monitorear las condiciones ambiente presentes durante el desarrollo de pruebas experimentales, importantes para el cálculo de los diferentes parámetros que intervienen, se emplea un Termohigrómetro y Barómetro registrador de datos PCE-THB 40 (Ver Especificaciones Técnicas Anexo J) del cual se obtienen los datos de Presión Atmosférica ($mmHg$), Humedad Relativa ($\% R_H$) y Temperatura ($^\circ C$).

Estos datos se monitorearon durante tres semanas las cuales incluyen los días previos a la

toma de los datos, los días en los que se desarrollaron las pruebas experimentales y los días posteriores al desarrollo de las pruebas.

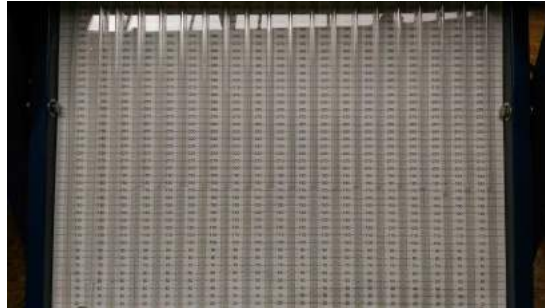


Figura 5-6.: Configuración Experimental - Montaje Experimental Manómetro de Presión



Figura 5-7.: Configuración Experimental - Montaje Experimental Manómetro de Presión Conexiones

Se especifica en el presente documento que los datos obtenidos de las pruebas experimentales y los coeficientes empleados para la presentación de los datos, son calculados a partir de las condiciones ambiente monitoreadas durante el desarrollo de cada prueba.

5.3.2. Configuración Experimental - Cilindros Rectangulares

Para las pruebas experimentales de Caso de Flujo externo, se establecen nueve configuraciones de Cilindros Rectangulares de relación de aspecto 1. La Tabla 5-8 relaciona el nombre dado a cada configuración y las dimensiones de cada cilindro.

Cada cilindro posee tomas estáticas a lo largo de la pared superior y la pared frontal a las cuales se conectan mangueras con el fin de realizar mediciones de distribución de presión. En el Anexo H se encuentran las especificaciones y los planos de diseño de cada cilindro, allí se puede verificar la posición de cada una de las tomas estáticas.

CILINDRO	DIMENSIONES (cm)
5x5	5x5x5
5x10	5x10x5
5x15	5x15x5
10x5	10x5x10
10x10	10x10x10
10x15	10x15x10
15x5	15x5x15
15x10	15x10x15
15x15	15x15x15

Tabla 5-8.: Configuración Experimental - Dimensiones Cilindros Rectangulares.

En la Figura 5-8 se presentan las fotografías de los nueve cilindros empleados en las pruebas experimentales de Caso de Flujo Externo, con la instalación de las mangueras y el tubo de acople a la Zona de Pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.



(a) Cilindros Rectangulares 5x5, 5x10, 5x15. (b) Cilindros Rectangulares 10x5, 10x10, 10x15. (c) Cilindros Rectangulares 15x5, 15x10, 15x15.

Figura 5-8.: Configuración Experimental - Fotografías Cilindros Rectangulares.

5.4. Rango de Velocidad a lo Largo del Tiempo

Con el fin de verificar que tan estable es el flujo en el centro de la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, se procede al desarrollo de pruebas experimentales que permitan verificar dicha información.

5.4.1. Rango de Velocidad a lo Largo del Tiempo - Montaje Experimental

De acuerdo al diseño de experimentos planteado en la Sección 5.2.1 para el desarrollo las pruebas conciernes al comportamiento del Flujo a lo largo del tiempo, se toman datos de velocidad cada 5 seg por un periodo de 300 segundos. El tubo Pitot-Estático se ingresa por la Toma No 4, tal como se muestra en la Figura 5-5, y se ubica a una altura de 150 mm dentro de la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

Debido al corto tiempo de muestreo requerido y con el fin de recolectar información precisa durante la prueba experimental, se hace uso del Software de adquisición de datos (Ver Figura 5-9) proporcionado por la compañía EXTECH Instruments [18] el cual viene con el Anemómetro Tubo Pitot + Manómetro Diferencial EXTECH HD 350.

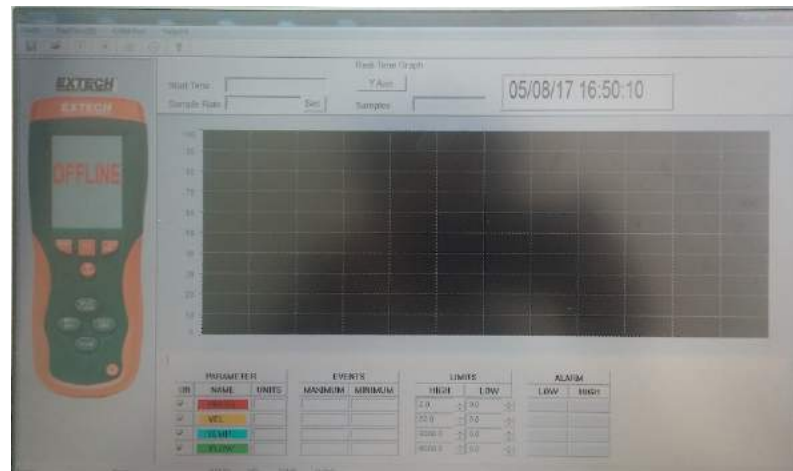


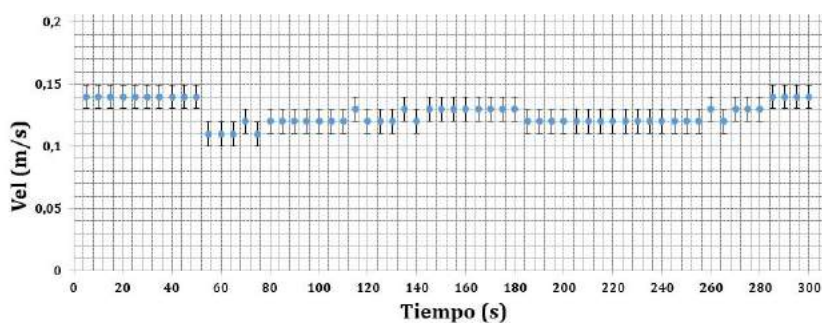
Figura 5-9.: Rango de Velocidad a lo Largo del Tiempo - Software de Adquisición de datos EXTECH HD350 [18]

5.4.2. Rango de Velocidad a lo Largo del Tiempo - Resultados y Análisis

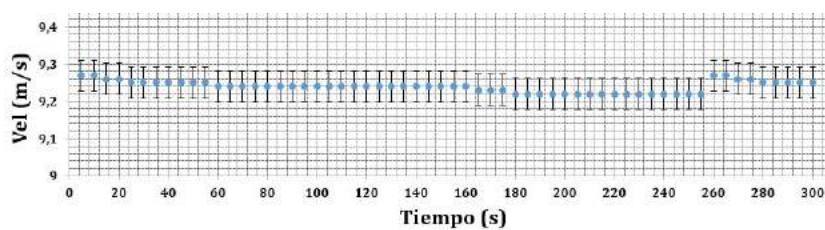
La Tabla 5-9 presenta los análisis estadísticos para las frecuencias de 6 Hz, 30 Hz y 60 Hz. Los análisis estadísticos para las demás frecuencias se encuentran en el Anexo K, Tabla K-1. Al igual que lo observado de forma gráfica, las desviaciones estándar se encuentran por debajo del 0,1% lo cual ratifica la observación realizada previamente en donde el flujo al interior de la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 se encuentra dentro de los parámetros de estabilidad requeridos para el desarrollo de pruebas experimentales de tipo académico.

Frecuencia	6 Hz	30 Hz	60 Hz
Media	0,126	9,239	18,812
Desv. Estándar	0,009	0,014	0,029
Varianza	0,00008	0,0002	0,0008
Coef de Var	0,009	0,014	0,029
Valor Min	0,11	9,22	18,72
Valor Max	0,14	9,27	18,86

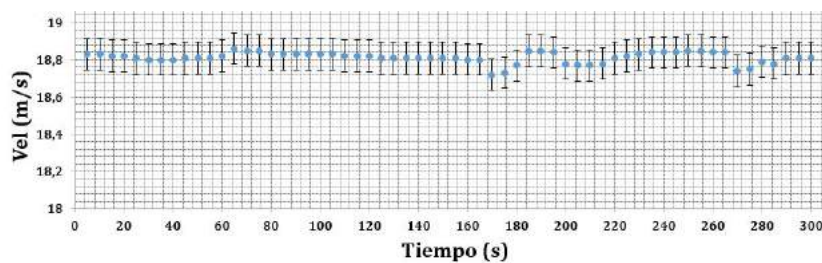
Tabla 5-9.: Rango de Velocidad a lo Largo del Tiempo - Datos Estadísticos Frecuencias de 6 Hz, 30 Hz y 60 Hz.



(a) Velocidad Vs Tiempo. 6 Hz.



(b) Velocidad Vs Tiempo. 30 Hz.



(c) Velocidad Vs Tiempo. 60 Hz.

Figura 5-10.: Rango de Velocidad a lo Largo del Tiempo - Velocidad Vs Tiempo 6 Hz, 30 Hz, 60 Hz.

La Figura 5-10 presenta las gráficas de Velocidad Vs Tiempo para los rangos de velocidad

mínima, intermedia y máxima (Frecuencias de 6 Hz, 30 Hz y 60 Hz), con las que opera el Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01. Las gráficas de Velocidad Vs Tiempo para las demás frecuencias se encuentran en el Anexo K, Figuras **K-1**, **K-2** y **K-3**. Como se puede observar, a medida que aumenta el tiempo la velocidad permanece constante sin mayores fluctuaciones que afecten la linearidad de los datos, lo cual evidencia un comportamiento estable del flujo al interior de la Zona de Pruebas.

Se concluye en primer lugar, que el comportamiento de la corriente de aire no sufre perturbaciones en su recorrido por las diferentes secciones que componen el Túnel de Viento, lo que hace que los datos de velocidad permanezcan dentro de un rango donde ciertas fluctuaciones pueden ser aceptables ya que no presentan variaciones de gran escala.

Por otro lado se evidencia que a medida que se aumenta la frecuencia de operación, la velocidad permanece cuasi estable, por lo cual se concluye que el aumento de la velocidad no interfiere en la estabilidad de la corriente de aire y no afecta su flujo al interior de la zona de pruebas.

A pesar de que a mayores frecuencias de operación la desviación estándar aumenta en porcentaje, los datos no ejercen influencia sobre el comportamiento de la corriente de aire, ya que si se observan los rangos en los que se encuentran los datos de velocidad para la frecuencia especificada, se evidencia que estos no presentan variaciones mayores a $1m/s$ lo cual es aceptable para el desarrollo de pruebas experimentales.

5.5. Perfil de Velocidad

A continuación se relacionan las pruebas desarrolladas en el Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 para determinar los perfiles de velocidad para las diferentes frecuencias de operación de este.

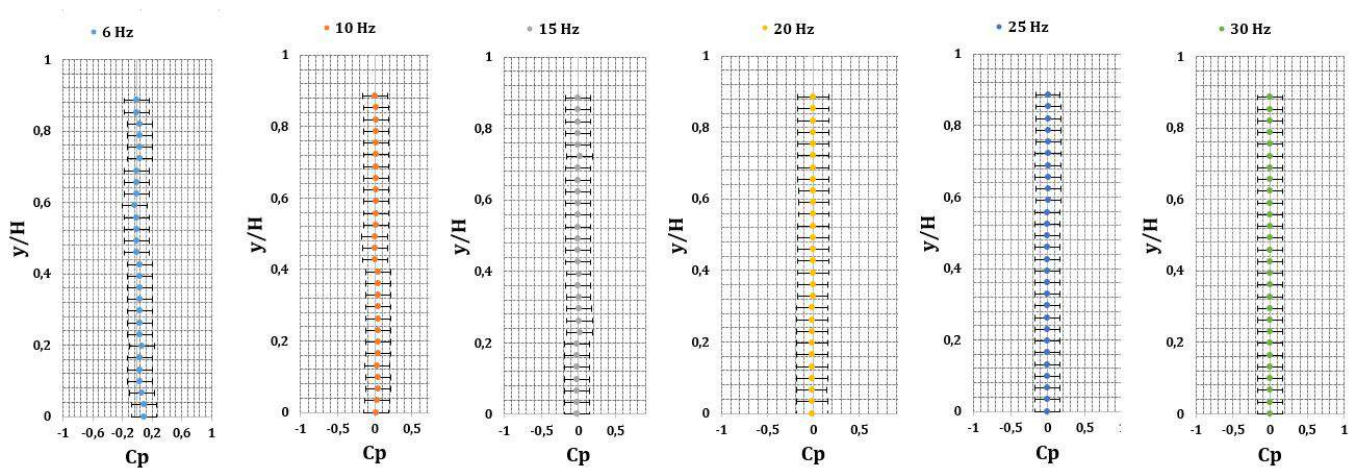
5.5.1. Perfil de Velocidad - Montaje Experimental

Para las pruebas experimentales de perfil de velocidad se sigue el diseño de experimentos planteado en la Sección 5.2.2. Par esto se hacen uso de dos Tomas (Toma No 1, Toma No 4) para la ubicación del tubo Pitot-Estático, empleando las configuraciones de soporte presentadas en las Figuras **5-4** y **5-5**.

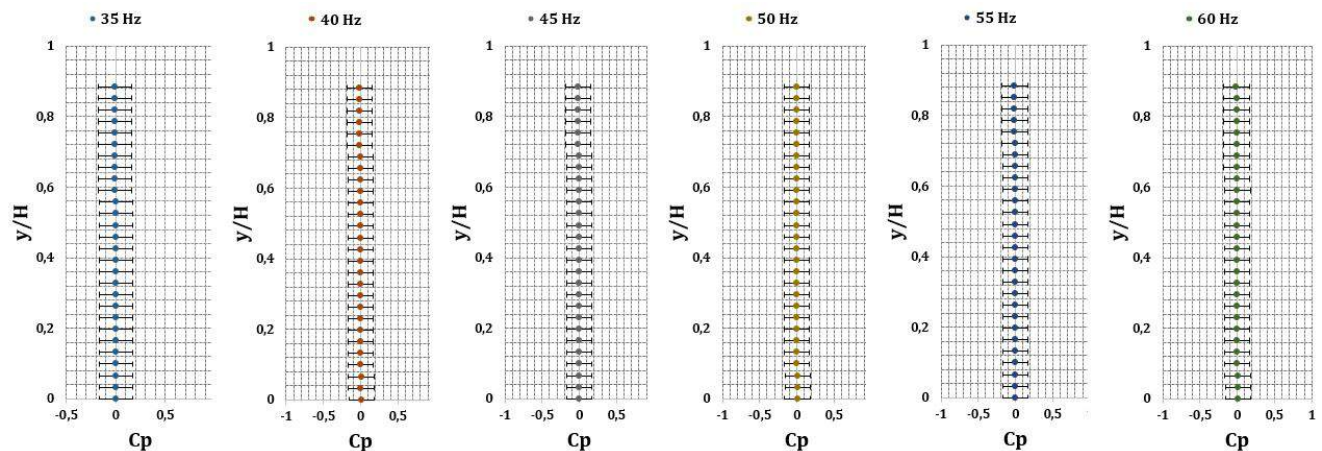
La Toma No 1 permite obtener los perfiles de velocidad al ingreso de la zona de pruebas y la Toma No 4 permite obtener los perfiles de velocidad en el centro de la zona de pruebas.

5.5.2. Perfil de Velocidad - Resultados y Análisis

La Figura 5-11 presenta los perfiles de velocidad para las diferentes frecuencias con las que opera el Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 en la entrada de la Zona de Pruebas. Como se puede observar, la forma que tienen los perfiles de velocidad se aproxima a un perfil de turbulencia no desarrollado. Esto se debe a que las mediciones se tomaron a la salida del contructor, por lo cual el flujo no presenta perturbación alguna y la velocidad se mantiene constante a lo largo de la sección transversal.



(a) Perfil de Velocidad. Frecuencias 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

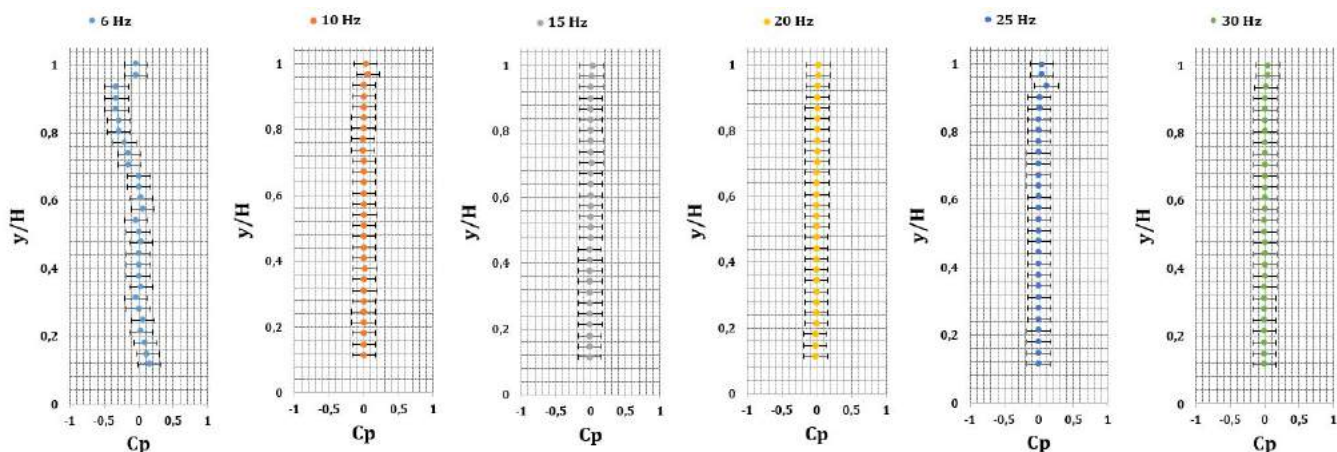


(b) Perfil de Velocidad. Frecuencias 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

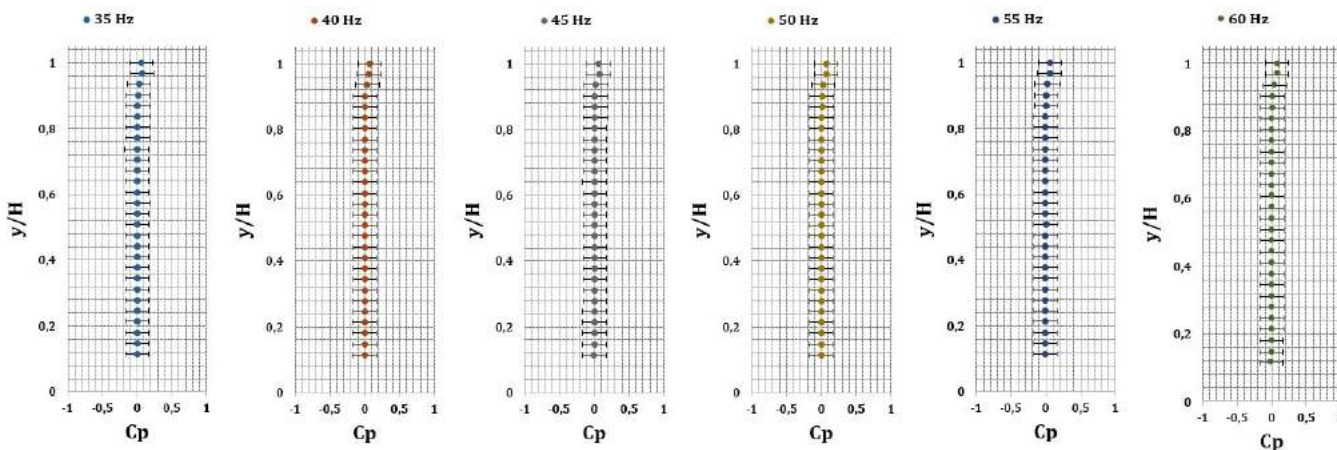
Figura 5-11.: Perfil de Velocidad - Perfiles de Velocidad Entrada Zona de pruebas Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

De igual forma se observa que a la Frecuencia de 6 Hz el comportamiento de la velocidad es irregular, lo que indica que el flujo no es estable a bajas velocidades, factor que puede influenciar el comportamiento de la corriente de aire al interior de la zona de pruebas.

La Figura 5-12 presenta los perfiles de velocidad en el centro de la zona de pruebas los cuales presentan una distribución similar a lo observado en un perfil de velocidad para un flujo turbulento desarrollado en un canal. Este tipo de perfil indica que la velocidad permanece constante a lo largo de la sección transversal a excepción de las zonas cercanas a las paredes las cuales presentan perturbaciones debido a la ubicación de los puntos de acople del Generador de Humo. Sin embargo no se afecta de sobremanera el comportamiento del flujo al interior de la zona de pruebas lo cual permite tener condiciones de similitud de flujo para el desarrollo de pruebas experimentales con modelos.



(a) Perfil de Velocidad. Frecuencias 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.



(b) Perfil de Velocidad. Frecuencias 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura 5-12.: Perfil de Velocidad - Perfiles de Velocidad Centro Zona de pruebas Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

Tal como se observó en el perfil de velocidad para la Frecuencia de 6 Hz a la salida de la zona de contracción, se evidencia un comportamiento poco estable del flujo en la zona central de la

zona de pruebas. Este comportamiento se debe a que a bajas velocidades el flujo no alcanza a estabilizarse lo que ocasiona que la velocidad fluctue a lo largo de la sección transversal.

5.6. Perfil de Presión

A fin de inspeccionar el comportamiento de la presión en la sección pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, más específicamente en la zona donde se ubican los modelos, se presentan los resultados y su respectivo análisis de las pruebas experimentales de perfil de presión.

5.6.1. Perfil de Presión - Montaje Experimental

Siguiendo el diseño de experimentos planteado para las pruebas experimentales de perfil de presión (Ver sección 5.2.3), se hace uso de las Tomas No 1 y No 2 con el fin de verificar el comportamiento de la presión dinámica tanto a la entrada como en el centro de la zona de pruebas.

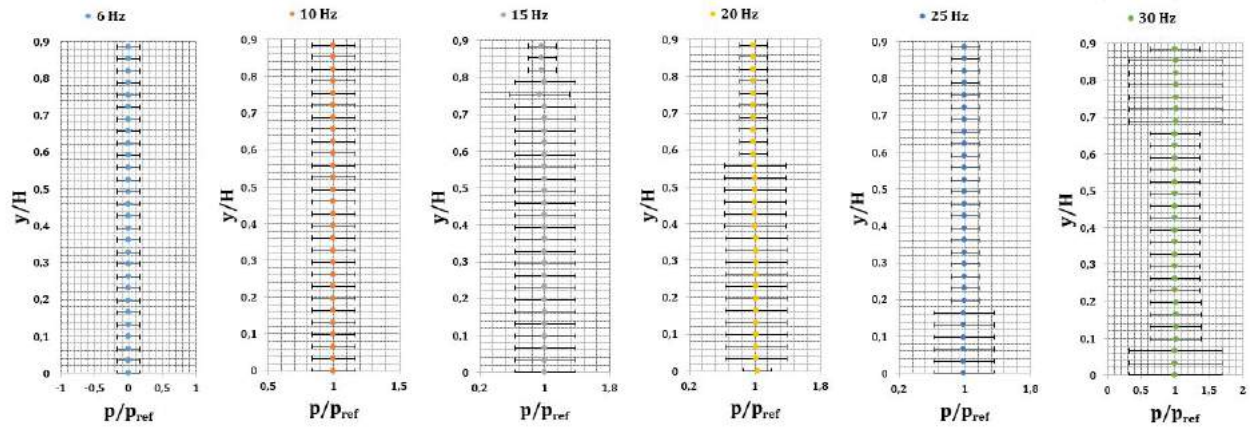
El Tubo Pitot-Estático se sujeta tal como se muestra en la Figura 5-4, el cual proporciona los datos de presión dinámica ya que el valor que entrega es el diferencial de presión entre la Presión Total y la Presión Estática.

5.6.2. Perfil de Presión - Resultados y Análisis

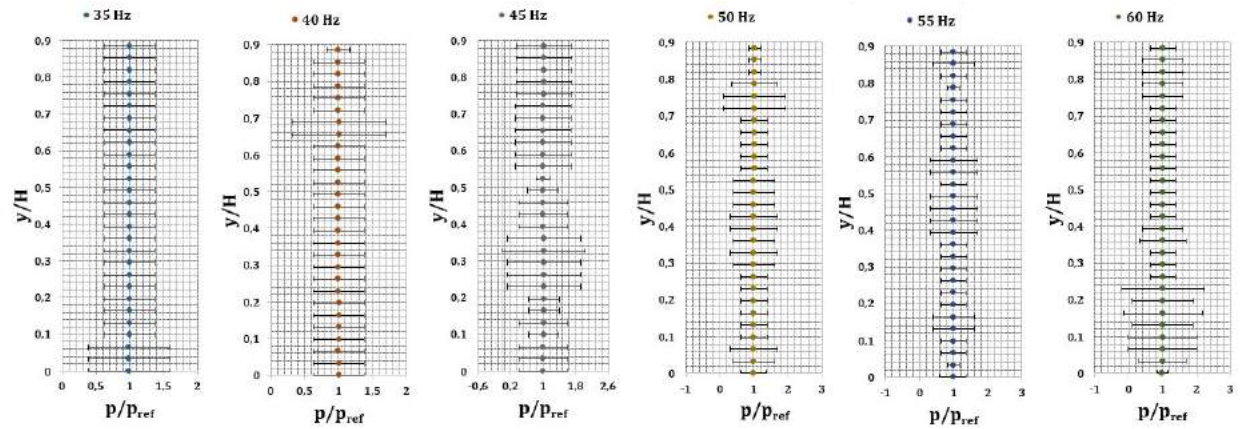
En la Figura 5-13 se presentan los perfiles de presión obtenidos a la salida de la zona de contracción. Estos perfiles presentan una distribución equitativa sin perturbación alguna, lo cual indica que la presión dinámica a lo largo de la sección transversal no presenta variaciones respecto a la presión dinámica promedio.

En cuanto a los perfiles de presión obtenidos en el centro de la zona de pruebas (Ver Figura 5-14), se observan variaciones de presión respecto a los datos de presión dinámica promedio, en las zonas cercanas a las paredes. Este comportamiento se presenta en las frecuencias de operación de 6 Hz a 30 Hz, caso que no ocurre a mayores frecuencias en donde los datos de presión permanecen estables.

De lo anterior se establece que la corriente de aire en los puntos de medición no presenta perturbaciones significativas, manteniendo un perfil de presión equitativo a lo largo de la sección transversal.

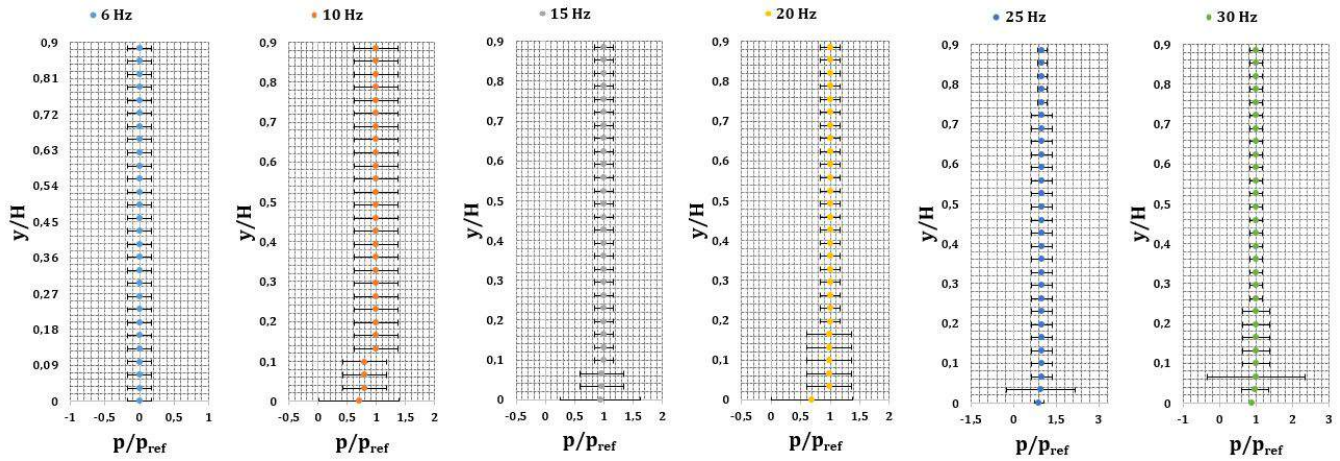


(a) Perfiles de Presión. Frecuencias 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

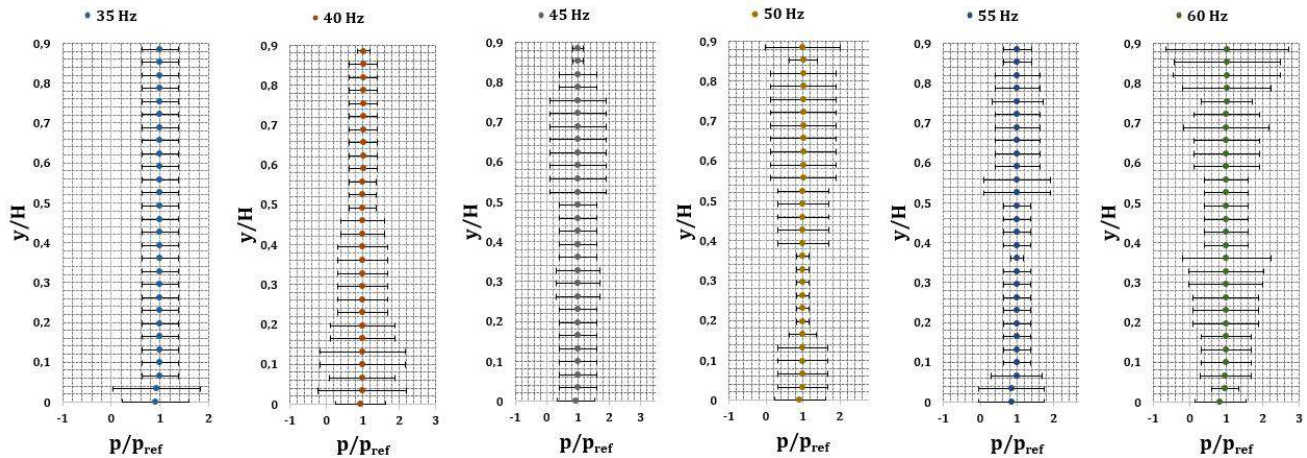


(b) Perfiles de Presión. Frecuencias 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura 5-13.: Perfil de Presión - Perfiles de Presión Entrada Zona de pruebas Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.



(a) Perfiles de Presión. Frecuencias 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.



(b) Perfiles de Presión. Frecuencias 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura 5-14.: Perfil de Presión - Perfiles de Presión Centro Zona de pruebas Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

5.7. Distribución de Presión

A continuación se relacionan las distribuciones de presión estática que se presentan al interior de la Zona de Pruebas y la *Settling Chamber 2* del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

5.7.1. Distribución de Presión - Montaje Experimental

De acuerdo con el diseño experimental planteado para el desarrollo de las pruebas experimentales de distribución de presión (ver Sección 5.2.4), se hace uso del Multimanómetro de Presión dispuesto para el Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

Las 16 tomas estáticas dispuestas en ambas secciones son conectadas a cada una de las entradas del manómetro, en donde los datos de presión se obtienen midiendo la diferencia de altura de la columna de agua en su cero inicial, respecto a la altura obtenida cuando se coloca el Túnel de Viento a la Frecuencia de Operación que requiere la prueba.

De acuerdo a las condiciones ambiente monitoreadas durante la prueba se hace el cálculo de los coeficientes de presión (C_p).

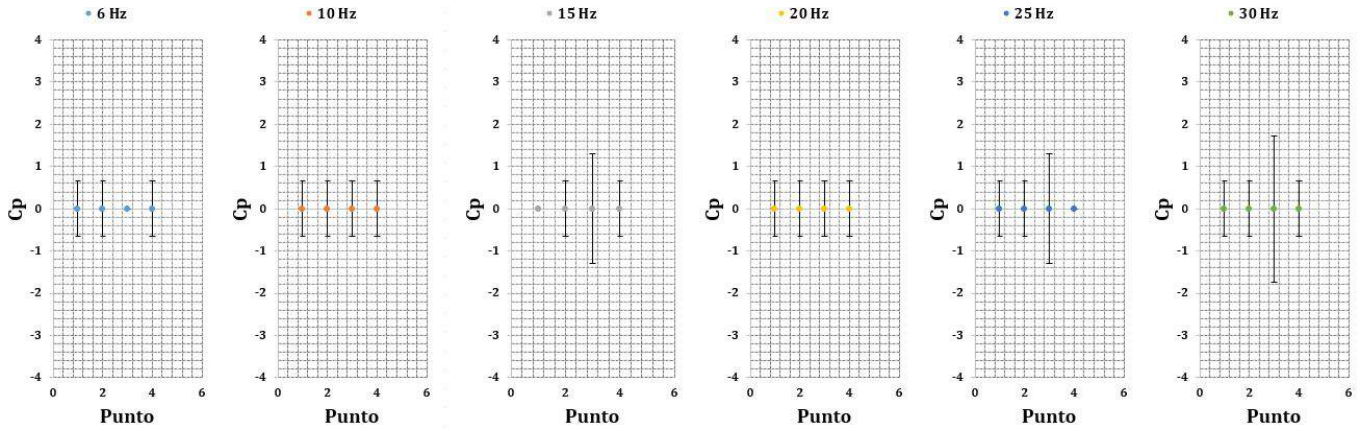
5.7.2. Distribución de Presión - Resultados y Análisis

Las Figuras 5-15, 5-16 y 5-17 presentan las distribuciones de presión obtenidas de acuerdo a las tomas estáticas ubicadas en la *Settling Chamber 2* y las paredes inferior y superior de la Zona de Pruebas. Por cada Figura se presentan tres subfiguras, una para las Frecuencias de Operación de 6 a 30 Hz, otra para las Frecuencias de Operación de 35 a 60 Hz y una figura para observar las distribuciones de presión sin las barras de error.

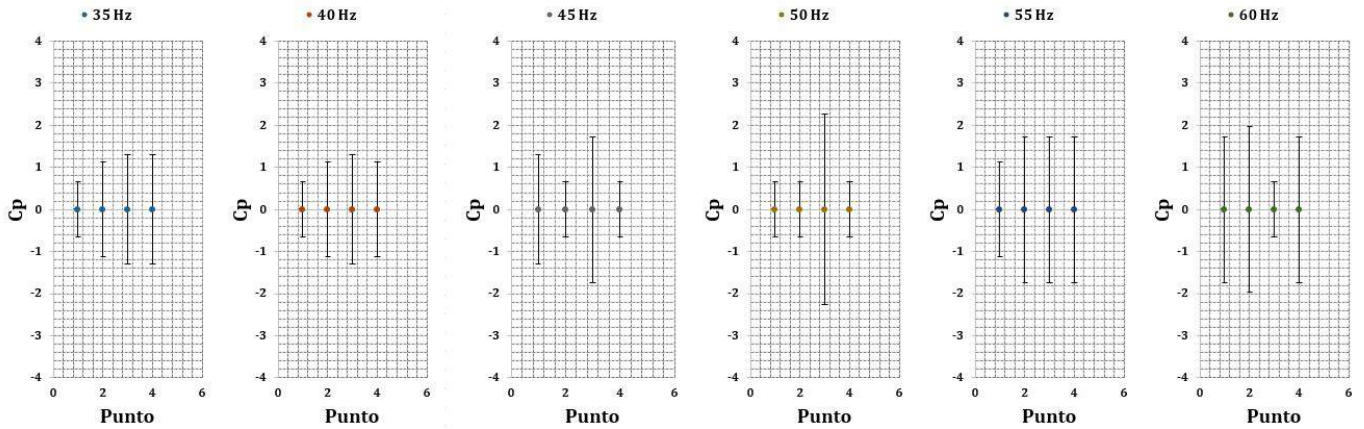
Al analizar las gráficas correspondientes a la *Settling Chamber 2* se observa que a bajas Frecuencias de operación no se presentan variaciones significativas en el coeficiente de presión, lo cual indica que en las cuatro paredes de la cámara, los datos de presión estática son similares. A medida que se aumenta la Frecuencia de Operación, el coeficiente de presión va disminuyendo progresivamente debido al aumento de velocidad en la corriente de aire. Estos coeficientes de presión son menores en las tomas de la pared superior y la pared derecha, razón por la cual se observa una curvatura en el perfil de distribución de presión.

En cuanto a la distribución de presión al interior de la Zona de Pruebas sobre la pared superior, se evidencia que a lo largo de la sección el coeficiente de presión tiende a presentar una curvatura en la sección de entrada. Esto puede indicar que la corriente de aire puede estar presentando perturbaciones por el punto de acople superior del Generador de Humo y las tomas de ingreso de los instrumentos ubicadas en la parte superior de la Zona de Pruebas. Sin embargo se observa que a la salida de la sección, la presión tiende a permanecer estable.

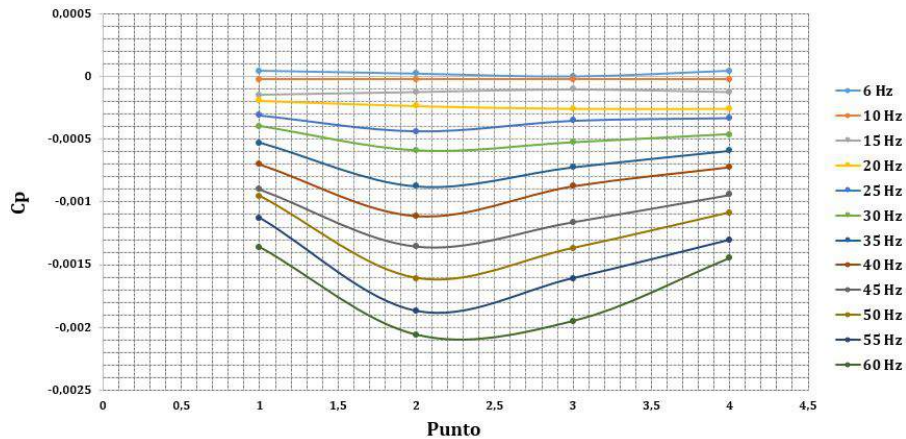
Para el caso de las tomas estáticas ubicadas en la pared inferior de la Zona de Pruebas, se observa que por el efecto de la tapa ubicada en el centro de esta pared y el punto de acople inferior para el Generador de Humo, la corriente de aire presenta algunas perturbaciones. De igual forma esta presenta estabilidad en la mayoría de la sección.



(a) Distribución de Presión. Frecuencias 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

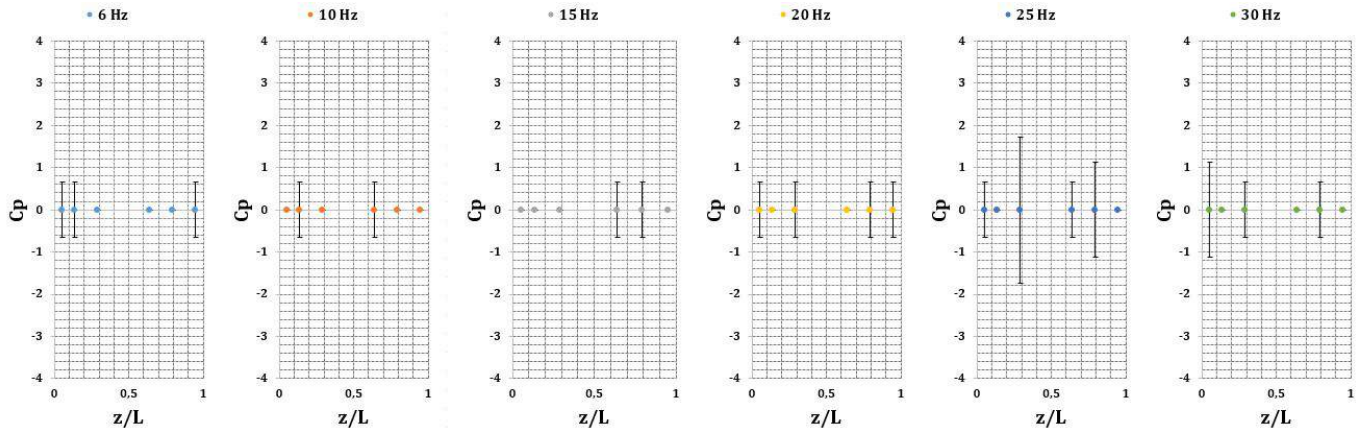


(b) Distribución de Presión. Frecuencias 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

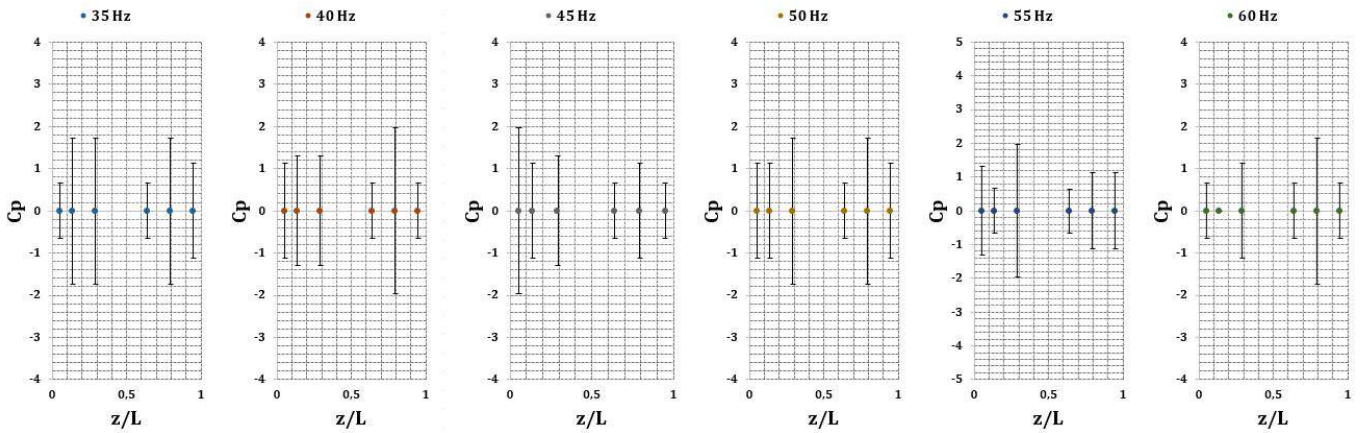


(c) Distribución de Presión. Distribuciones de Presión *Settling Chamber 2*.

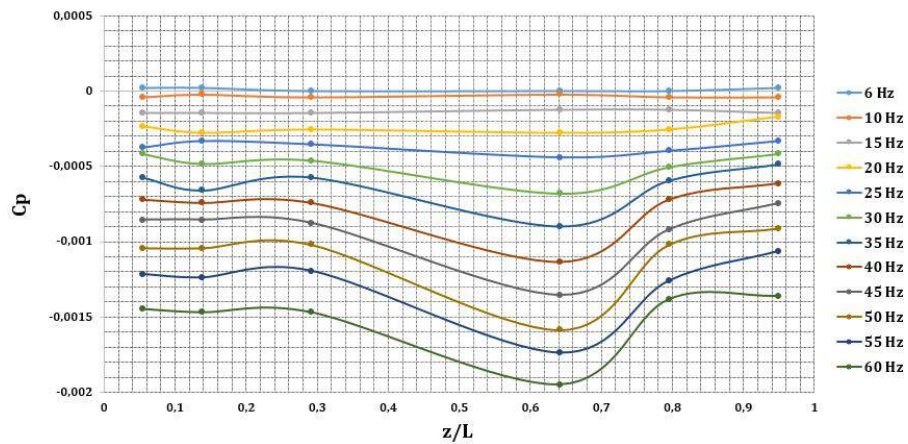
Figura 5-15.: Distribución de Presión - Distribuciones de Presión Tomas áticas *Settling Chamber 2*.



(a) Distribución de Presión. Frecuencias 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

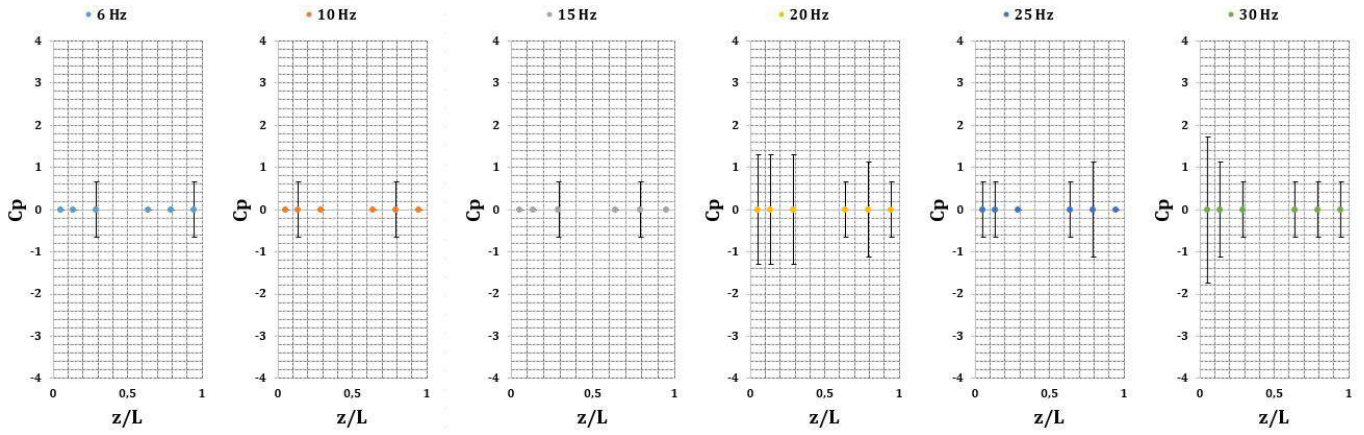


(b) Distribución de Presión. Frecuencias 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

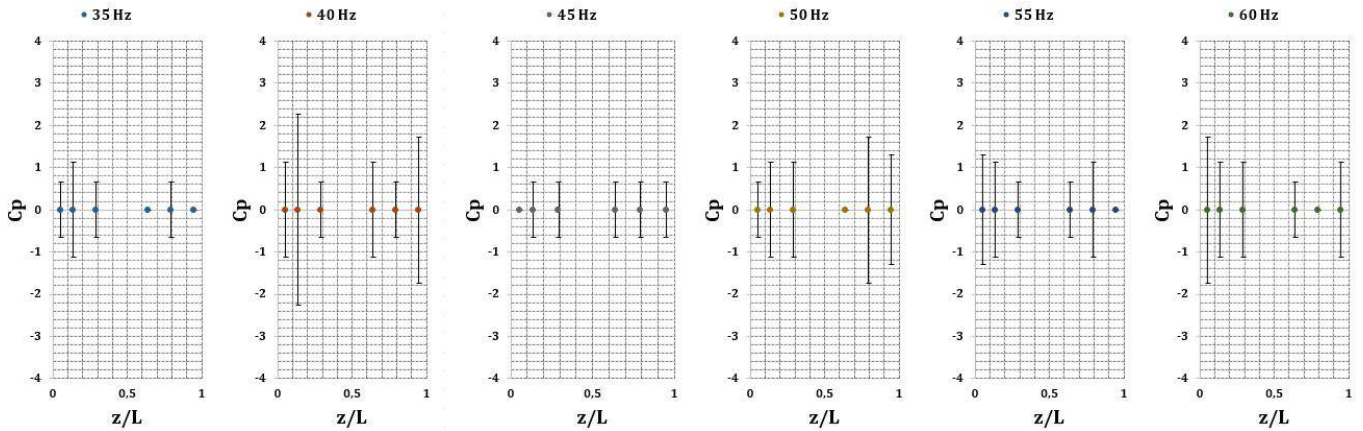


(c) Distribución de Presión. Distribuciones de Presión Tomas Inferiores.

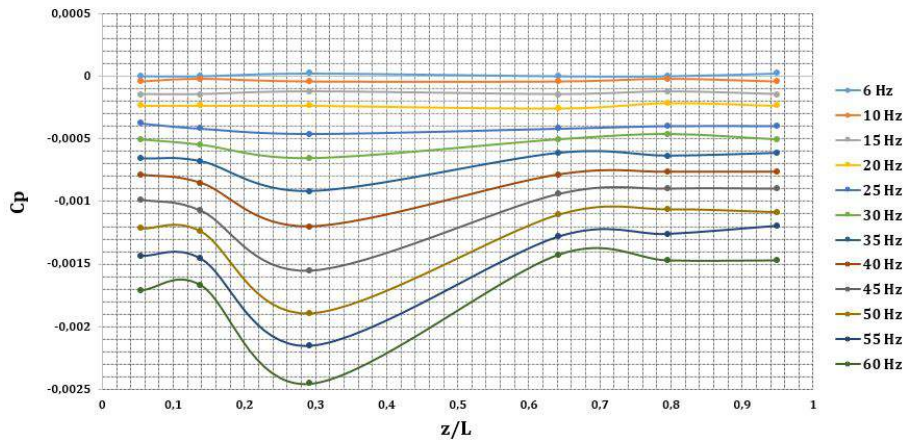
Figura 5-16.: Distribución de Presión - Distribuciones de Presión Tomas áticas Pared Inferior ZONA de Pruebas.



(a) Distribución de Presión. Frecuencias 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.



(b) Distribución de Presión. Frecuencias 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.



(c) Distribución de Presión. Distribuciones de Presión Tomas Superiores.

Figura 5-17.: Distribución de Presión - Distribuciones de Presión Tomas áticas Pared Superior ZOna de Pruebas.

5.8. Mapa de Presión

Con el fin de observar el comportamiento de la corriente de aire en el punto de acople de los modelos al interior de la Zona de Pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, es necesario observar el mapa de presión que presenta esta zona. En esta sección se relacionan los datos y su respectivo análisis concerniente a las pruebas desarrolladas para obtener los Mapas de Presión.

5.8.1. Mapa de Presión - Montaje Experimental

Barlow [11] recomienda que para realizar una adecuada caracterización en un Túnel de Viento de bajas velocidades, es necesario realizar mediciones en varios puntos a lo largo de la sección de pruebas tanto en la dirección X como en la dirección Y.

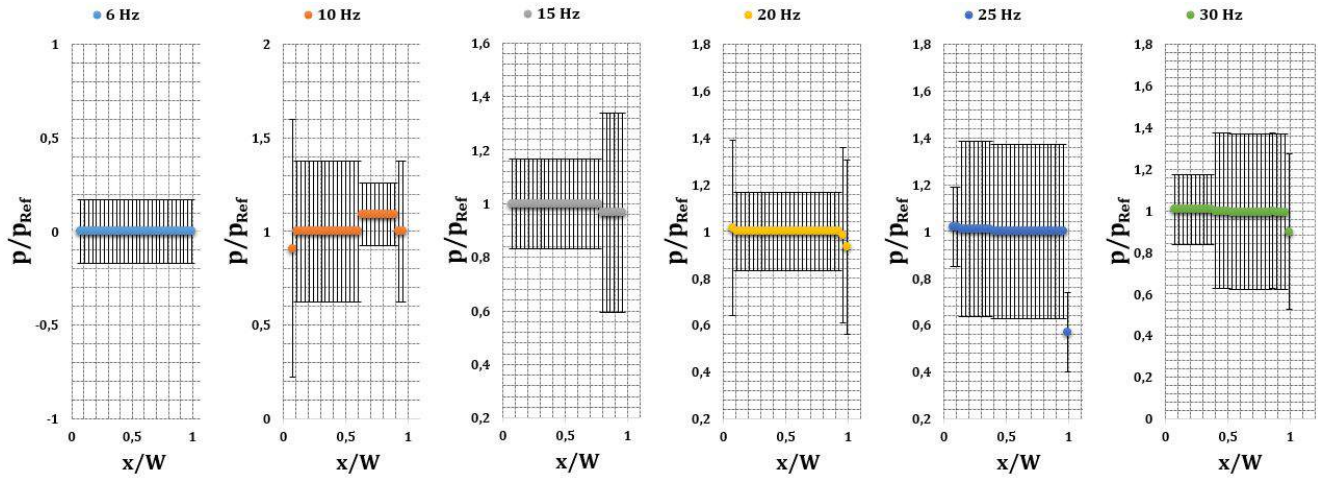
En el caso del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, por el diseño modular que presenta y la configuración de tomas adecuadas a la Zona de Pruebas para ingreso de instrumentos y Generador de Humo, no se puede realizar un recorrido completo del área total de la sección sin que el flujo sea afectado. Por esta razón, para las pruebas experimentales de Mapa de Presión, solo se toman datos de Coordenadas X y Y en los puntos especificados en el diseño de experimentos presentado en la Sección 5.2.5, cuyas ubicaciones permiten obtener los datos sin afectar la estabilidad de la corriente de aire al interior del ducto.

Las mediciones se toman con el Tubo Pitot-Estático el cual se ingresa por la Toma No 2, este se soporta mediante la configuración presentada en la Figura 5-4 para las mediciones en la coordenada Y, y para las mediciones en la coordenada X, el Tubo Pitot-Estático se ingresa por la tapa lateral de la Zona de Pruebas y se posiciona mediante la configuración presentada en la Figura 5-5 pero de forma horizontal.

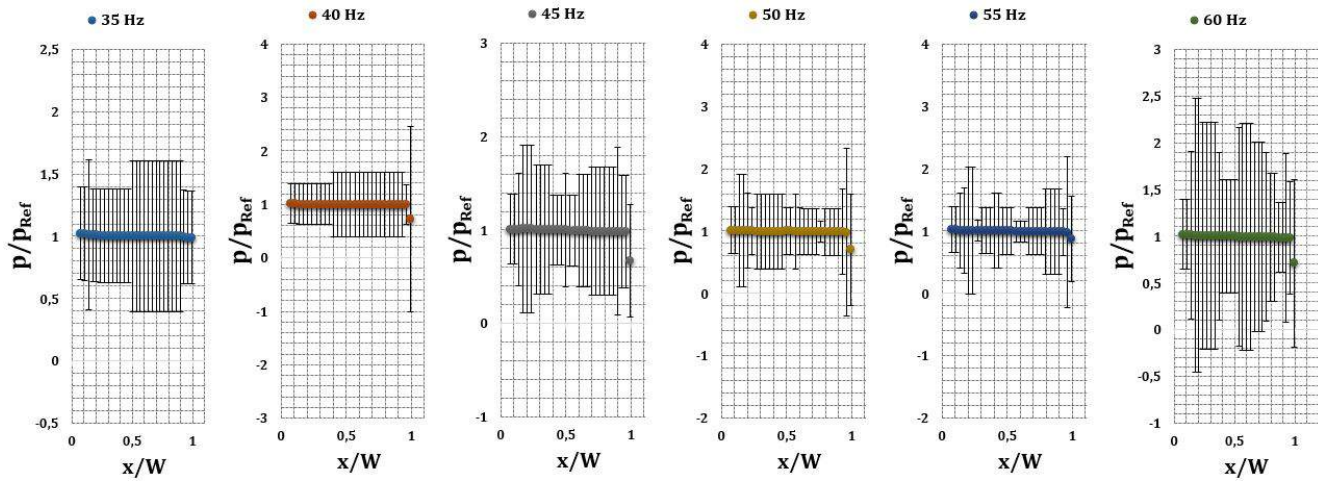
5.8.2. Mapa de Presión - Resultados y Análisis

En la Figura 5-18 se encuentran los perfiles de presión sobre la Coordenada X para las diferentes Frecuencias de Operación del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01. Se observan variaciones mínimas de presión respecto a la presión promedio, lo cual establece que a lo largo de la sección longitudinal, el flujo permanece sin perturbaciones significativas a excepción de las zonas cercanas a la pared.

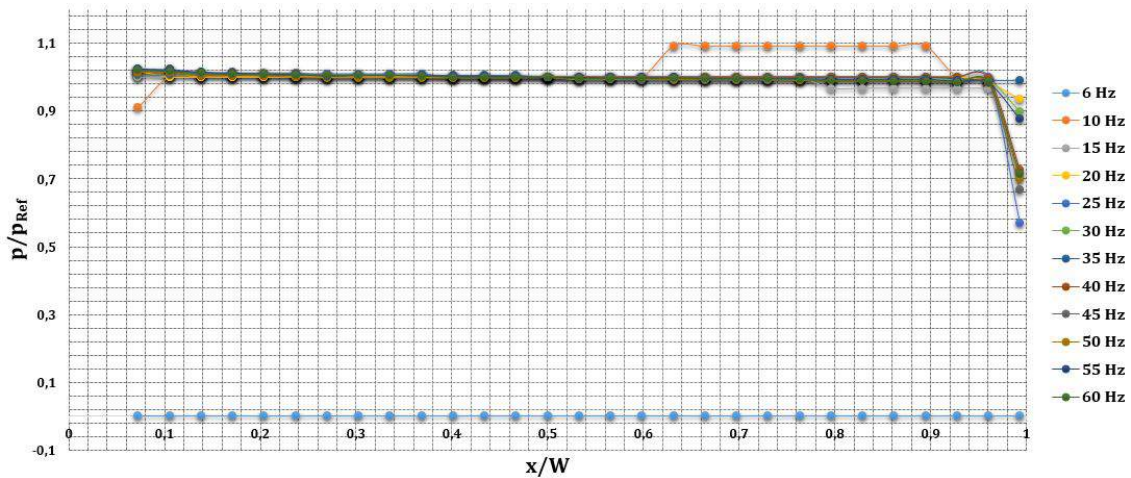
En cuanto al comportamiento de la presión a lo largo de la sección transversal (Coordenada Y), tal como se observa en los perfiles de presión presentados en la Sección 5.6, se evidencia estabilidad de la corriente con alteraciones en las zonas aledañas a las paredes (Ver Figura 5-19).



(a) Mapa de Presión. Frecuencias 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

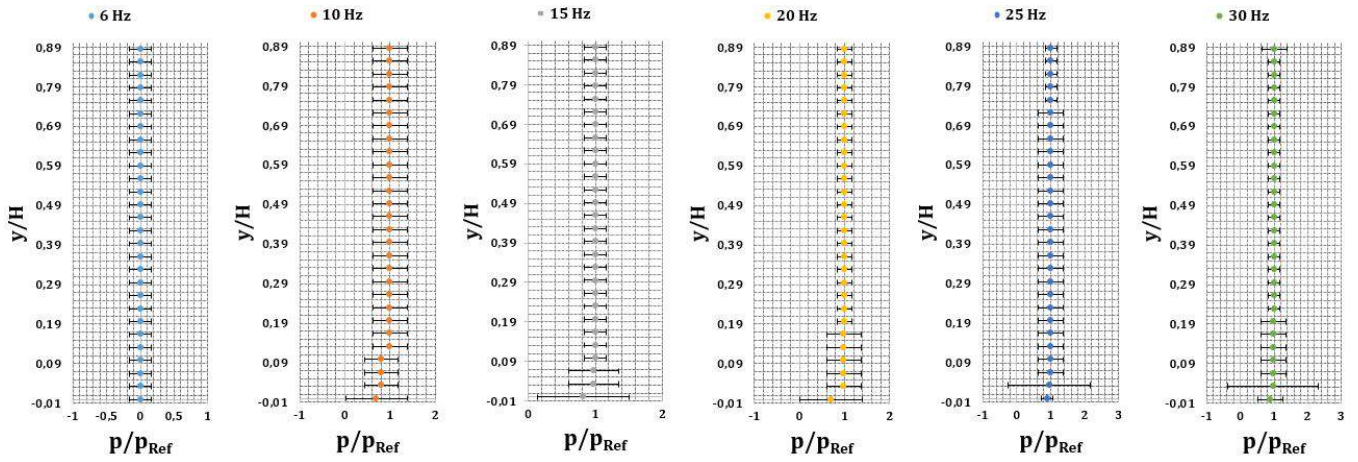


(b) Mapa de Presión. Frecuencias 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

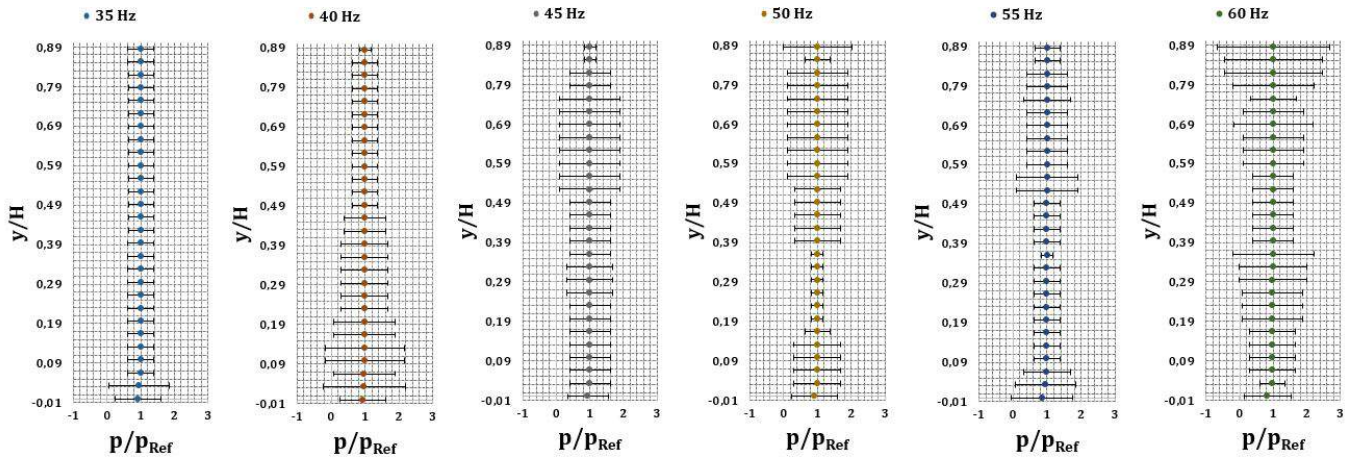


(c) Mapa de Presión. Perfil de Presión Coordenada X.

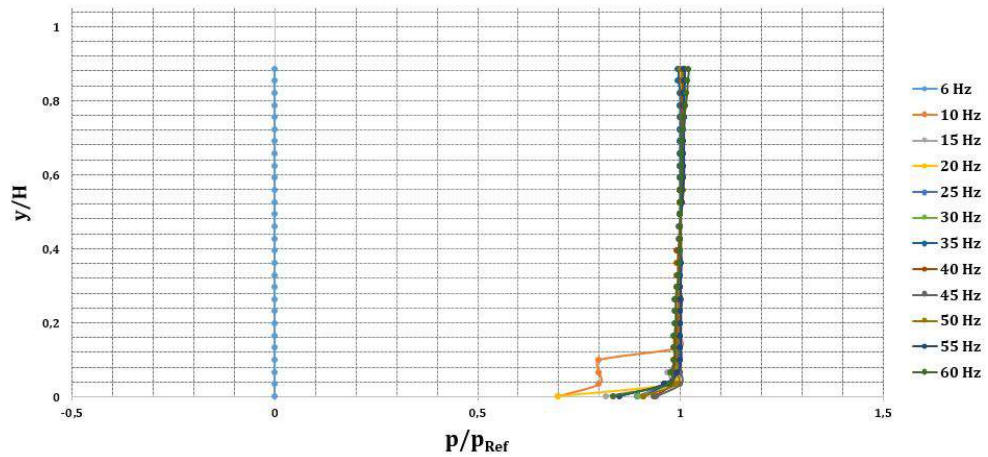
Figura 5-18.: Mapa de Presión - Mapa de Presión Coordenada X.



(a) Mapa de Presión. Frecuencias 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

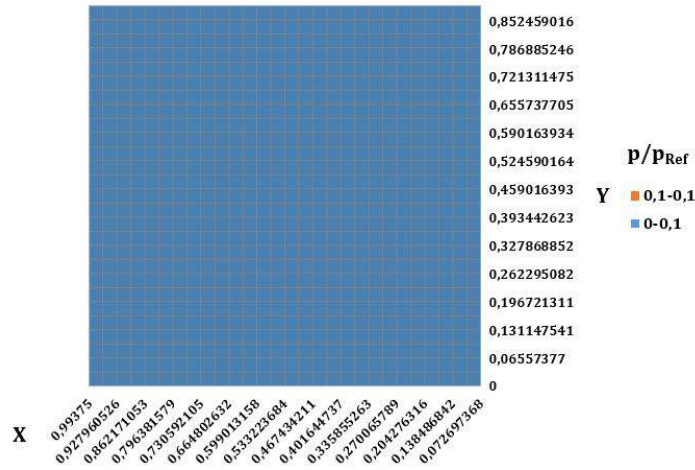


(b) Mapa de Presión. Frecuencias 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

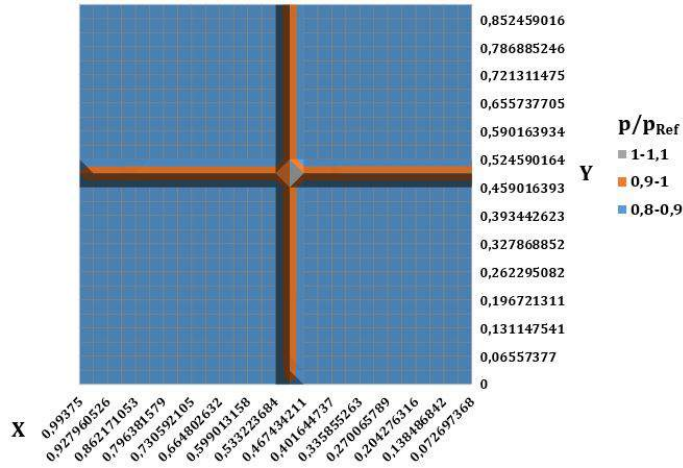


(c) Mapa de Presión. Perfil de Presión Coordenada Y.

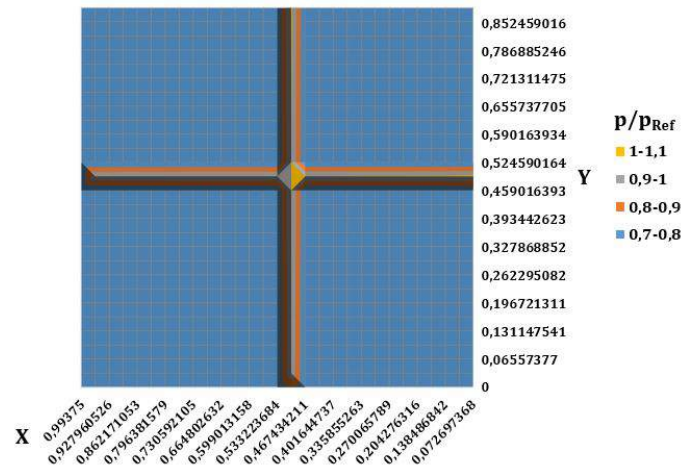
Figura 5-19.: Mapa de Presión - Mapa de Presión Coordenada Y.



(a) Mapa de Presión. Frecuencia 6 Hz.



(b) Mapa de Presión. Frecuencia 30 Hz.



(c) Mapa de Presión. Frecuencia 60 Hz.

Figura 5-20.: Mapa de Presión - Mapa de Presión Frecuencias de Operacion 6 Hz, 30 Hz, 60 Hz.

Siguiendo lo estipulado por Barlow [11] se presentan en la Figura 5-20 los Mapas de Presión obtenidos para las Frecuencias de Operación de 6 Hz, 30 Hz y 60 Hz, en el Anexo L Figuras L-1, L-2 y L-3, se encuentran los Mapas de Presión obtenidos para las Frecuencias de Operación restantes.

A bajas velocidades no se logra registrar valores de presión con el Tubo Pitot-Estático, razón por la cual no se observa Mapa de Presión a la Frecuencia de 6 Hz. A medida que se aumenta la frecuencia como lo observado en los Mapas de Presión de 10 a 30 Hz, se observa una distribución de presión equitativa sin mayores variaciones de los coeficientes de presión. Hay puntos en donde la presión aumenta, en especial en las zonas con dirección hacia la pared derecha, pero sin mayor influencia sobre el comportamiento del flujo.

En las Frecuencias de Operación de 35 a 60 Hz, se observa que el flujo de corriente permanece estable con algunos puntos en donde el coeficiente de presión presenta algunas variaciones de presión respecto a la presión promedio. Al igual que lo observado en las gráficas de las frecuencias de 6 a 30 Hz, en las zonas con dirección hacia la pared derecha se observan presiones mayores a las obtenidas en la pared izquierda, pero estos puntos no afectan las condiciones de similitud de flujo necesarias en la zona donde se posiciona el modelo.

5.9. Caso de Flujo Externo

De acuerdo a las simulaciones de los casos de Flujo externo realizadas para el presente proyecto investigativo (Ver Sección 3.9), se concluye que para mantener condiciones de similitud de flujo un modelo de 3 cm x 3 cm x 3 cm era el más adecuado.

Dado lo anterior y con el fin de definir los límites en los cuales se pueden mantener condiciones de similitud de flujo al interior de la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 sin que la corriente de aire sea afectada por las dimensiones del modelo, se presenta a continuación el desarrollo de las pruebas experimentales de Caso de Flujo Externo.

5.9.1. Caso de Flujo Externo - Montaje Experimental

De acuerdo al diseño de experimentos planteado en la Sección 5.2.6, se realizan mediciones de perfil de velocidad y distribución de presión para cada una de las configuraciones experimentales planteadas. Tal como se especifica en la Sección 5.3.2, se emplean nueve Cilindros Rectangulares los cuales, de acuerdo a los resultados obtenidos en las secciones anteriores, se ubican en la Zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, a $X:150\text{ mm}$, $Y:150\text{ mm}$ y $Z:325\text{ mm}$.

Para las pruebas experimentales de Caso de Flujo Externo se hace uso del Tubo Pitot-Estático para las mediciones de perfil de velocidad y el Multimanómetro de Presión, con

una inclinación de 30° para mayor sensibilidad, para las mediciones de distribución de presión. Tubo Pitot-Estático se ubica en la Toma No 2 mediante la configuración de soporte presentada en la Figura 5-4 para la adquisición de datos de velocidad. Mientras que para las mediciones de distribución de presión, se realiza la conexión de las mangueras provenientes de las Tomas Estáticas de cada cilindro, a un tubo diferente en el Multimanómetro de Presión.

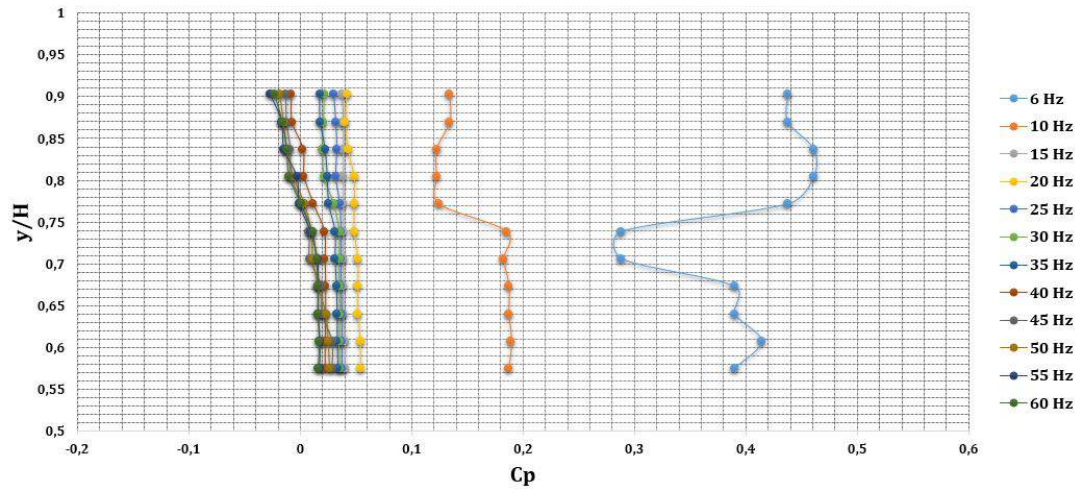
5.9.2. Caso de Flujo Externo - Resultados y Análisis

Perfil de Velocidad Cilindros Rectangulares

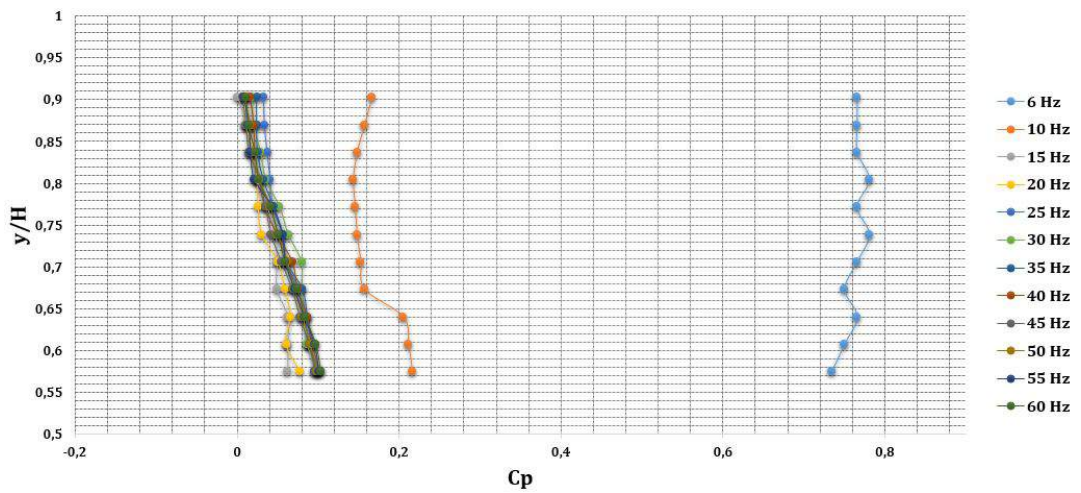
Las Figuras 5-21, 5-22, 5-23, presentan los perfiles de de velocidad obtenidos para cada una de las configuraciones de Cilindro Rectangular a las diferentes frecuencias de operación del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01. En el Anexo M Sección M.1, se presentan las gráficas de los perfiles de velocidad con la implementación de las barras de error propias del análisis de cada experimento. Lo primero que se observa es que a las frecuencias de operación de 5 Hz y 10 HZ, se presentan variaciones significativas en el Coeficiente de Presión, lo cual no permite tener condiciones de similitud de flujo a velocidades menores de $3m/s$. Como se ha mencionado anteriormente, el flujo no es estable a bajas velocidades razón por la cual el modelo afecta aún más la estabilidad del flujo.

Las configuraciones que alcanzan a permitir condiciones de similitud de flujo son 5×5 , 5×10 , 10×5 . Lo cual indica que a mayor sección transversal en el modelo, no se asegura que el comportamiento del flujo no este influenciado por la geometría del modelo. Las configuraciones restantes presentan variaciones que no se pueden obviar a la hora de desarrollar pruebas experimentales, por lo tanto, no se aseguran condiciones de similitud de flujo. Esto se debe a que por la reducción de área que se presenta en la zona comprendida entre el cilindro y las paredes de la Zona de Pruebas, la velocidad se incrementa lo cual cambia las propiedades del flujo.

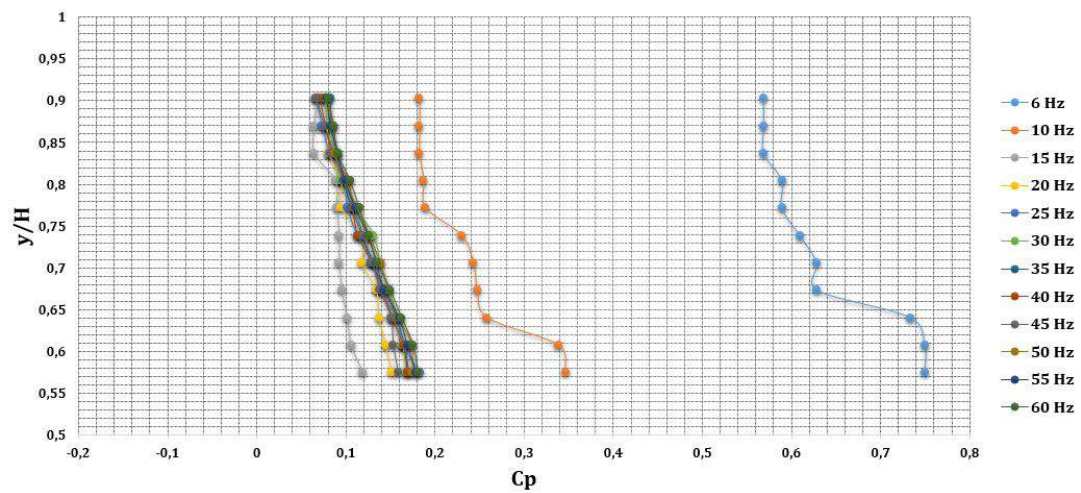
Las configuraciones de 5×10 y 10×5 presentan algunas variaciones en el Coeficiente de Presión, ya que en las zona cercanas a la pared del cilindro hay un aumento de la velocidad, la cual disminuye a medida que se acerca a la pared del Túnel. Sin embargo, para estas configuraciones aún se pueden mantener condiciones de similitud de flujo con algunas restricciones. La configuración de 10×5 representa la limitante en cuanto a volumen, ya que aunque el perfil de velocidad presenta algunas variaciones en el Coeficiente de Presión, en la secciones próximas a la pared presenta las mismas condiciones de flujo que las observadas en la Zona de Pruebas sin la influencia de un modelo.



(a) Cilindro 5x5.

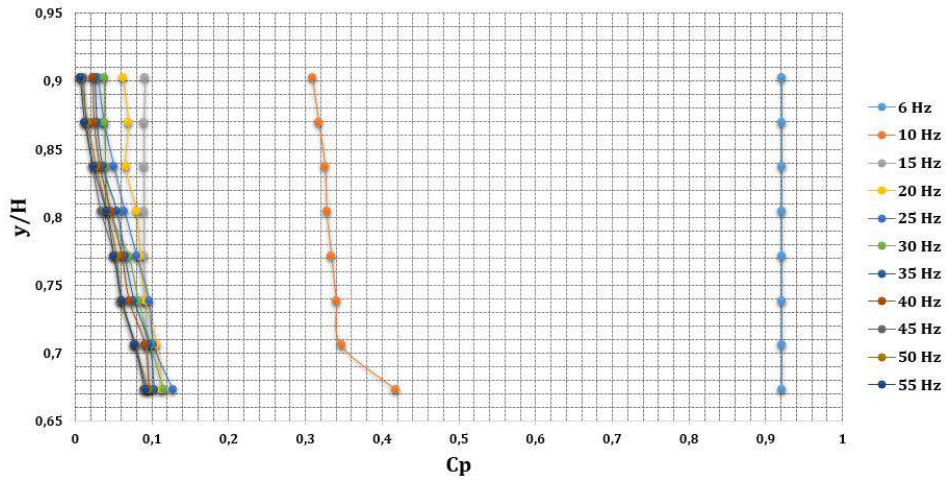


(b) Cilindro 5x10.

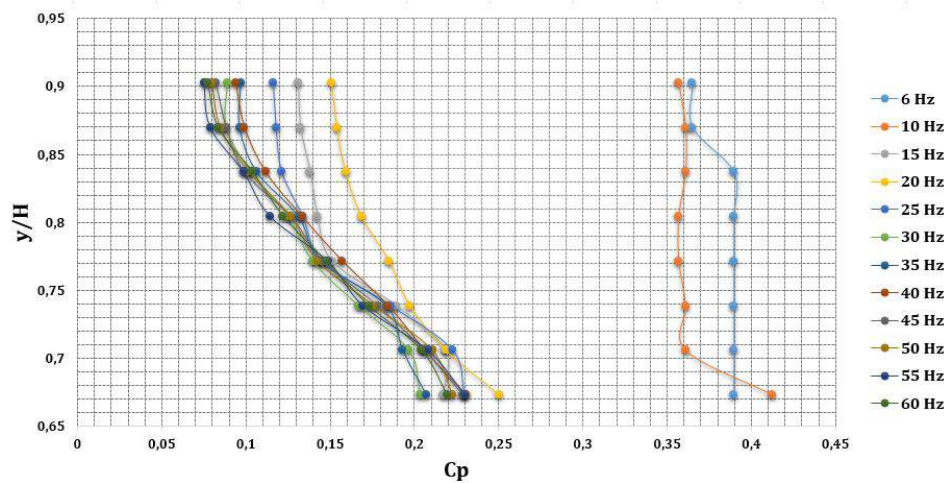


(c) Cilindro 5x15.

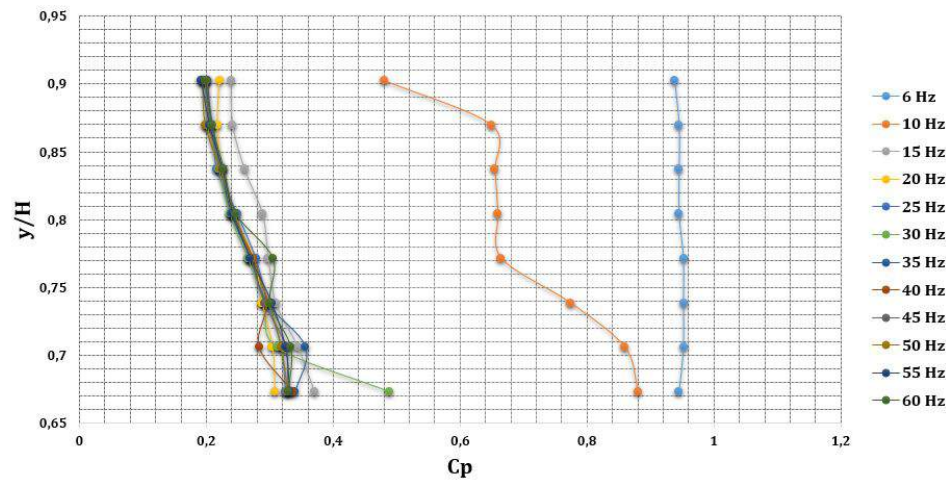
Figura 5-21.: Caso de Flujo Externo - Perfiles de Velocidad Cilindros Rectangulares 5x5, 5x10, 5x15.



(a) Cilindro 10x5.

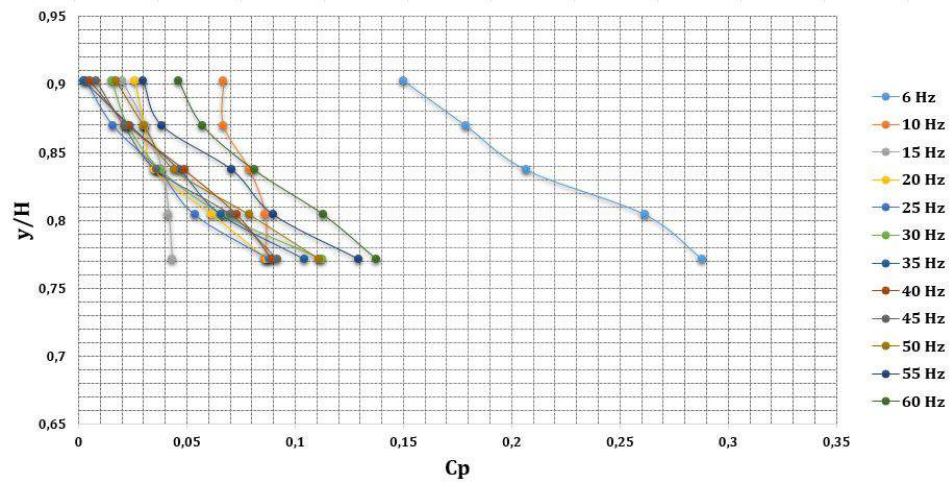


(b) Cilindro 10x10.

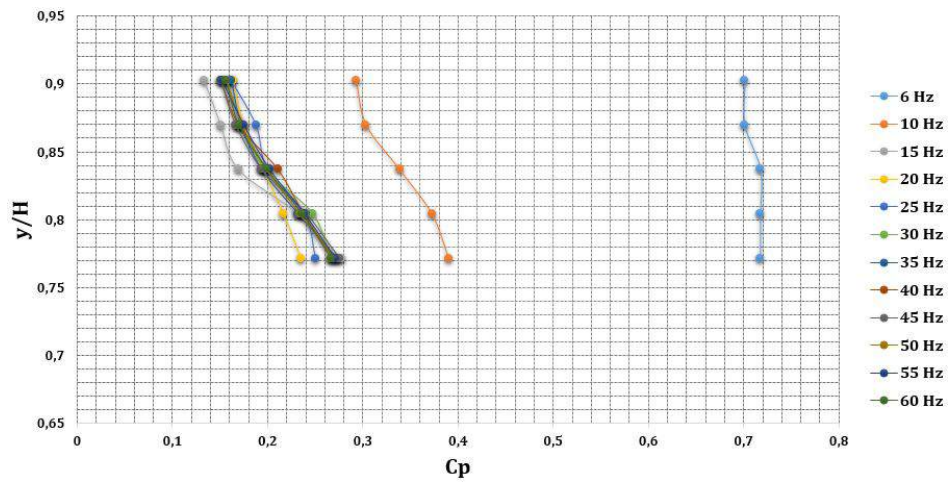


(c) Cilindro 10x15.

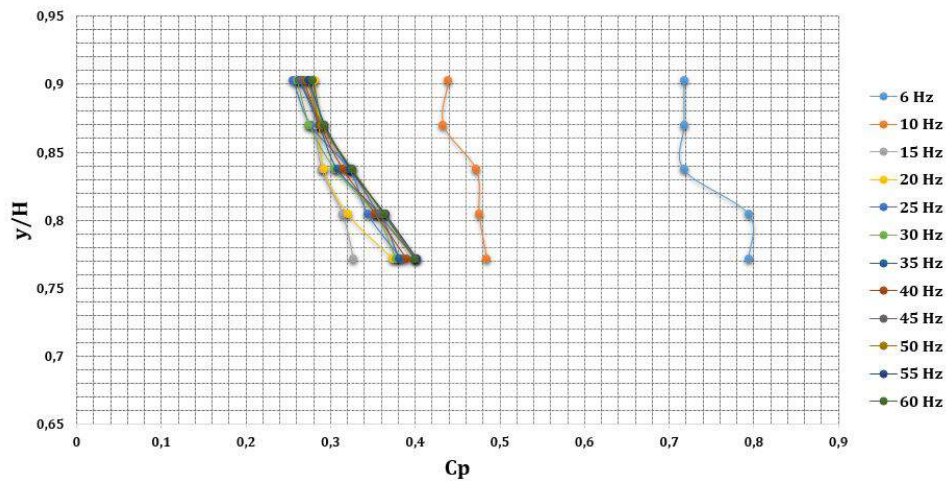
Figura 5-22.: Caso de Flujo Externo - Perfiles de Velocidad Cilindros Rectangulares 10x5, 10x10, 10x15.



(a) Cilindro 15x5.



(b) Cilindro 15x10.



(c) Cilindro 15x15.

Figura 5-23.: Caso de Flujo Externo - Perfiles de Velocidad Cilindros Rectangulares 15x5, 15x10, 15x15.

Distribución de Presión Cilindros Rectangulares

Las Figuras 5-25, 5-26 y 5-27, presentan las distribuciones de presión a lo largo de la superficie de la pared superior de cada una de las configuraciones de Cilindro Rectangular a las diferentes frecuencias de operación del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01. En el Anexo M Sección M.2, se presentan las gráficas de distribución de presión con la implementación de barras de error obtenidos del análisis estadístico para las mismas configuraciones. Como se observa en las gráficas, la presión en la toma estática ubicada en la pared frontal (Punto 0) no presenta incrementos, esto se debe a que por el choque directo de la corriente de aire con la pared del Cilindro, el aire entra directamente a la toma estática. Como las presiones manejadas al interior de la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 no sobrepasan la presión atmosférica, el Multimanómetro de Presión no alcanza a registrar variaciones, razón por la cual en este punto la presión estática es cero. A lo largo de la pared superior del cilindro, se presenta una distribución en donde los puntos de mayor presión se encuentra en las tomas estáticas ubicadas en las zonas próximas al borde del cilindro. Este comportamiento se debe al incremento de la presión que se da por el impacto del flujo con la pared del cilindro. A medida que se desplaza hacia el borde de salida del rectángulo, la presión disminuye y tiende a permanecer estable. Las distribuciones presentadas, tienen la forma de las distribuciones observadas en el Multimanómetro de presión. Por lo cual se establece que los datos de Coeficiente de Presión presentados en las gráficas, concuerdan con los desplazamientos en las columnas de agua observados en el instrumento de medición. La Figura 5-24 presenta la fotografía de una de las distribuciones de presión tomada durante las pruebas experimentales. Como se observa, las presiones se encuentran por encima del cero establecido formando un domo positivo, lo cual indica dos aspectos importantes. El primero es que el Túnel de Viento ejerce succión sobre la corriente de aire, razón por la cual es agua se desplaza hacia la salida de las mangueras que van hacia las Tomas Estáticas. El segundo aspecto ratifica lo mencionado anteriormente, es decir que las presiones generadas por las tomas estáticas no sobrepasan la presión atmosférica.

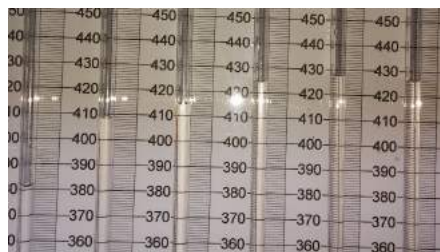
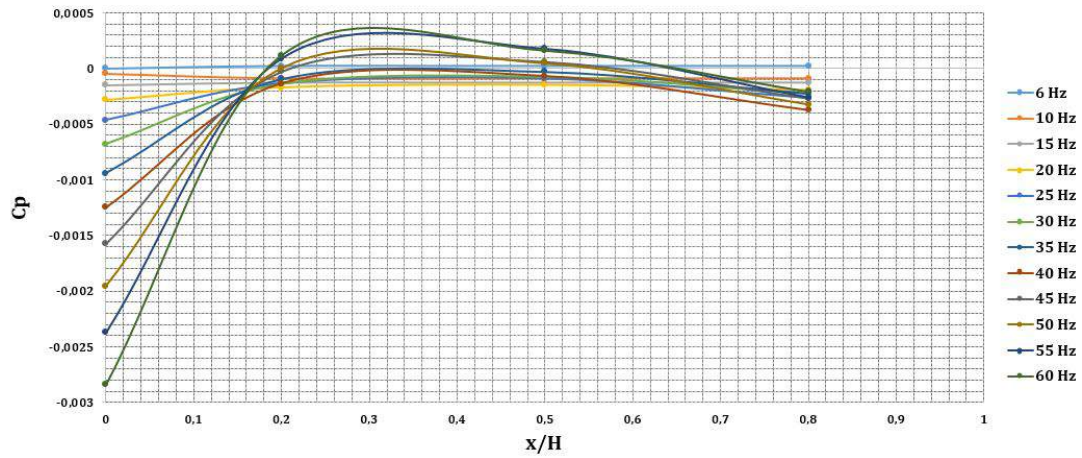
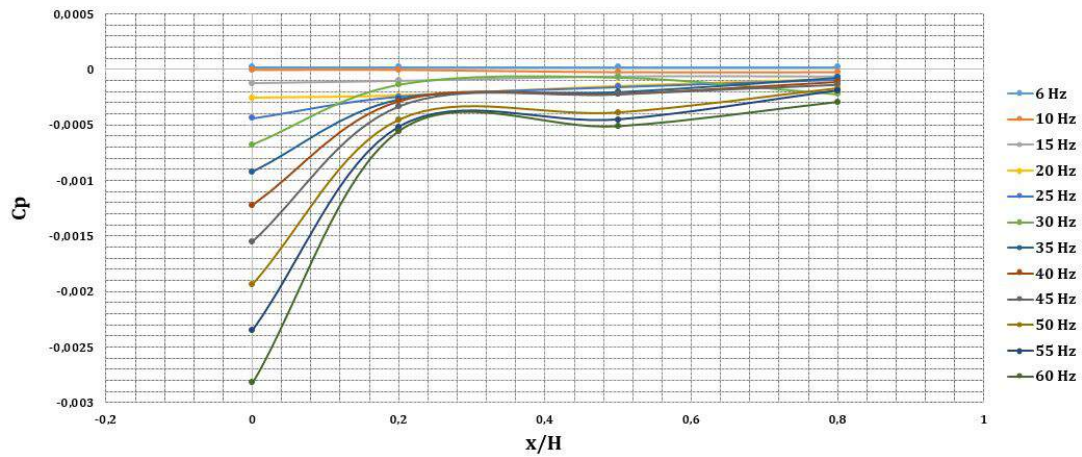


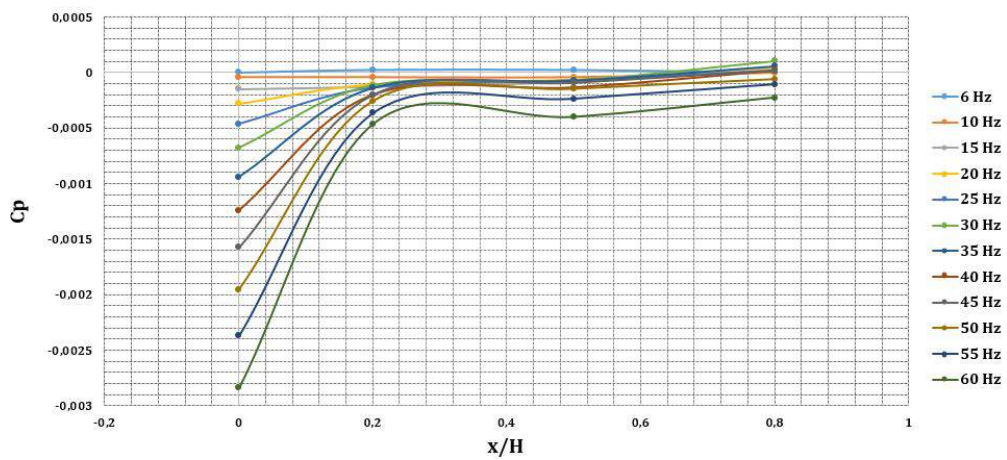
Figura 5-24.: Caso de Flujo Externo - Fotografía Distribución de Presión Pruebas Experimentales.



(a) Cilindro 5x5.

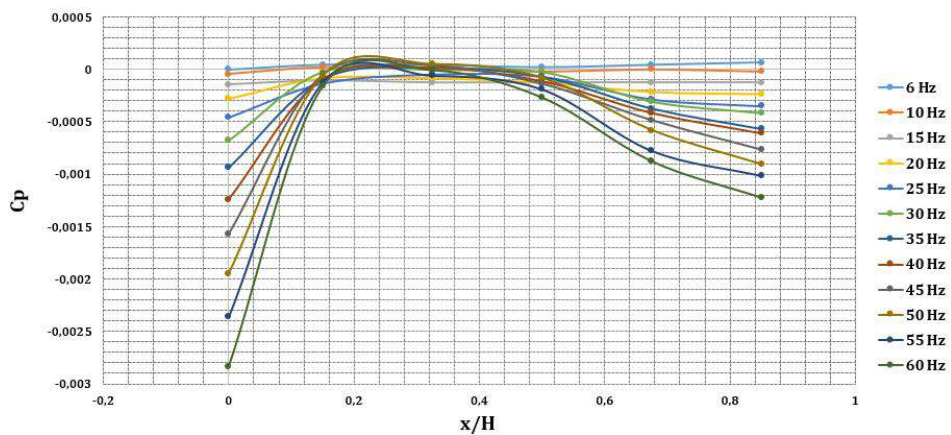


(b) Cilindro 5x10.

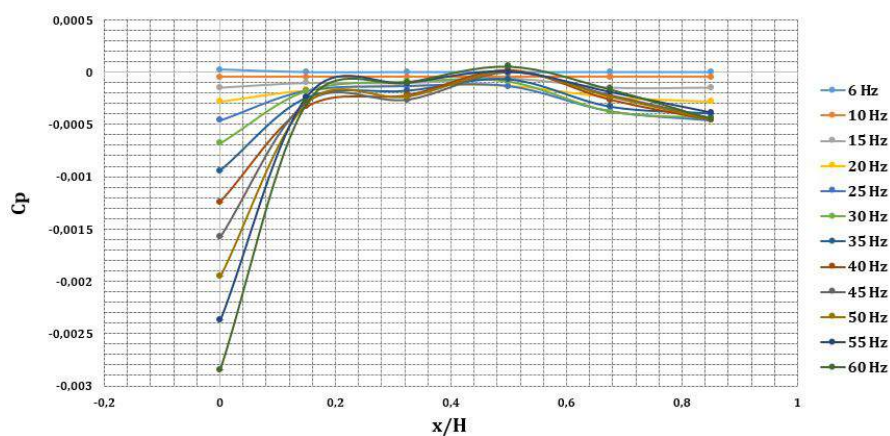


(c) Cilindro 5x15.

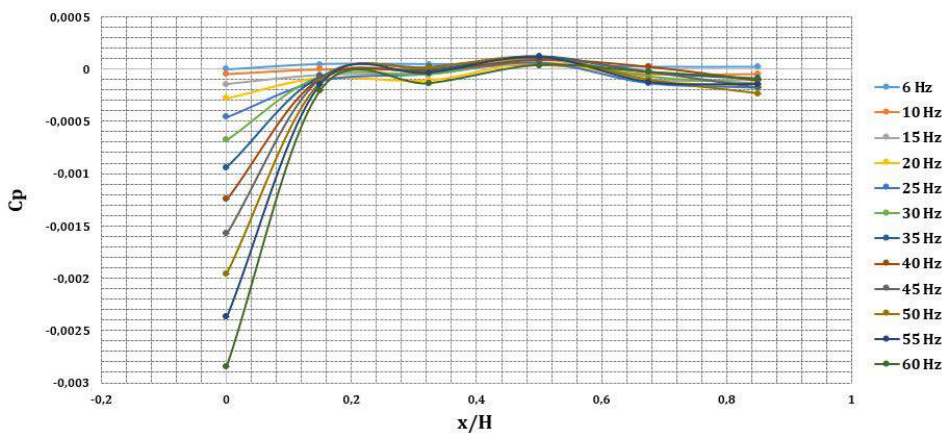
Figura 5-25.: Caso de Flujo Externo - Distribución de Presión Cilindros Rectangulares 5x5, 5x10, 5x15.



(a) Cilindro 10x5.

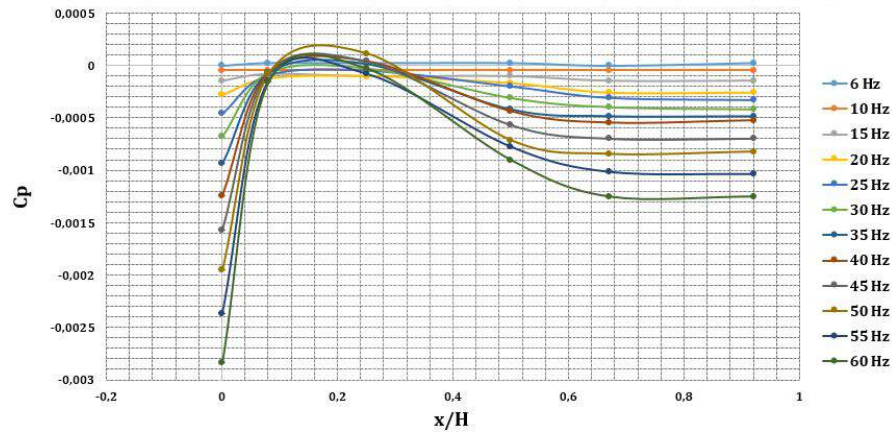


(b) Cilindro 10x10.

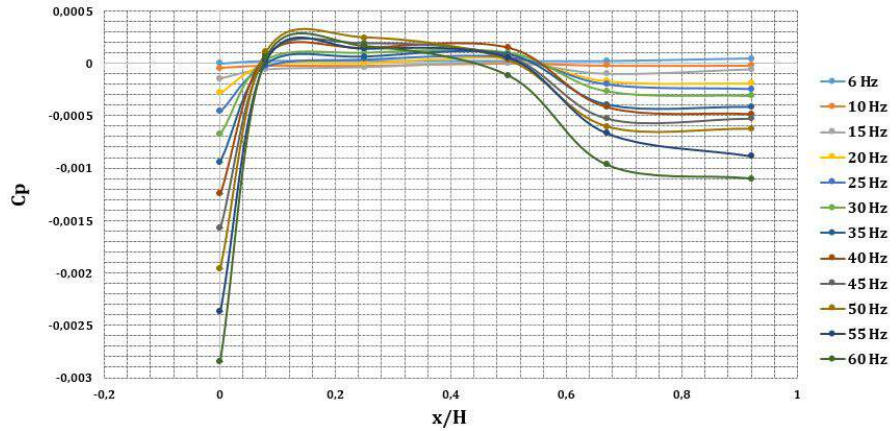


(c) Cilindro 10x15.

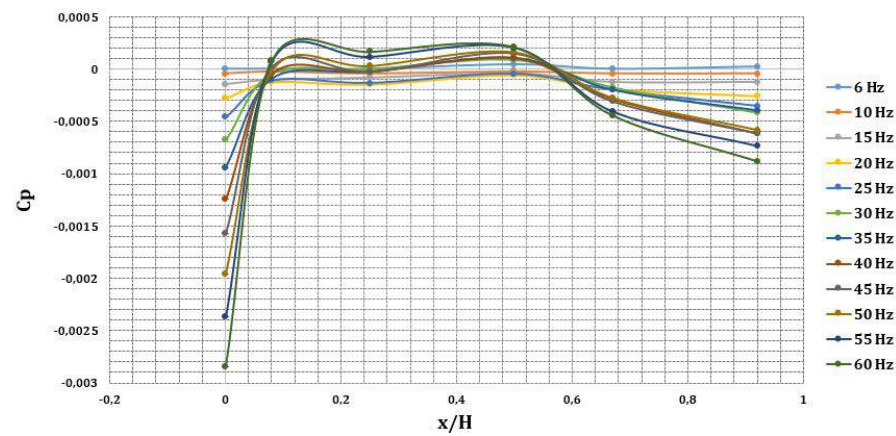
Figura 5-26.: Caso de Flujo Externo - Distribución de Presión Cilindros Rectangulares 10x5, 10x10, 10x15.



(a) Cilindro 15x5.



(b) Cilindro 15x10.



(c) Cilindro 15x15.

Figura 5-27.: Caso de Flujo Externo - Distribución de Presión Cilindros Rectangulares 15x5, 15x10, 15x15.

6. SIMULACIONES Vs DATOS EXPERIMENTALES

El modelo matemático empleado para las simulaciones es validado respecto a datos encontrados en la bibliografía. Estos resultados se presentan en la Sección 3.5, para los cuales se establece que los coeficientes aerodinámicos obtenidos en las simulaciones concuerdan con los coeficientes aerodinámicos presentados en la literatura.

Empleando este modelo matemático para predecir el comportamiento de la corriente de aire al interior de la Zona de Pruebas del Túnel de Viento, se realizan simulaciones de perfil de velocidad, distribución de presión y caso de flujo externo, sobre un dominio cuyas condiciones de frontera y parámetros de flujo, concuerdan con las especificaciones técnicas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

De acuerdo a lo anterior se presenta el siguiente capítulo, en donde se relacionan los análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones de perfil de velocidad, distribución de presión y caso de flujo externo, respecto a los resultados obtenidos de forma experimental en Zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

6.1. Perfil de Velocidad

La Figura **6-1** presenta los resultados de perfil de velocidad obtenidos en las simulaciones y los resultados obtenidos en las pruebas experimentales. Los datos corresponden solo a las Frecuencias de Operación de 6 Hz y 60 Hz, que fueron las variantes empleadas en los estudios computacionales.

De acuerdo a lo observado de forma experimental, a bajas frecuencias de operación la corriente de flujo no es estable, razón por la cual el perfil de velocidad experimental para la frecuencia de 6 Hz presenta un comportamiento diferente a lo predicho en las simulaciones. Para la frecuencia de 60 Hz los resultados de las simulaciones coinciden con los resultados obtenidos de forma experimental.

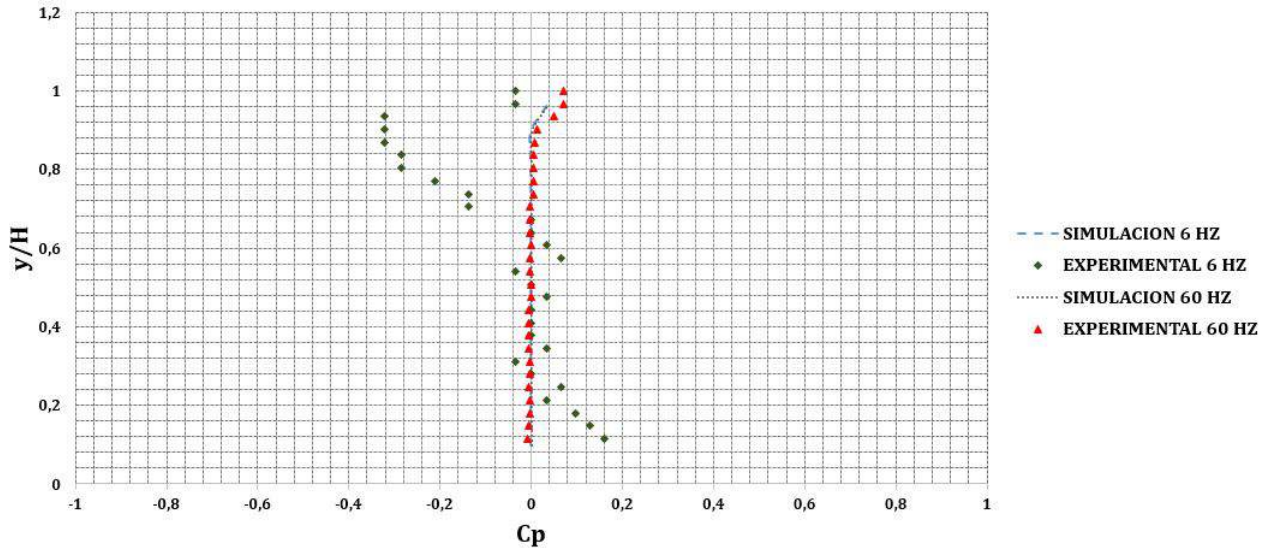


Figura 6-1.: Simulaciones Vs Datos Experimentales - Perfil de Velocidad

6.2. Distribución de Presión

De acuerdo a lo establecido en los estudios de Configuración de Presión (Ver Sección 3.8), se ubican tomas de presión estática a lo largo de la línea central de la pared superior y de la pared inferior de la Zona de Pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

Tal como se observa en la Figura 6-2, la distribución de presión sobre la pared superior de los datos obtenidos mediante simulaciones para la Frecuencia de 6 Hz, presenta un buen comportamiento respecto a los datos obtenidos de forma experimental para la misma frecuencia.

Los resultados obtenidos en las simulaciones para la Frecuencia de 60 Hz, se acercan al patrón obtenido de forma experimental, por lo cual se concluye que los parámetros de flujo obtenidos en las simulaciones son válidos.

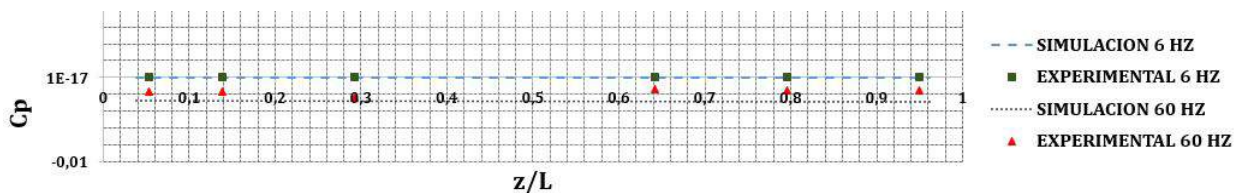


Figura 6-2.: Simulaciones Vs Datos Experimentales - Distribución de Presión Tomas Superiores

La Figura 6-3 presenta las distribuciones de presión obtenidas para la pared inferior. Al

igual que lo ocurrido en la pared superior, se evidencian concordancia en cuanto a los resultados de las simulaciones respecto a datos experimentales a la Frecuencia de 6 Hz. En cuanto a la frecuencia de 60 Hz, los resultados obtenidos en las simulaciones presentan un comportamiento similar al los resultados obtenidos de forma experimental.

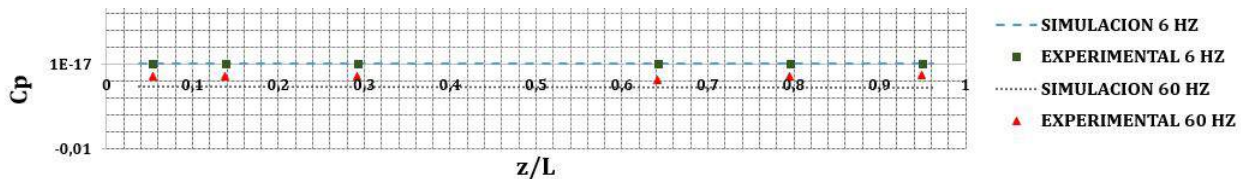


Figura 6-3.: Simulaciones Vs Datos Experimentales - Distribución de Presión Tomas Inferiores

6.3. Caso de Flujo Externo

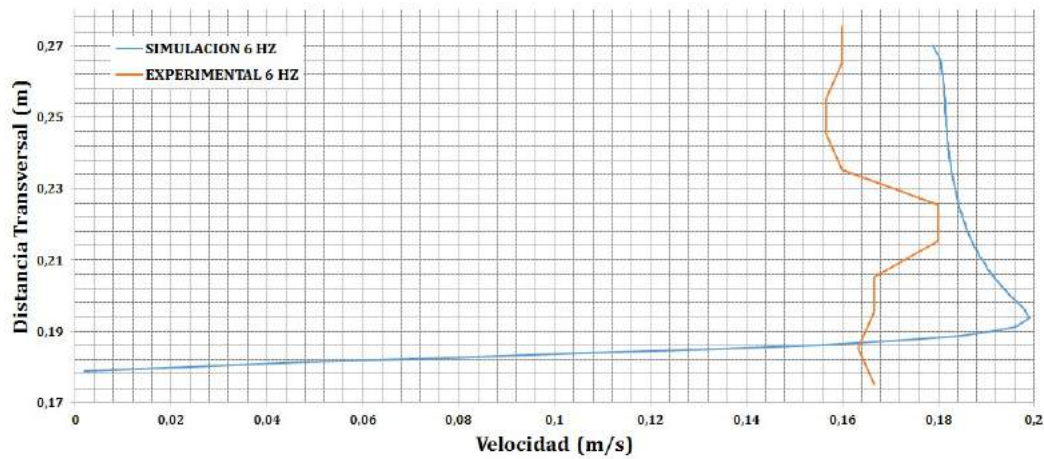
En los estudios de Caso de Flujo Externo presentados en la Sección 3.9, se analiza los perfiles de velocidad y las distribuciones de presión de cuatro configuraciones ($3x3$, $5x5$, $10x10$, $15x15$), de las cuales se concluye que la configuración de $3x3$ posee las dimensiones adecuadas para tener condiciones de similitud de flujo al interior del dominio establecido, sin ninguna influencia por parte de la geometría del modelo.

De forma experimental, se opta por estudiar nueve configuraciones ($5x5$, $5x10$, $5x15$, $10x5$, $10x10$, $10x15$, $15x5$, $15x10$, $15x15$) que permitan establecer cual es la limitante en cuanto a volúmen, con la cual se puedan obtener condiciones de similitud de flujo sin que la corriente de aire sea afectada por la geometría del modelo (Ver Sección 5.9). A partir de estas pruebas se concluye que la configuración de $10x5$ respresenta el límite en donde se pueden tener condiciones de similitud de flujo sin mayor influencia por parte de la geomtería del modelo. De acuerdo a lo anterior se procede a verificar si los resultados obtenidos mediante las simulaciones concuerdan con los resultados obtenidos de forma experimental, y de esta forma establecer la configuración de $3x3$ como parámetro recomendado para el dimensionamiento de los modelos al interior de la Zona de Pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

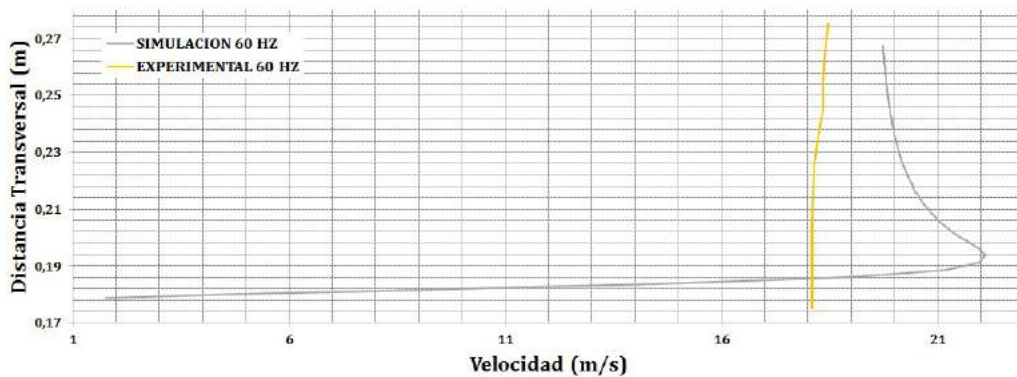
6.3.1. Caso de Flujo Externo - Perfil de Velocidad

En las Figuras 6-4, 6-5 y 6-6, se presentan los perfiles de velocidad para las Frecuencias de operación de 6 Hz y 60 Hz, de las configuraciones de Cilindro Rectangular de $5x5$, $10x10$ y $15x15$. De forma gráfica se observa que los resultados de las simulaciones logran captar la disminución de velocidad que se presenta en las zonas aledañas a la pared del cilindro. Caso que no ocurre de forma experimental ya que el Tubo Pitot-Estático empleado para las mediciones, por el diámetro de la sonda, no permite tomar datos de velocidad en estas zonas.

Es por esto que en los perfiles de velocidad obtenidos de forma experimental no se registra las velocidades cercanas a cero en las paredes del rectángulo.

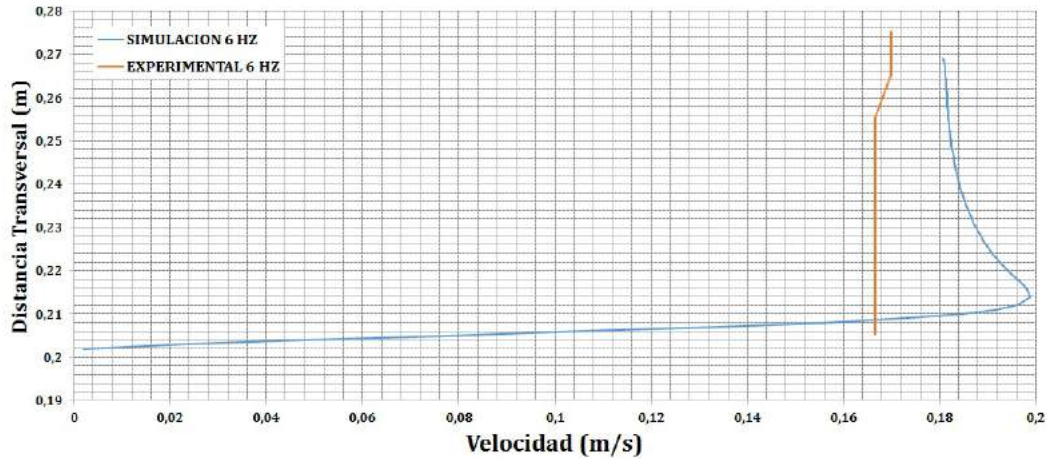


(a) 6 Hz

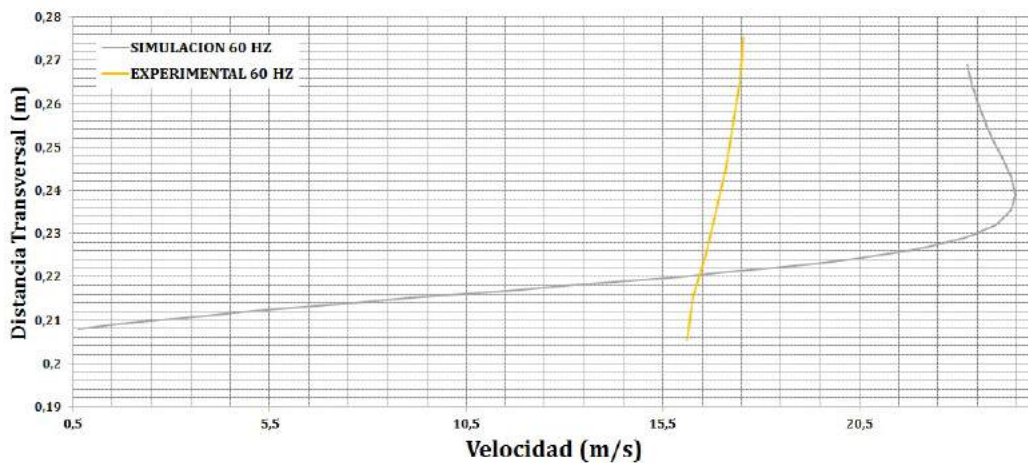


(b) 60 Hz

Figura 6-4.: Simulaciones Vs Datos Experimentales - Perfil de Velocidad. Frecuencias de Operación de 6 Hz y 60 Hz. Cilindro Rectangular 5x5.



(a) 6 Hz

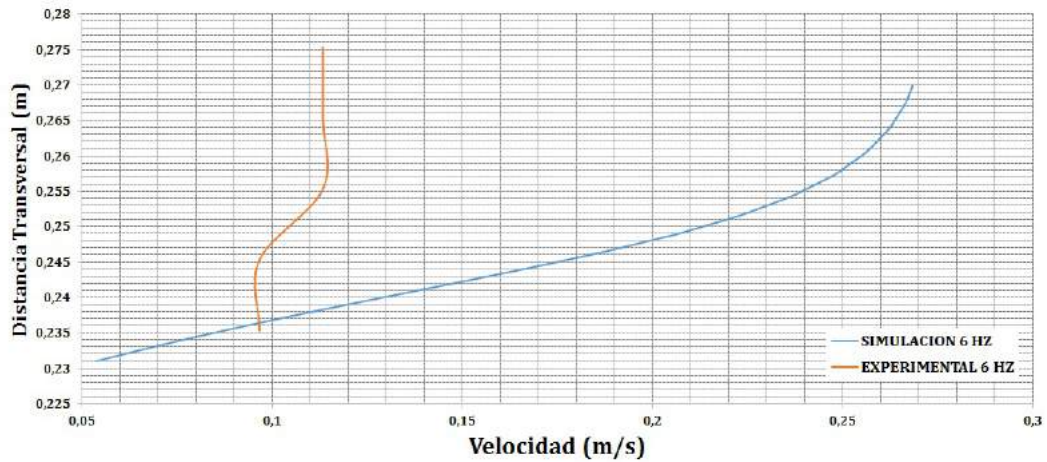


(b) 60 Hz

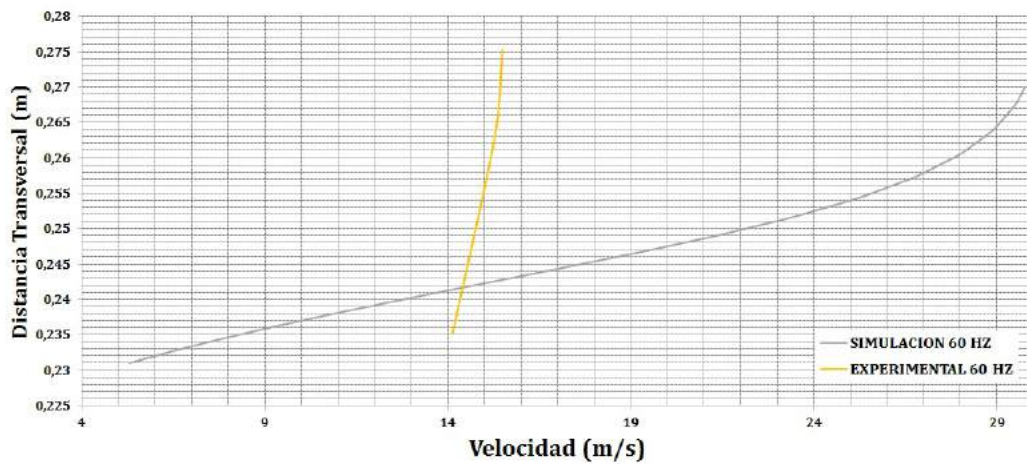
Figura 6-5.: Simulaciones Vs Datos Experimentales - Perfil de Velocidad. Frecuencias de Operación de 6 Hz y 60 Hz. Cilindro Rectangular 10x10.

La forma de los perfiles de la configuración de 5×5 obtenidos en las simulaciones, presentan un comportamiento similar a los obtenidos de forma experimental. En estos se evidencia un incremento de la velocidad en la zona cercana a la pared del Cilindro Rectangular, y una

disminución progresiva hasta que la velocidad permanece constante a medida que se acerca a la pared del Túnel.



(a) 6 Hz



(b) 60 Hz

Figura 6-6.: Simulaciones Vs Datos Experimentales - Perfil de Velocidad. Frecuencias de Operación de 6 Hz y 60 Hz. Cilindro Rectangular 15x15.

En las configuraciones de 10×10 y 15×15 , los perfiles de velocidad obtenidos en las simula-

ciones tienden a presentar una forma similar a los perfiles de velocidad obtenidos de forma experimental. Sin embargo se presenta un desfase en los coeficientes lo cual indica que los datos de velocidad registrados en las simulaciones son mucho mayores a los datos de velocidad registrados de forma experimental.

6.3.2. Caso de Flujo Externo - Distribución de Presión

Las Figuras 6-7, 6-8 y 6-9, presentan los resultados de distribución de presión obtenidos para las frecuencias de operación de 6 Hz y 60 Hz.

Debido al el tamaño de las mangueras adaptadas para la toma de datos de presión estática de forma experimental, el espacio al interior de los Cilindros Rectangulares solo permite la inserción de cuatro tomas estáticas para los cilindros cuya medida nominal es 5 cm , y seis tomas estáticas para las configuraciones restantes. Por esta razón, las gráficas de distribución de presión experimentales solo presentan datos de una parte de la sección del cilindro rectangular, por lo tanto, para la comparación directa de resultados, se toman los datos de las simulaciones pertenecientes a la sección analizada de forma experimental.

Al observar las gráficas se establece que para las frecuencia de 6 Hz los datos obtenidos en las simulaciones concuerdan con los datos obtenidos de forma experimental. En cuanto a la frecuencia de 60 Hz, se evidencian un desfase pequeño de los Coeficientes de Presión de las simulaciones respecto a los Coeficientes de Presión obtenidos de forma experimental, pero se validan los resultados.

Por otra parte, las distribuciones observadas en las simulaciones presentan el mismo comportamiento al evidenciado en el Multimanómetro de Presión que se usó para el registro de datos.

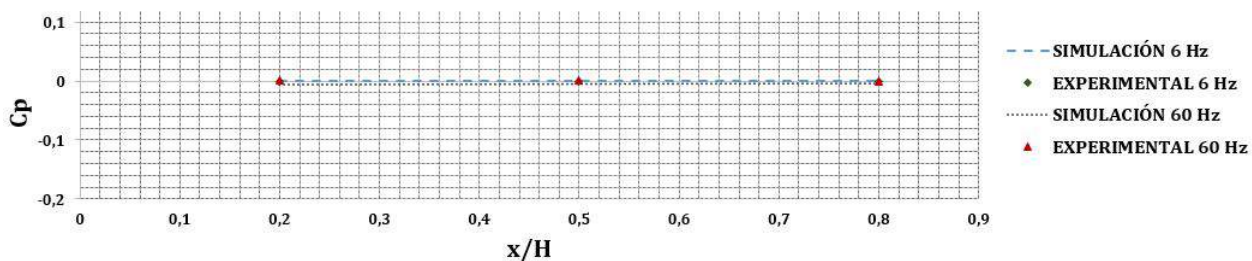


Figura 6-7.: Simulaciones Vs Datos Experimentales - Distribución de Presión. Frecuencias de Operación de 6 Hz y 60 Hz. Cilindro Rectangular 5x5.

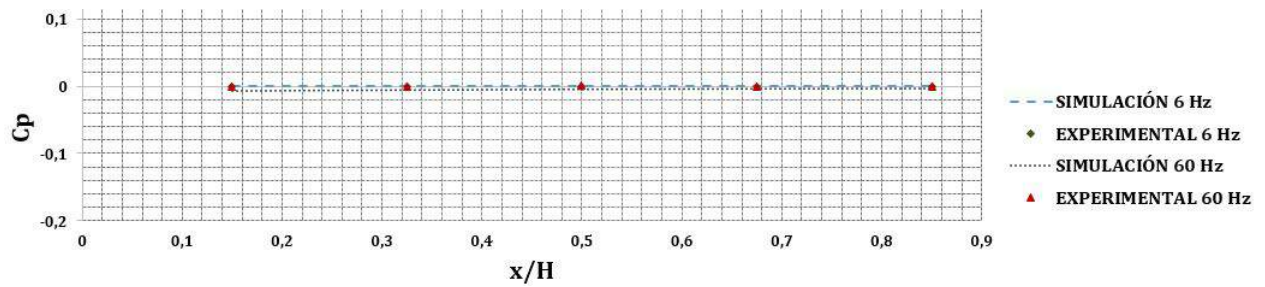


Figura 6-8.: Simulaciones Vs Datos Experimentales - Distribución de Presión. Frecuencias de Operación de 6 Hz y 60 Hz. Cilindro Rectangular 10x10.

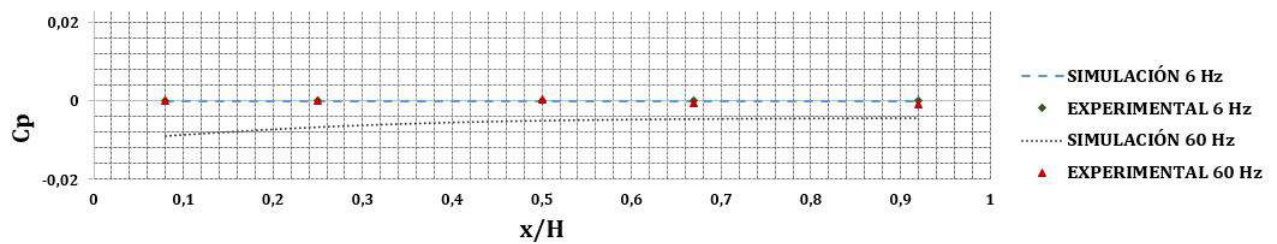


Figura 6-9.: Simulaciones Vs Datos Experimentales - Distribución de Presión. Frecuencias de Operación de 6 Hz y 60 Hz. Cilindro Rectangular 15x15.

7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1. Conclusiones

En el presente proyecto de investigación se caracterizó, verificó y validó el diseño del Túnel de Viento Subsónico de Circuito Abierto de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, estableciendo los parámetros y características operacionales para el desarrollo de actividades de docencia e investigación en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica.

Dentro del estudio se hicieron pruebas preliminares con el fin de establecer las condiciones operacionales con las que cuenta el Túnel de Viento. A partir de esto, se realizó el mejoramiento del diseño del sistema de potencia y el sistema de juntas, y se implementaron sistemas de visualización de flujo y tomas estáticas para lecturas de presión. Adicional a esto se implementó un generador de humo y un multimanómetro de diferencial de presión con mesa inclinable para el desarrollo de pruebas experimentales en el Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

Se desarrollaron estudios computacionales de perfil de Velocidad, configuración de tomas de presión y caso de flujo externo, para los cuales se emplea un modelo de turbulencia RANS. Este modelo es validado con datos experimentales y computacionales reportados en la bibliografía. A partir de estos estudios se definieron los puntos de ubicación de las tomas estáticas y el volumen apropiado para los modelos en la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01.

Se tomó como caso de flujo externo, el estudio de configuraciones de cilindro rectangular de relación de aspecto 1. Esta configuración permitió establecer que tanto influye el volumen de un modelo cualquiera en las condiciones de flujo al interior de la zona de pruebas.

Se definieron las características de la corriente de aire al interior del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, mediante el desarrollo de pruebas experimentales. A partir de estos estudios se obtuvieron los parámetros de operación y flujo mencionados en el manual de operaciones y especificaciones técnicas proporcionado con el banco de pruebas.

Por último, se realizó la validación de los estudios Computacionales desarrollados con los parámetros del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, con los resultados obtenidos de las

pruebas experimentales.

Como conclusiones generales del trabajo desarrollado se tiene que:

- La zona de pruebas posee un flujo homogéneo lo cual indica que las paredes y los instrumentos no alteran significativamente las condiciones de la corriente de aire y las propiedades cinemáticas del fluido.
- La velocidad y la presión al interior de la zona de pruebas permanece estable sin variaciones significativas durante el desarrollo de las pruebas. Razón por la cual la forma de los perfiles presentados en el documento, tienen un comportamiento lineal en la zona central del dominio, con pendientes en las zonas adyacentes a las paredes.
- De acuerdo a las pruebas experimentales, se evidencia que la velocidad y presión se mantienen constantes a lo largo de la sección comprendida entre 5 cm y 250 cm , mientras que en las zona adyacentes a estas, se empieza a observar una disminución de la velocidad del rango de $0,1\text{ m/s}$. Este comportamiento indica que las condiciones de flujo cambian por el efecto que tiene la pared sobre la corriente de aire, lo cual permite la ubicación de la capa límite en esta área.
- Los acoples del generador de humo y las tapas de manipulación para los modelos, proporcionan perturbaciones en las zonas cercanas a su ubicación, sin embargo la corriente de aire no es alterada por las condiciones de flujo en estos puntos.
- El rango de velocidades manejado en el Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 se encuentra en promedio entre $0,2\text{ m/s}$ y $18,83\text{ m/s}$. Sin embargo y de acuerdo a lo observado en las pruebas experimentales, el rango operacional para el banco de pruebas se debe tomar a partir de la frecuencia de 15 Hz . Esto se debe a que a bajas frecuencias de operación las condiciones de flujo no son estables, como se observó en los perfiles de velocidad y presión, lo cual puede llevar a alteraciones en las condiciones de similitud de flujo cuando se este estudiando las características aerodinámicas de un modelo.
- Las condiciones de flujo al interior de la zona de pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, estan influenciadas por las condiciones ambiente que se tengan durante el desarrollo de la prueba experimental, y en caso de que se este estudiando un modelo, por la geometría y dimensiones que este presente.

Para obtener condiciones de similitud de flujo al interior de la Zona de Pruebas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 que permitan el desarrollo de pruebas experimentales de casos de flujo externo, se recomienda un modelo cuyo volúmen no sobrepase 3 cm de alto, 3 cm de ancho y 3 cm de largo. En caso de que no se necesiten condiciones estrictas de similitud de flujo, el modelo puede alcanzar un volúmen de 10 cm de alto, 5 cm de ancho y 10 cm de largo.

El diseño y la instrumentación implementada en el banco de pruebas permite a un estudiante aplicar sus conocimientos de dinámica de fluidos de forma experimental. Esto se observó durante el desarrollo de pruebas piloto con estudiantes de Ingeniería Mecánica que hicieron uso del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 como herramienta para el desarrollo de pruebas de perfil de velocidad y presión, por lo cual se concluye que el Túnel posee los requerimientos especificados por la Universidad para docencia y desarrollo de actividades académicas.

7.2. Recomendaciones

Dentro de manual de operaciones y especificaciones técnicas del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, se encuentran todos los procedimientos para el desarrollo de pruebas experimentales, mantenimiento, despiece del banco de pruebas y recomendaciones en general.

Se recomienda como trabajo a futuro automatizar la adquisición de datos del Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01, ya que la recolección de datos durante pruebas experimentales se hace de forma análoga.

Debido a que el Tubo Pitot-Estático empleado para el desarrollo de pruebas experimentales no posee la configuración apta para la toma de datos en las zonas cercanas a la pared, se recomienda adquirir instrumentación apropiada que permita determinar los fenómenos presentados en esta zona.

A. Anexo A: RECURSOS COMPUTACIONALES

ESTUDIO	CPU	VERSIÓN OpenFoam
V-M Re=5.000,13.000	1	2.4.0
V-M Re=10.000	2	3.0.0
EIM-SM 6 y 60 Hz-Malla 1,2,3,4,5	1	2.4.0
EIM-SM 6 y 60 Hz-Malla 6	2	3.0.0
EIM-CM 10 Hz-Malla 1,2,5	1	2.4.0
EIM-CM 10 Hz-Malla 3,4,6,7	2	3.0.0
E-PV 6 y 60 Hz	2	3.0.0
ETP-SM 6 Hz-Config 1 y 2	1	2.4.0
ETP-SM 60 Hz-Config 2	2	3.0.0
ETP-SM 60 Hz-Config 1	1	2.4.0
ETP-CM 6 Hz-Config 1 5X5	1	2.4.0
ETP-CM 6 Hz-Config 1 15X15	2	3.0.0
ETP-CM 6 Hz-Config 2 5X5, 15X15	1	2.4.0
ETP-CM 60 Hz-Config 1 5X5, 15X15	2	3.0.0
ETP-CM 60 Hz-Config 2 5X5, 15X15	1	2.4.0
EC-FE 6 Hz-3x3, 5x5, 10x10, 15x15	2	3.0.0
EC-FE 60 Hz-3x3, 5x5, 10x10, 15x15	2	3.0.0

V-M=Validación Modelo.

EIM-SM=Estudios de Independencia de Malla Sin Modelo.

EIM-CM=Estudios de Independencia de Malla Con Modelo.

E-PV=Estudio Perfil de Velocidad.

ETP-SM=Estudios Configuración Tomas de Presión Sin Modelo.

ETP-CM=Estudios Configuración Tomas de Presión Con Modelo.

EC-FE=Estudio Caso de Flujo Externo.

Tabla A-1.: Recursos Computacionales

B. Anexo B: VALIDACIÓN MODELO

AUTOR	MÉTODO	REYNOLD	C_D	C'_D	C_L	C'_L	Cl_{rms}	St
K. Shimada & T. Ishihara (2002)	RANS	22.000	2,05	0,093	-	1,43	-	0,141
S. Murakami & A. Mochida (1995)	LES	26.400	2,09	0,13	-	1,6	-	0,132
Sercan Yagmur et All (2015)	LES	5.000	1.77	-	-	-	-	-
Sercan Yagmur et All (2015)	LES	10.000	1.78	-	-	-	-	-
Claudio Mannini (2015)	URANS	26.400	1,91	0,28	-	1,14	-	0,12
Claudio Mannini et All (2011)	DES	26.400	1,016	0,055	0,047	0,553	-	0,103
Xinliang Tian et All (2013)	RANS	21.400	2,06	-	-	-	1,492	0,138
R. Frankel & W. Rodi	RANS	22.000	1,89	$\simeq 0$	-	0,883	-	-
W. Rodi (1997)	RANS	22.000	1,64	$\simeq 0$	-	0,305	-	0,134
M. Elkhoury (2016)	URANS	22.000	2,1299	-	-	-	-	0,128
D. A. Lyn et All (1995)	Exp.	21.000	2,1	-	-	-	-	0,13
C. Norberg (1993)	Exp.	13.000	2,16	-	-	-	-	0,132
C. Norberg (1993)	Exp.	5.000	2,21	-	-	-	-	0,129
Presente	RANS	5.000	2,011	0,026	0,012	0,59	0,67	0,132
Presente	RANS	10.000	2,20	0,065	0,004	0,84	0,94	0,149
Presente	RANS	13.000	1,97	0,028	0,005	0,011	0,80	0,132

Tabla B-1.: Validación Modelo - Propiedades Aerodinámicas Cilindro Rectangular $AR = 1$.

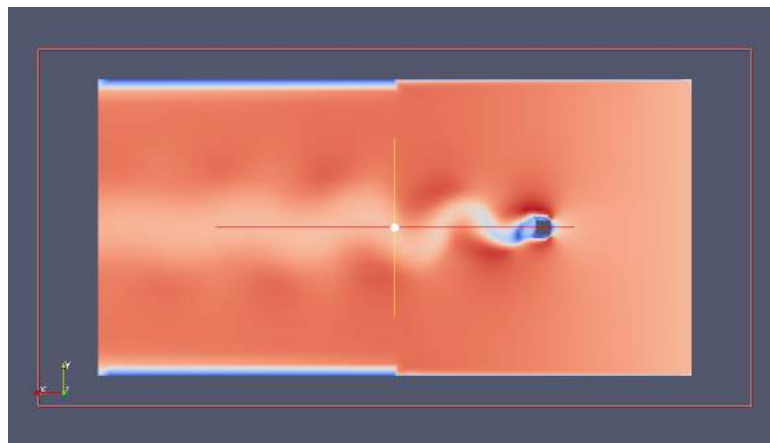


Figura B-1.: Validación Modelo - Reynolds 5000.

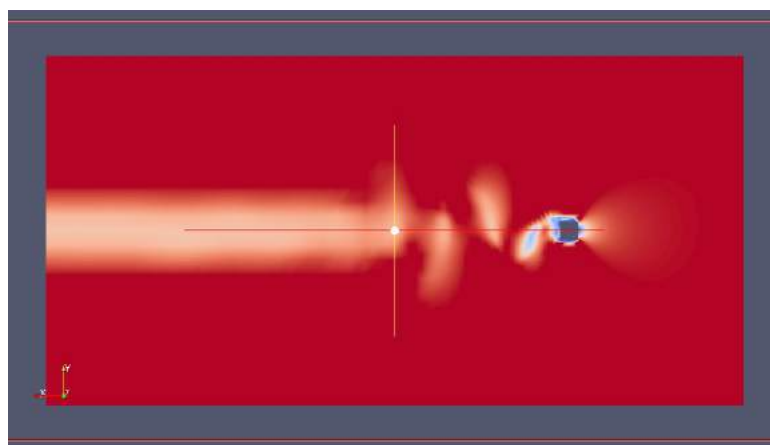


Figura B-2.: Validación Modelo - Reynolds 10000.

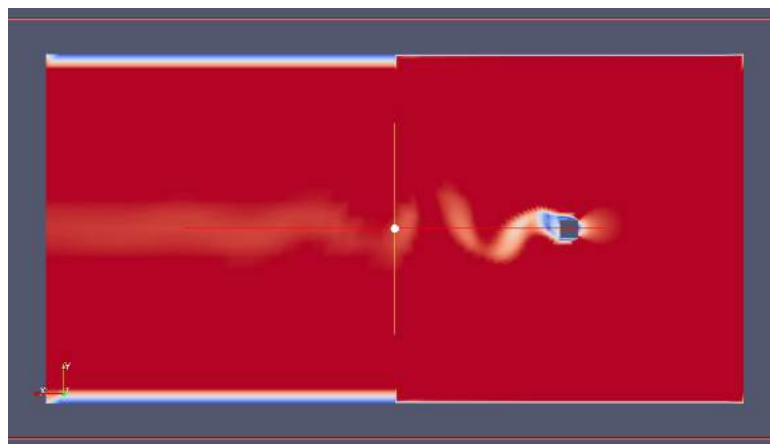


Figura B-3.: Validación Modelo - Reynolds 13000.

C. Anexo C: ESTUDIOS DE INDEPENDENCIA DE MALLA.

C.1. Dominio Sin Modelo

Malla	1	2	3	4	5	6
Media	7,36	0,29	0,40	0,21	0,16	0,07
Desv. Estándar	4,29	0,34	1,05	0,03	0,05	0,06
Varianza	18,43	0,11	1,10	0,0009	0,002	0,004
Coef de Var	1,71	0,86	0,38	6,90	3,08	1,24
Valor Min	2,98	0,18	0,10	0,20	0,14	0,06
Valor Max	15,35	1,48	4,05	0,32	0,34	0,30

Tabla C-1.: Estudio de Independencia de Malla Dominio sin Modelo - Datos Estadísticos 6 Hz.

Malla	1	2	3	4	5	6
Media	0,73	0,17	0,24	0,06	0,08	0,03
Desv. Estándar	0,35	0,32	0,69	0,08	0,11	0,05
Varianza	0,12	0,10	0,48	0,006	0,01	0,003
Coef de Var	2,06	0,54	0,35	0,84	0,74	0,65
Valor Min	0,30	0,024	0,004	0,0005	0,001	0,002
Valor Max	1,69	1,26	2,65	0,30	0,45	0,22

Tabla C-2.: Estudio de Independencia de Malla Dominio sin Modelo - Datos Estadísticos 60 Hz.

C.2. Dominio Con Modelo

%Error Malla1-Malla2	P	12,26
	UMean	2,50
%Error Malla2-Malla3	P	2,79
	UMean	0,28
%Error Malla3-Malla4	P	4,33
	UMean	1,78
%Error Malla4-Malla5	P	2,33
	UMean	0,60
%Error Malla5-Malla6	P	0,37
	UMean	0,16
%Error Malla6-Malla7	P	0,24
	UMean	0,07

Tabla C-3.: Estudio de Independencia de Malla Dominio con Modelo - Porcentaje de Error entre Mallas.

D. Anexo D: ESTUDIOS PERFIL DE VELOCIDAD

ALTURA ZONA DE PRUEBAS (mm)	PROBE	VEL 6Hz (m/s)	VEL 60Hz (m/s)
29,6	0	0,1627	19,0084
49,6	1	0,1627	19,0261
69,6	2	0,1627	19,0283
89,6	3	0,1627	19,0268
109,6	4	0,1627	19,0246
129,6	5	0,1627	19,0235
149,6	6	0,1627	19,0229
169,6	7	0,1627	19,0235
189,6	8	0,1627	19,0246
209,6	9	0,1627	19,0268
229,6	10	0,1627	19,0283
249,6	11	0,1627	19,0261
269,6	12	0,1627	19,0084
289,6	13	0,1598	18,6604

Tabla D-1.: Estudios Perfil de Velocidad - Datos de Velocidad Sección Transversal

ERROR (%)		
PROBE	6Hz	60Hz
0	3,84	0,37
1	2,38	0,57
2	4,29	0,69
3	7,91	0,72
4	4,3	1,21
5	4,3	1,02
6	4,3	1,11
7	4,3	0,81
8	4,3	0,85
9	4,29	0,79
10	9,61	0,82
11	16,20	0,80
12	16,20	1,18
13	14,14	1,33

Tabla D-2.: Estudios Perfil de Velocidad - Porcentaje de Error Datos de Velocidad Sección Transversal

E. Anexo E: ESTUDIOS CONFIGURACIÓN TOMAS DE PRESIÓN

Probe	0i	1i	2i	3i	4i	5i	6i	0s	1s	2s	3s	4s	5s	6s
X	0,025	0,125	0,225	0,325	0,425	0,525	0,625	0,025	0,125	0,225	0,325	0,425	0,525	0,625
Y	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299	0,299
Z	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

i= Parte Inferior. Dominio

s= Parte Superior. Dominio

Tabla E-1.: Estudios Configuración Toma de Presión - Posición *Probes* Configuración 1.

Probe	Parte Inferior Dominio			Probe	Parte Superior Dominio		
	X	Y	Z		X	Y	Z
0i-iz	0,025	0,001	0,1	0s-iz	0,025	0,299	0,1
1i-iz	0,125	0,001	0,1	1s-iz	0,125	0,299	0,1
2i-iz	0,225	0,001	0,1	2s-iz	0,225	0,299	0,1
3i-iz	0,325	0,001	0,1	3s-iz	0,325	0,299	0,1
4i-iz	0,425	0,001	0,1	4s-iz	0,425	0,299	0,1
5i-iz	0,525	0,001	0,1	5s-iz	0,525	0,299	0,1
6i-iz	0,625	0,001	0,1	6s-iz	0,625	0,299	0,1
0i-de	0,025	0,001	0,2	0s-de	0,025	0,299	0,2
1i-de	0,125	0,001	0,2	1s-de	0,125	0,299	0,2
2i-de	0,225	0,001	0,2	2s-de	0,225	0,299	0,2
3i-de	0,325	0,001	0,2	3s-de	0,325	0,299	0,2
4i-de	0,425	0,001	0,2	4s-de	0,425	0,299	0,2
5i-de	0,525	0,001	0,2	5s-de	0,525	0,299	0,2
6i-de	0,625	0,001	0,2	6s-de	0,625	0,299	0,2

iz= Parte Izquierda. Dominio

de= Parte Derecha. Dominio

Tabla E-2.: Estudios Configuración Toma de Presión - Posición *Probes* Configuración 2.

F. Anexo F: ESTUDIOS CASO FLUJO EXTERNO

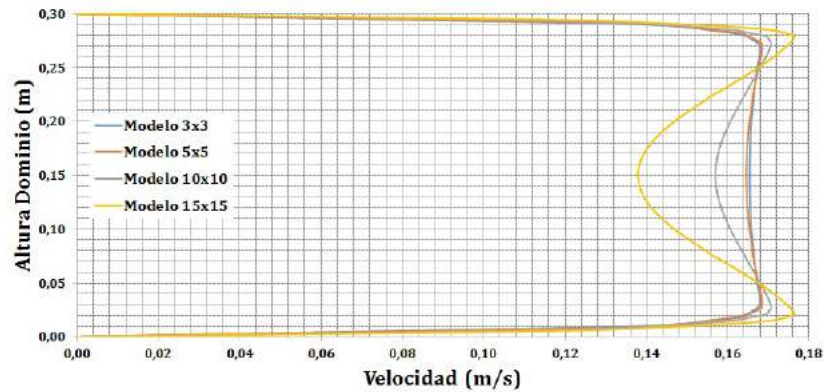
PUNTO	EJE X (m) (Vertical)			PUNTO	EJE Y (m)			PUNTO	EJE Z (m)		
	X	Y	Z		X	Y	Z		X	Y	Z
P0X	0	0-0,30	0,15	P0X	0,325	0,03	0,03-0,27	P0X	0,325	0,03-0,27	0,03
P1X	0,025	0-0,30	0,15	P1X	0,325	0,05	0-0,30	P1X	0,325	0-0,30	0,05
P2X	0,225	0-0,30	0,15	P2X	0,325	0,09	0-0,30	P2X	0,325	0-0,30	0,09
P3X	0,325	0-0,30	0,15	P3X	0,325	0,12	0-0,30	P3X	0,325	0-0,30	0,12
P4X	0,425	0-0,30	0,15	P4X	0,325	0,15	0-0,30	P4X	0,325	0-0,30	0,15
P5X	0,525	0-0,30	0,15	P5X	0,325	0,18	0-0,30	P5X	0,325	0-0,30	0,18
P6X	0,625	0-0,30	0,15	P6X	0,325	0,21	0-0,30	P6X	0,325	0-0,30	0,21
P7X	0,65	0-0,30	0,15	P7X	0,325	0,21	0-0,30	P7X	0,325	0-0,30	0,25
				P8X	3,125	0,27	0,03-0,27	P8X	0,325	0,03-0,27	0,27

Tabla F-1.: Anexo Coordenadas X, Y, Z, Puntos de Medición Caso Flujo EXterno.

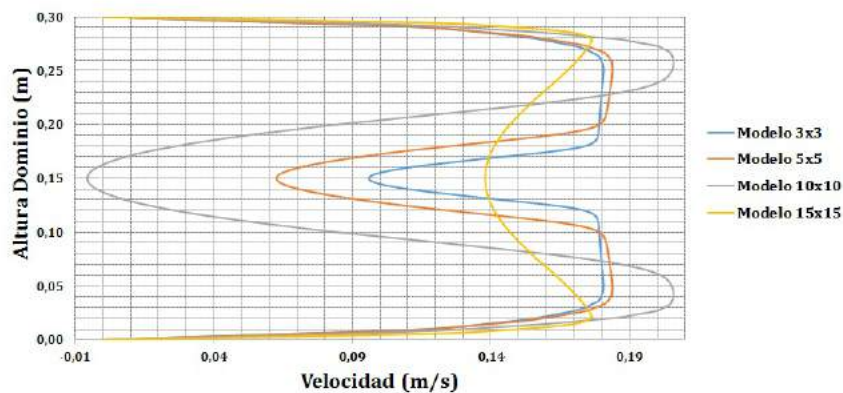
PUNTO	EJE X (Horizontal)		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
P0X	0-0,65	0	0,15
P1X	0-0,65	0,03	0,15
P2X	0-0,65	0,06	0,15
P3X	0-0,65	0,09	0,15
P4X	0-0,65	0,12	0,15
P5X	0-0,65	0,15	0,15
P6X	0-0,65	0,18	0,15
P7X	0-0,65	0,21	0,15
P8X	0-0,65	0,24	0,15
P9X	0-0,65	0,27	0,15
P10X	0-0,65	0,3	0,15

Tabla F-2.: Anexo Coordenadas X, Y, Z, Puntos de Medición Caso Flujo EXterno - Coordenadas X Horizontal.

F.1. Resultados - Características Aerodinámicas Cilindros Rectangulares

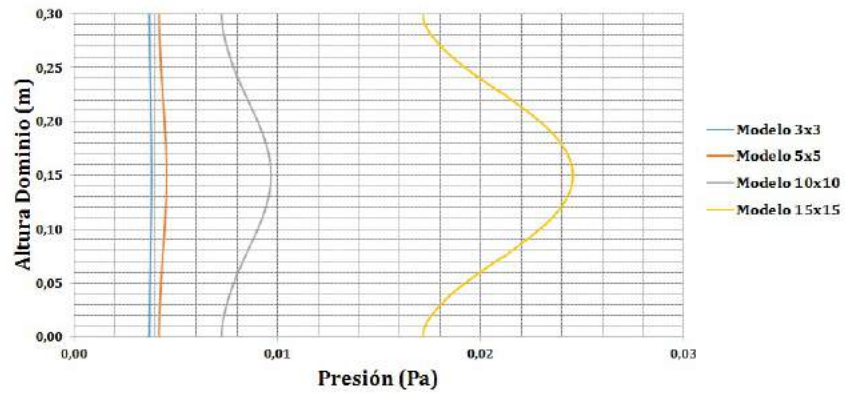


(a) Perfil de Velocidad. Entrada Dominio. 6 Hz.

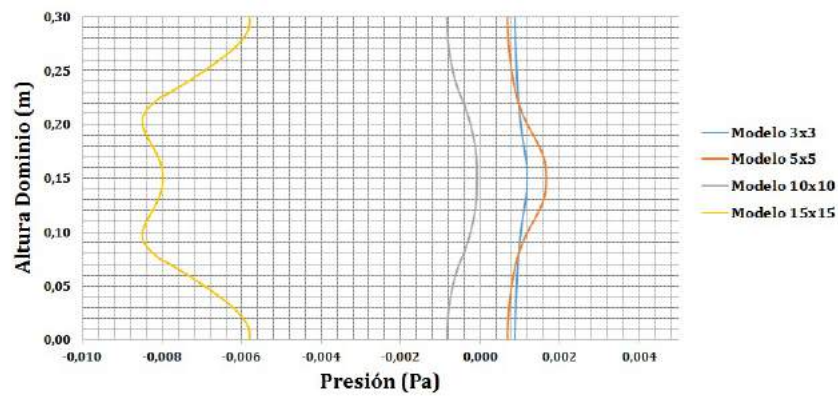


(b) Perfil de Velocidad. Salida Dominio. 6 Hz.

Figura F-1.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfiles de Velocidad. Entrada y Salida del Dominio. 6 Hz.

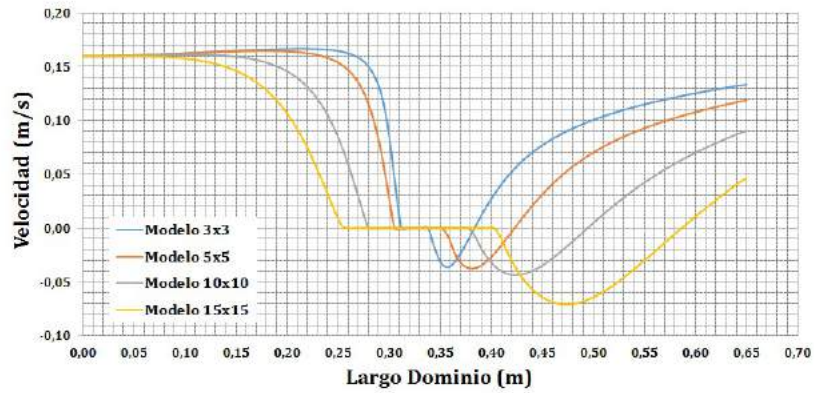


(a) Perfil de Presión. Entrada Dominio. 6 Hz.

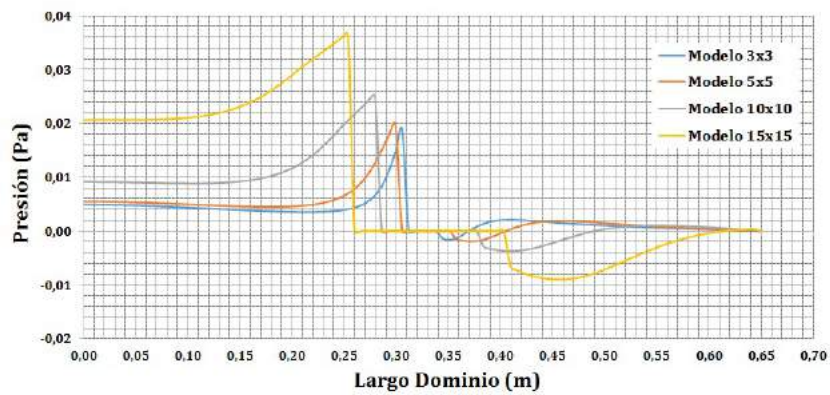


(b) Perfil de Presión. Salida Dominio. 6 Hz.

Figura F-2.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfiles de Presión. Entrada y Salida del Dominio. 6 Hz.

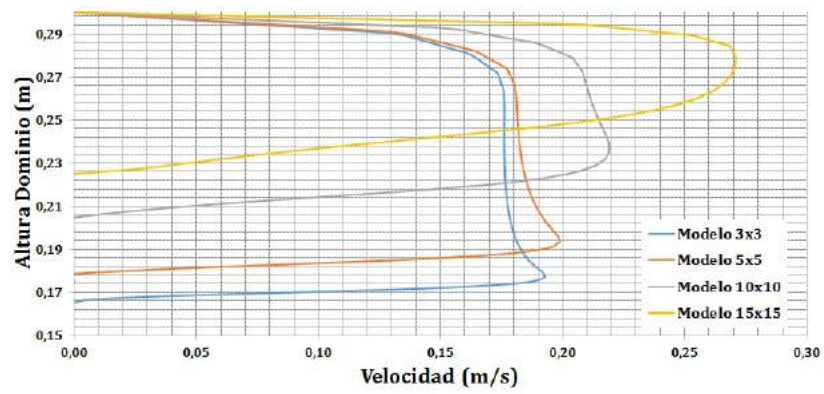


(a) Perfil de Velocidad. Línea Media del Dominio. 6 Hz.

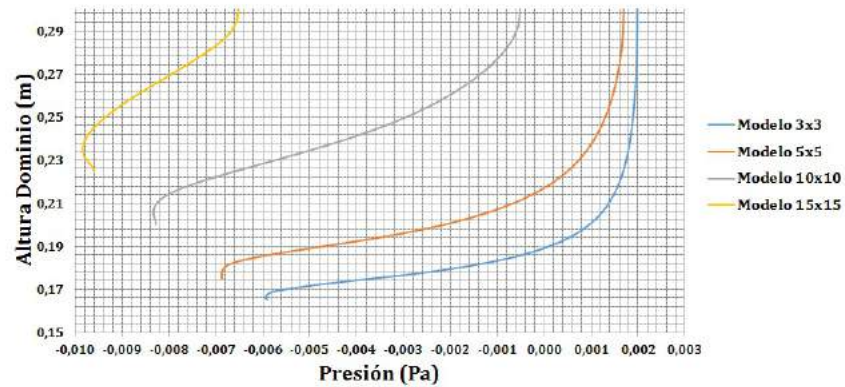


(b) Perfil de Presión. Línea Media del Dominio. 6 Hz.

Figura F-3.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfiles de Velocidad y Presión. Línea Media del Dominio. 6 Hz.



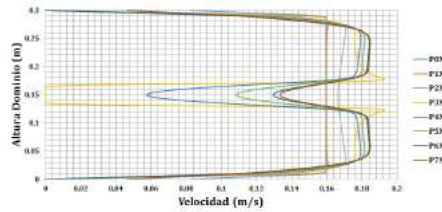
(a) Perfil de Velocidad. Cilindro Rectangular-Pared Superior Dominio. 6 Hz.



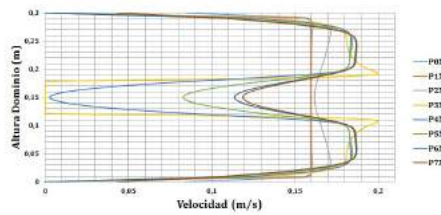
(b) Perfil de Presión. Cilindro Rectangular-Pared Superior Dominio. 6 Hz.

Figura F-4.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfiles de Velocidad y Presión. Cilindro Rectangular-Pared Superior Dominio. 6 Hz.

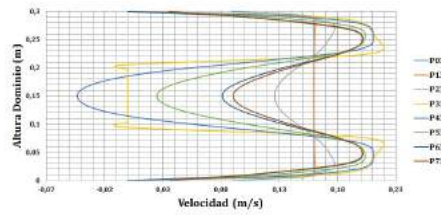
F.2. Resultados - Características Aerodinámicas Dominio



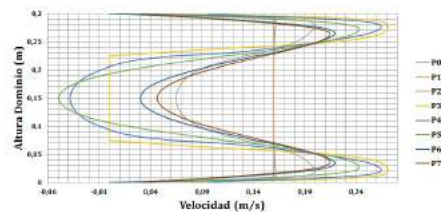
(a) Modelo 3x3.



(b) Modelo 5x5.

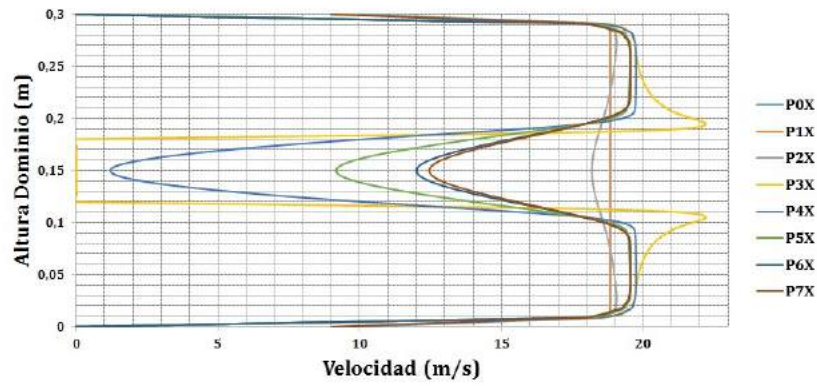


(c) Modelo 10x10.

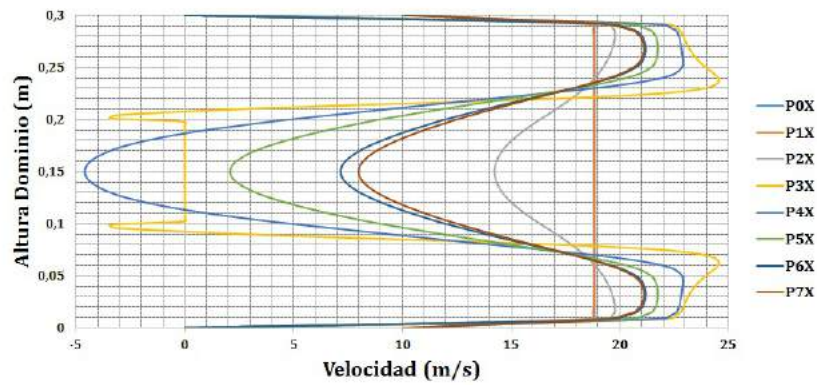


(d) Modelo 15x15.

Figura F-5.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil Vel a lo largo del eje X. 6 Hz.

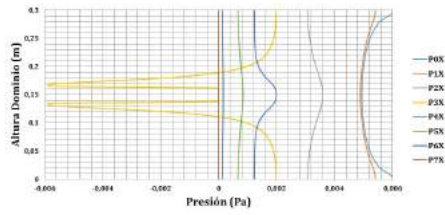


(a) Modelo 5x5.

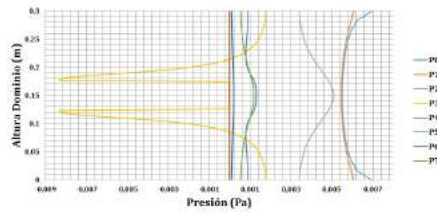


(b) Modelo 10x10.

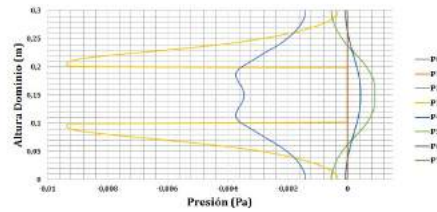
Figura F-6.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Velocidad a lo largo del eje X. Modelos 5x5 y 10x10. 60 Hz.



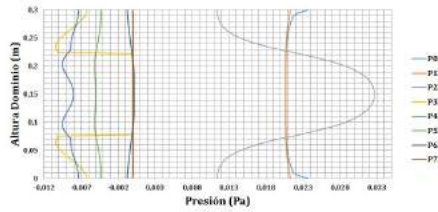
(a) Modelo 3x3.



(b) Modelo 5x5.

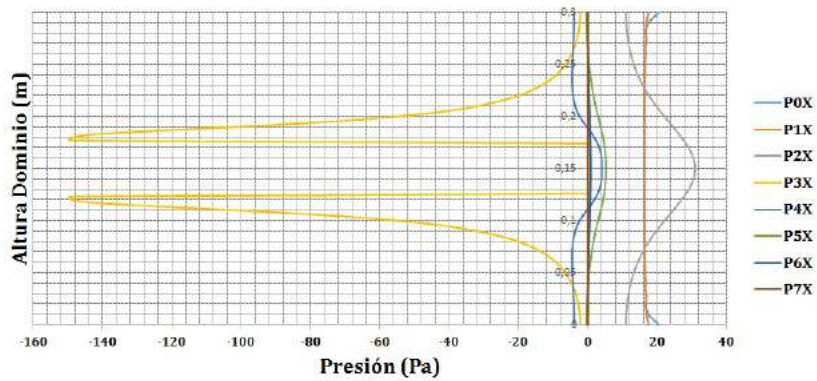


(c) Modelo 10x10.

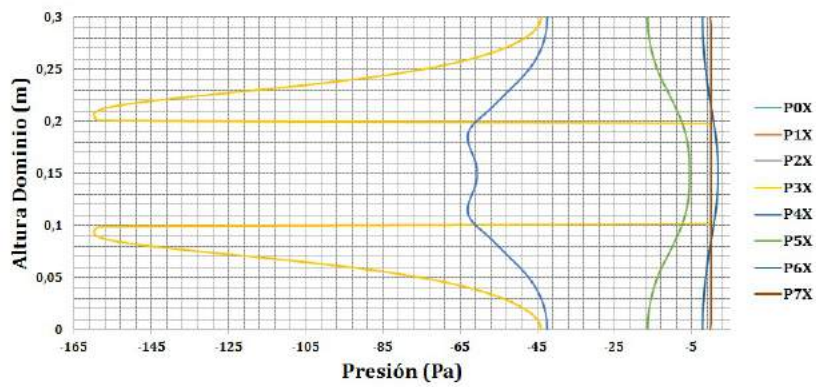


(d) Modelo 15x15.

Figura F-7.: Estudio Caso de Flujo Externo-Perfil Presión a lo largo del eje X. 6Hz.

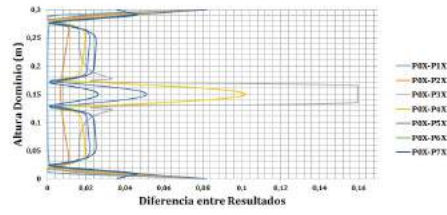


(a) Modelo 5x5.

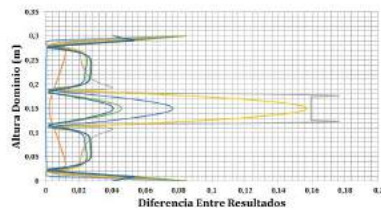


(b) Modelo 10x10.

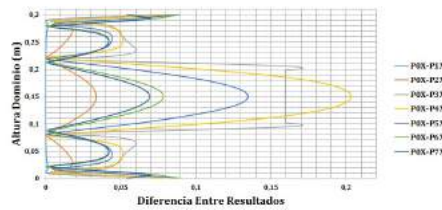
Figura F-8.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Presión a lo largo del eje X. Modelos 5x5 y 10x10. 60 Hz.



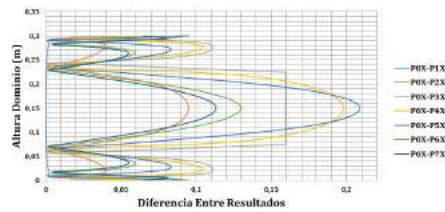
(a) Modelo 3x3.



(b) Modelo 5x5.

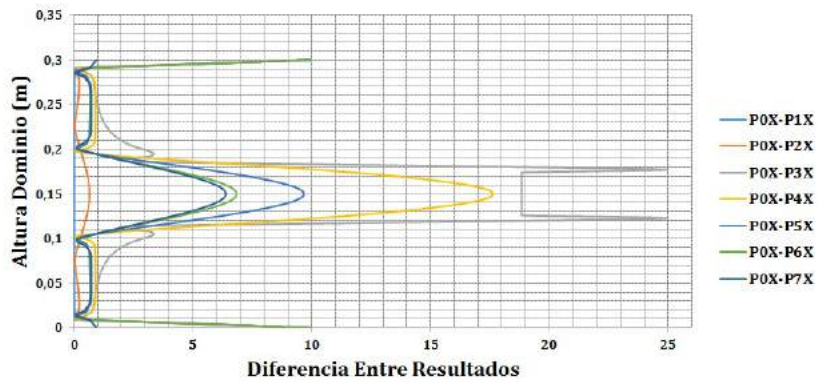


(c) Modelo 10x10.

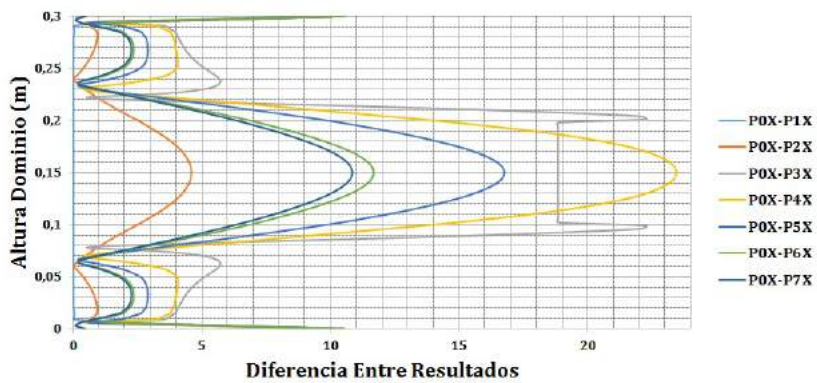


(d) Modelo 15x15.

Figura F-9.: Estudio Caso de Flujo Externo - Diferencia de Datos Respecto a Datos de Entrada. Eje X. 6 Hz.

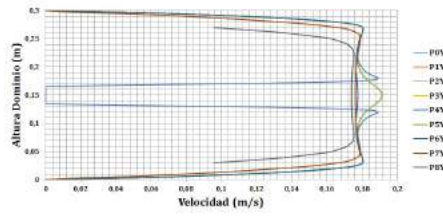


(a) Modelo 5x5.

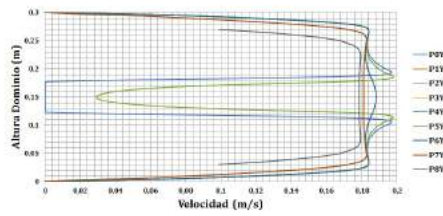


(b) Modelo 10x10.

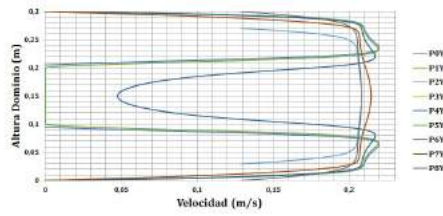
Figura F-10.: Estudio Caso de Flujo Externo - Diferencia de Datos Respecto a Datos de Entrada. Eje X. Modelos 5x5 y 10x10. 60 Hz.



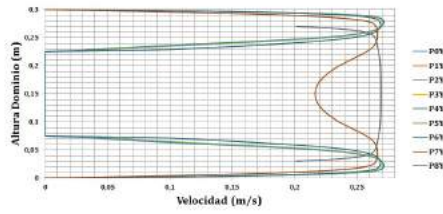
(a) Modelo 3x3.



(b) Modelo 5x5.

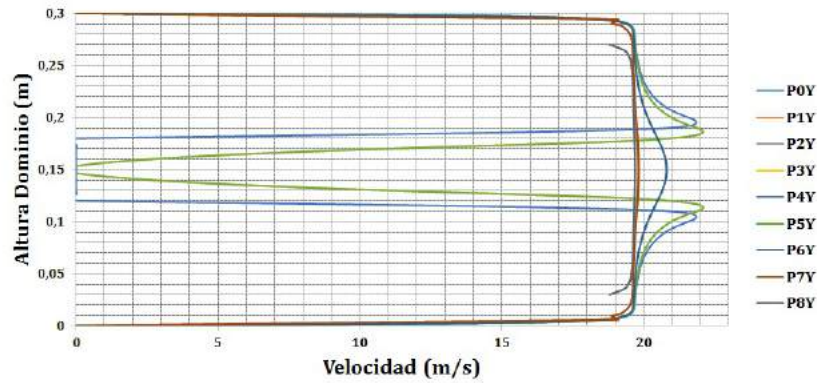


(c) Modelo 10x10.

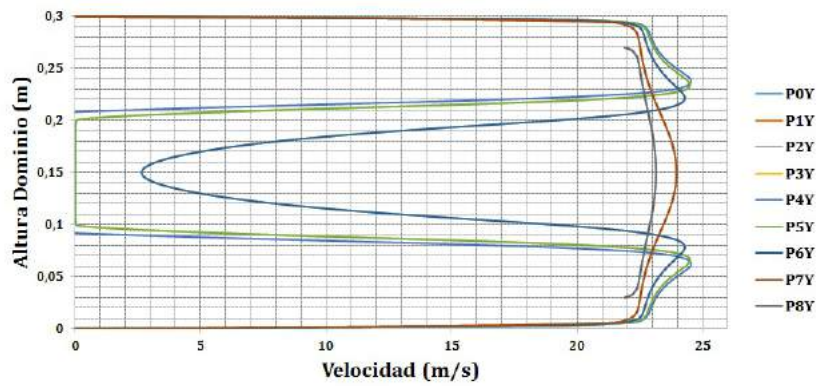


(d) Modelo 15x15.

Figura F-11.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil Velocidad a lo largo del eje Y. 6 Hz.

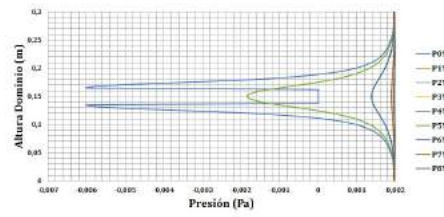


(a) Modelo 5x5.

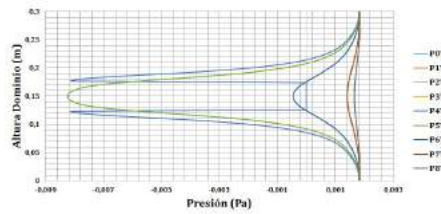


(b) Modelo 10x10.

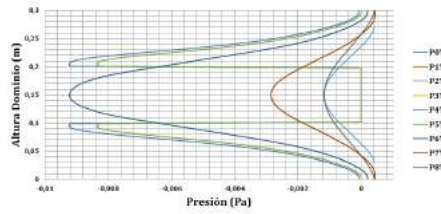
Figura F-12.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Velocidad a lo largo del eje Y. Modelos 5x5 y 10x10. 60 Hz.



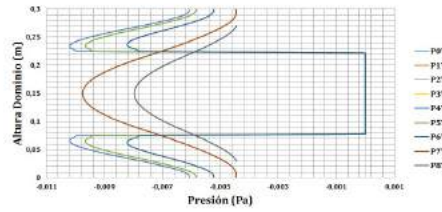
(a) Modelo 3x3.



(b) Modelo 5x5.

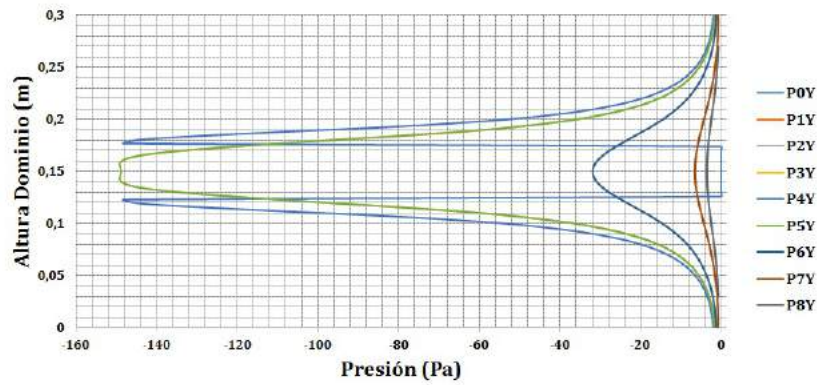


(c) Modelo 10x10.

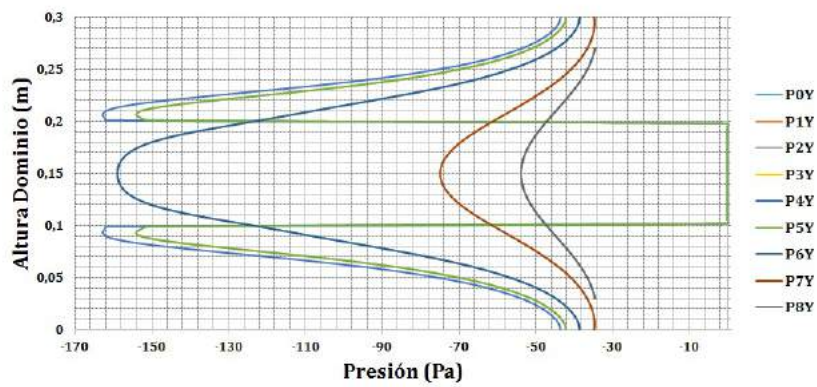


(d) Modelo 15x15.

Figura F-13.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Presión a lo largo del eje Y. 6 Hz.

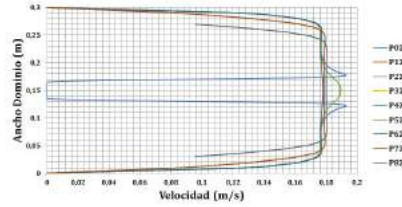


(a) Modelo 5x5.

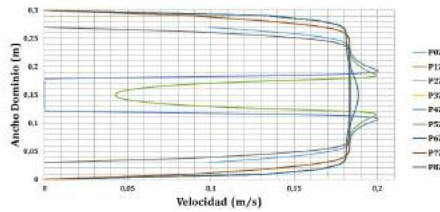


(b) Modelo 10x10.

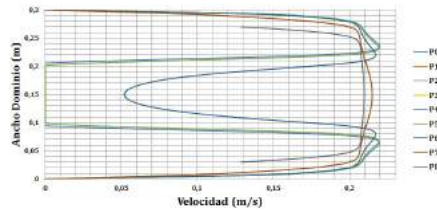
Figura F-14.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Presión a lo largo del eje Y. Modelos 5x5 y 10x10. 60 Hz.



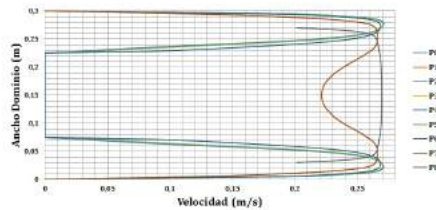
(a) Modelo 3x3.



(b) Modelo 5x5.

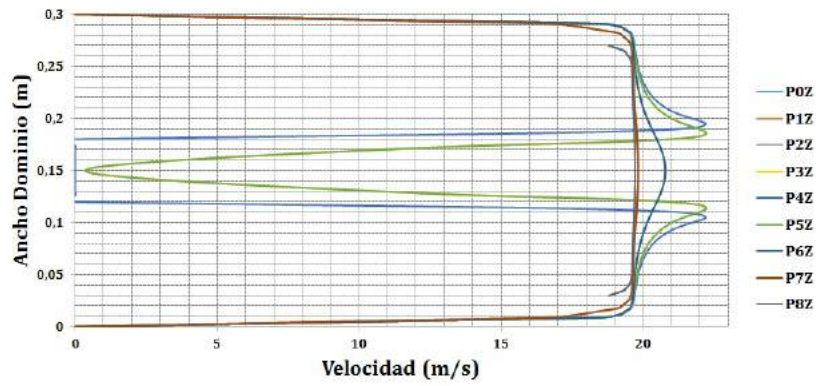


(c) Modelo 10x10.

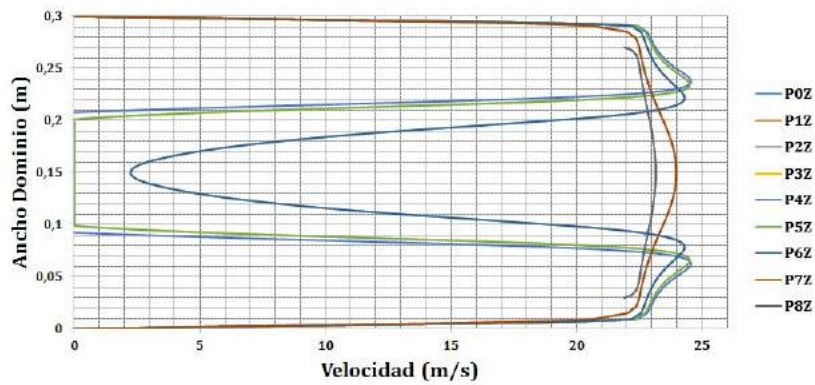


(d) Modelo 15x15.

Figura F-15.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Velocidad a lo largo del eje Z. 6 Hz.

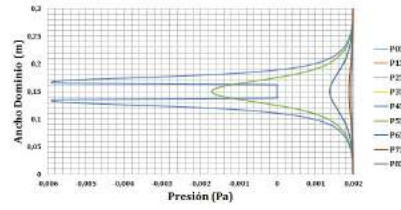


(a) Modelo 5x5.

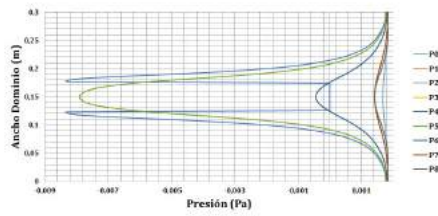


(b) Modelo 10x10.

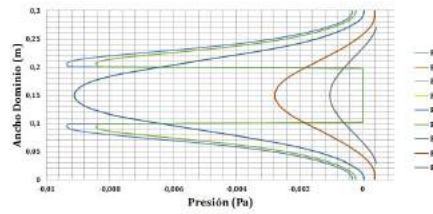
Figura F-16.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Velocidad a lo largo del eje Z. Modelos 5x5 y 10x10. 60 Hz.



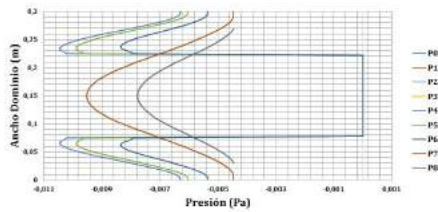
(a) Modelo 3x3.



(b) Modelo 5x5.

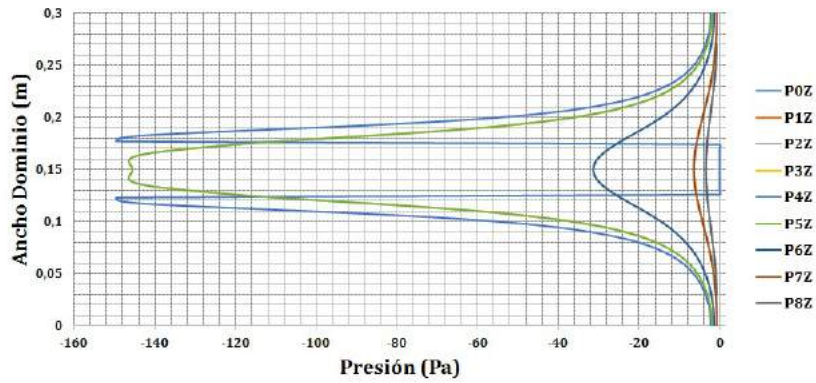


(c) Modelo 10x10.

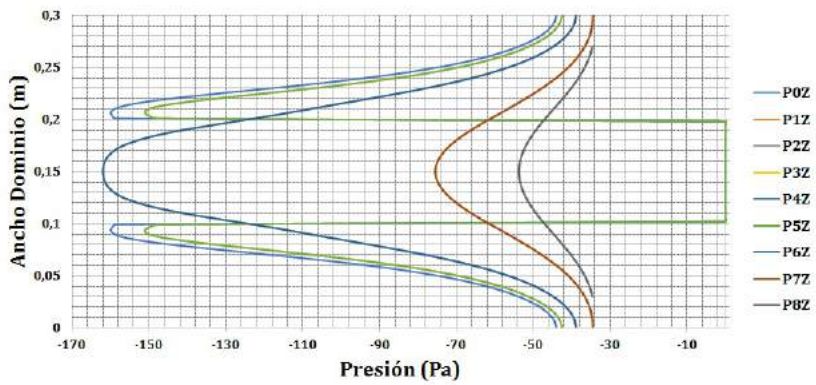


(d) Modelo 15x15.

Figura F-17.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Presión a lo largo del eje Z. 6 Hz.

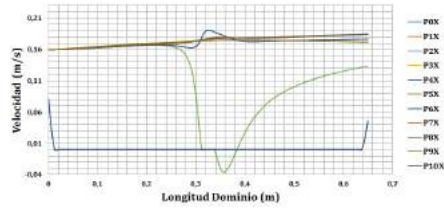


(a) Modelo 5x5.

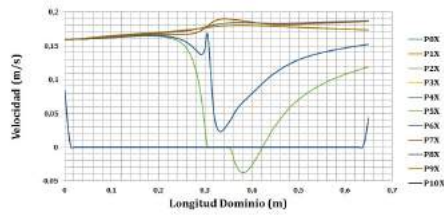


(b) Modelo 10x10.

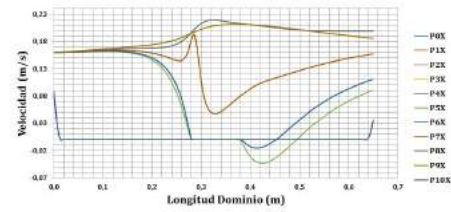
Figura F-18.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Presión a lo largo del eje Z. Modelos 5x5 y 10x10. 60 Hz.



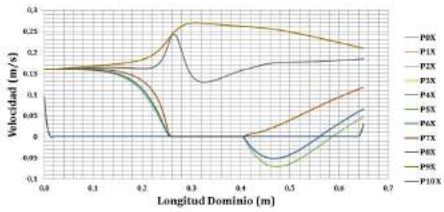
(a) Modelo 3x3.



(b) Modelo 5x5.

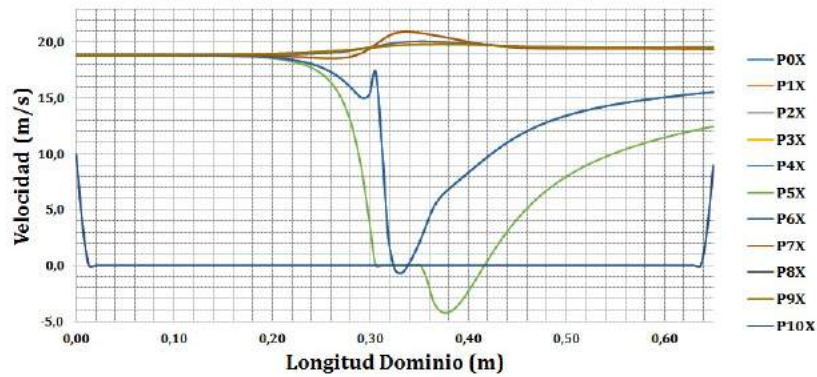


(c) Modelo 10x10.

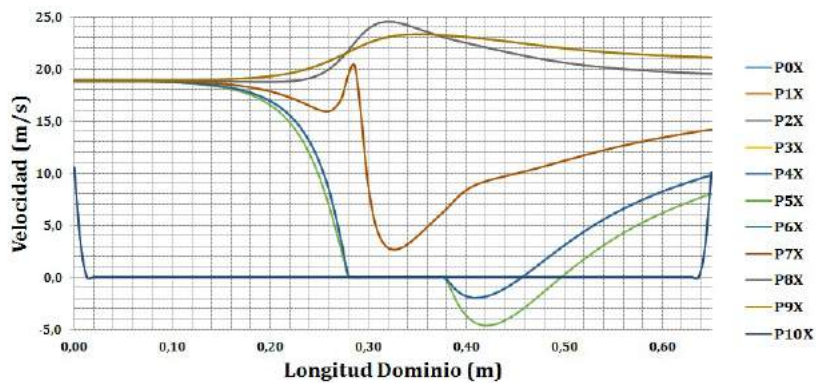


(d) Modelo 15x15.

Figura F-19.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Velocidad. Análisis Eje X Lateral. 6 Hz.

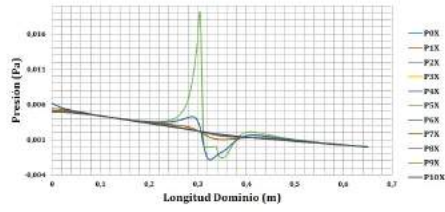


(a) Modelo 5x5.

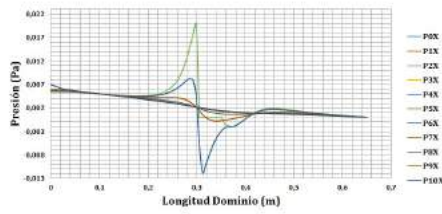


(b) Modelo 10x10.

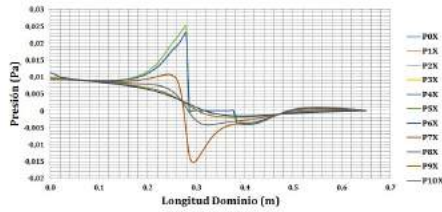
Figura F-20.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Velocidad. Análisis Eje X Lateral. Modelos 5x5 y 10x10. 60 Hz.



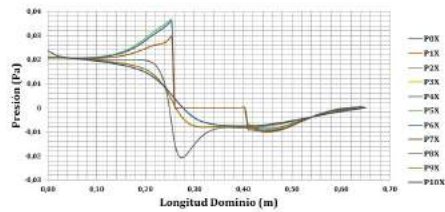
(a) Modelo 3x3.



(b) Modelo 5x5.

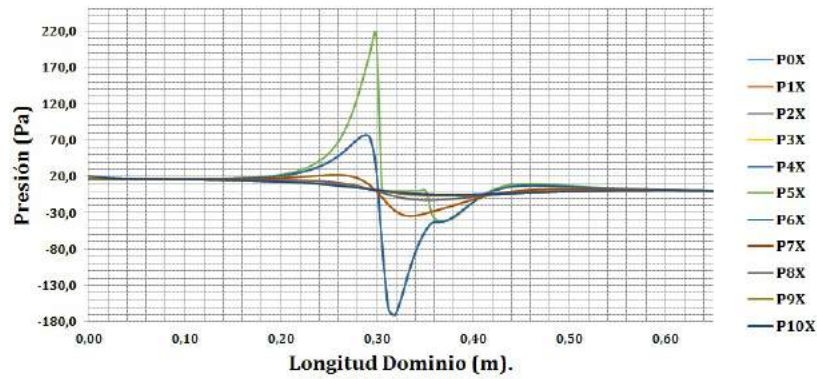


(c) Modelo 10x10.

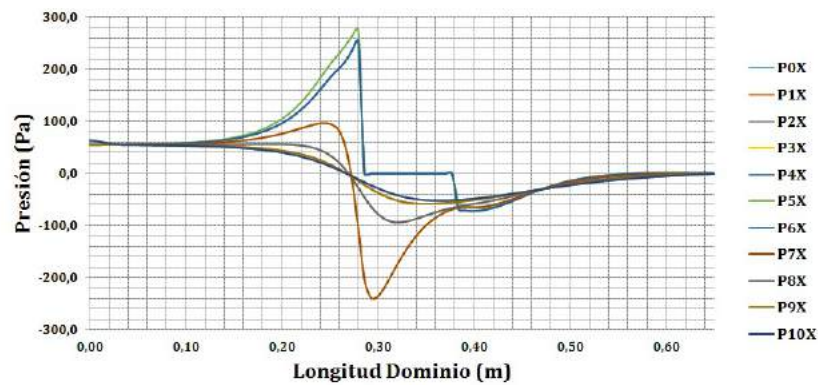


(d) Modelo 15x15.

Figura F-21.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Presión. Análisis Eje X Lateral. 6 Hz.

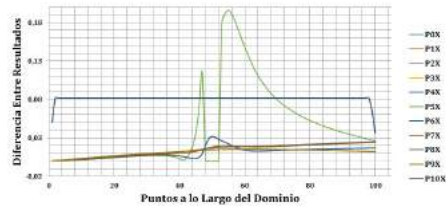


(a) Modelo 5x5.

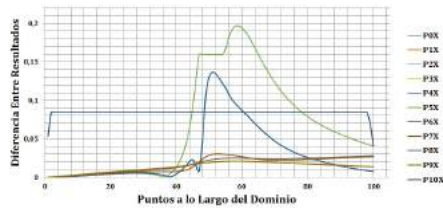


(b) Modelo 10x10.

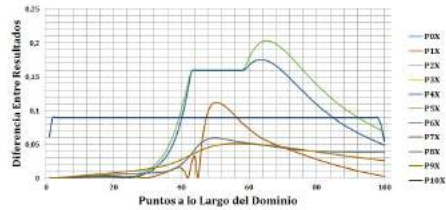
Figura F-22.: Estudio Caso de Flujo Externo - Perfil de Presión. Análisis Eje X Lateral. Modelos 5x5 y 10x10. 60 Hz.



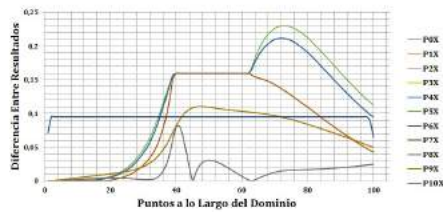
(a) Modelo 3x3.



(b) Modelo 5x5.

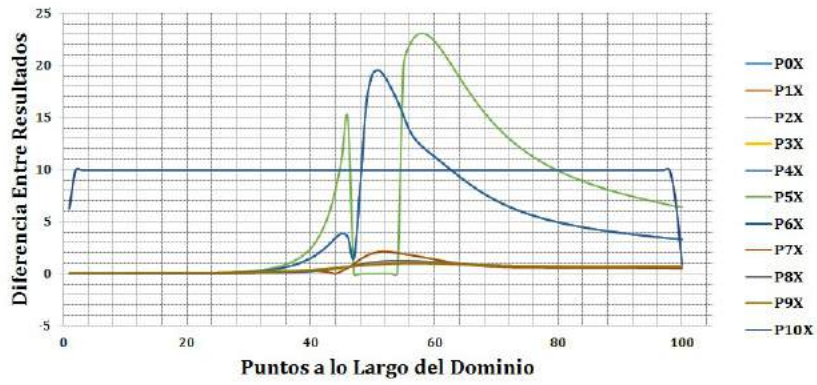


(c) Modelo 10x10.

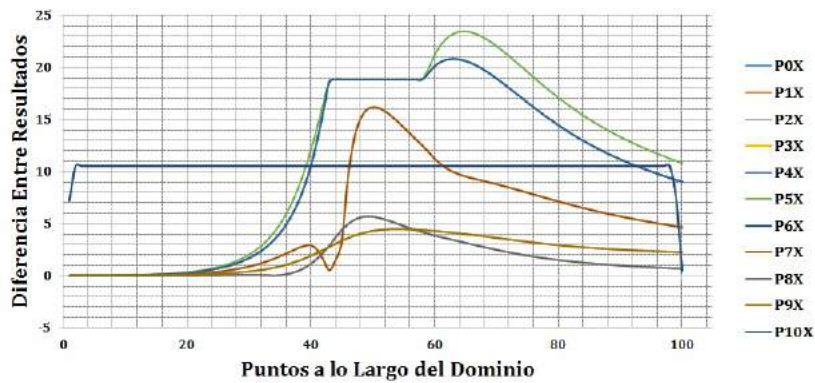


(d) Modelo 15x15.

Figura F-23.: Estudio Caso de Flujo Externo - Diferencia Entre Resultados Respecto a Datos de Velocidad de Entrada. Análisis Eje X Lateral. 6 Hz.

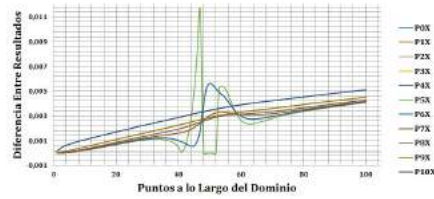


(a) Modelo 5x5.

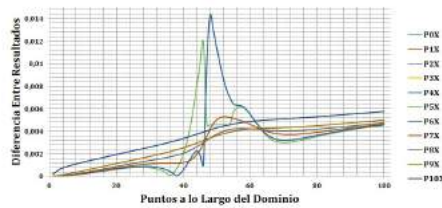


(b) Modelo 10x10.

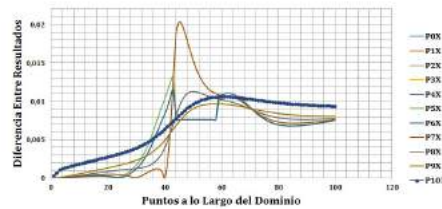
Figura F-24.: Estudio Caso de Flujo Externo - Diferencia Entre Resultados Respecto a Datos de Velocidad de Entrada. Análisis Eje X Lateral. Modelos 5x5 y 10x10. 60 Hz.



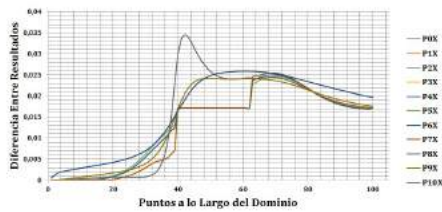
(a) Modelo 3x3.



(b) Modelo 5x5.

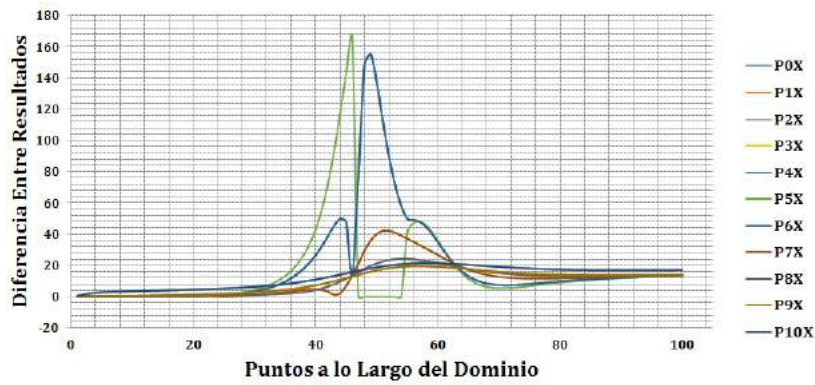


(c) Modelo 10x10.

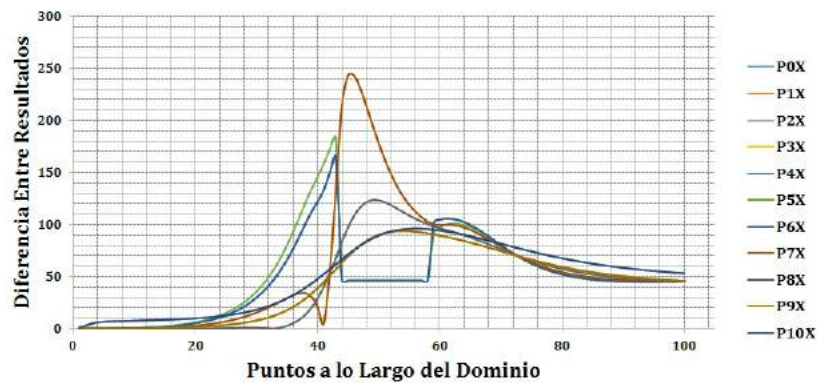


(d) Modelo 15x15.

Figura F-25.: Estudio Caso de Flujo Externo - Diferencia Entre Resultados Respecto a Datos de Velocidad de Entrada. Análisis Eje X Lateral. 6 Hz.



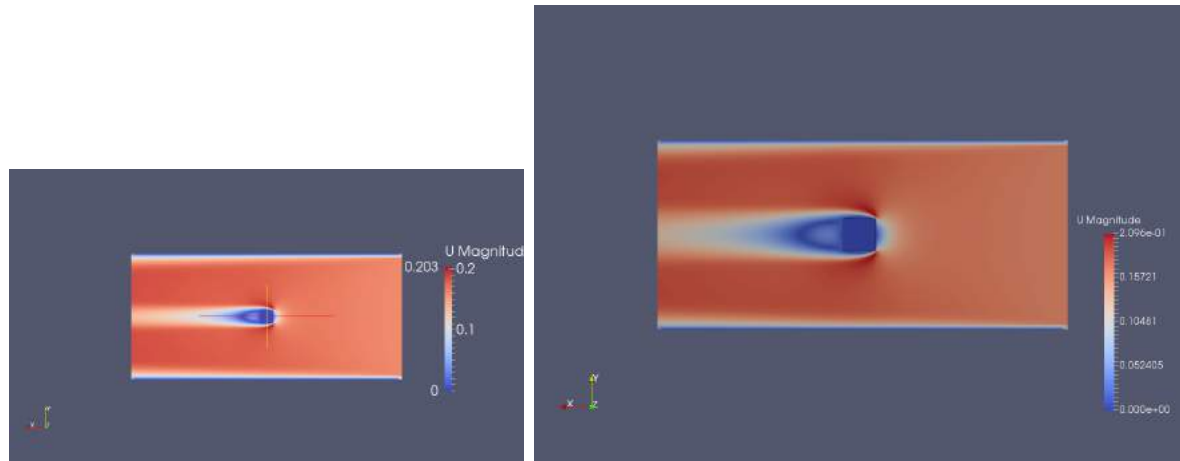
(a) Modelo 5x5.



(b) Modelo 10x10.

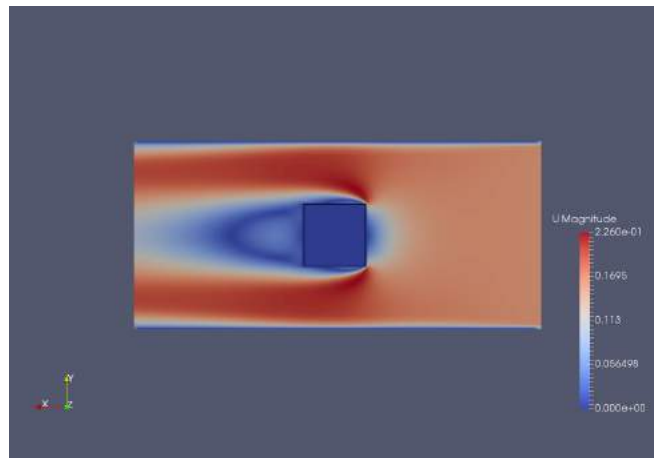
Figura F-26.: Estudio Caso de Flujo Externo - Diferencia Entre Resultados Respecto a Datos de Velocidad de Entrada. Análisis Eje X Lateral. Modelos 5x5 y 10x10. 60 Hz.

F.3. Imágenes Simulaciones

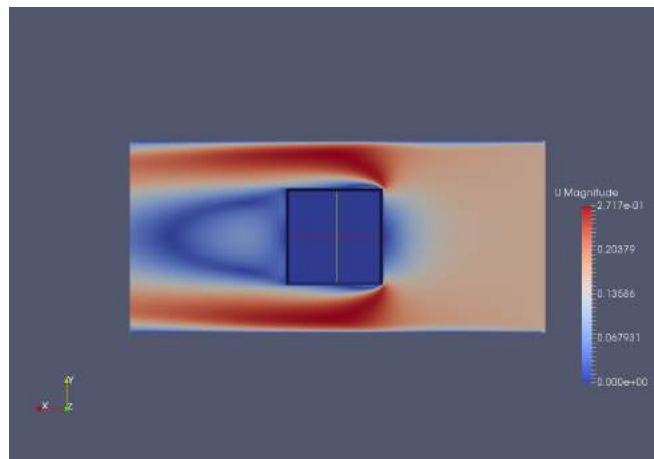


(a) Modelo 3x3.

(b) Modelo 5x5.

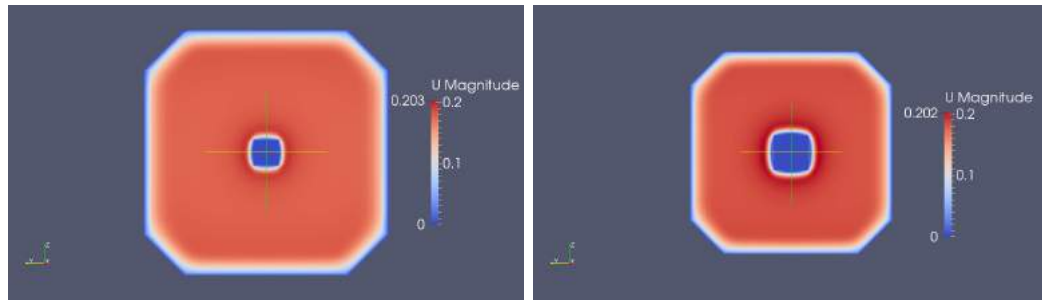


(c) Modelo 10x10.



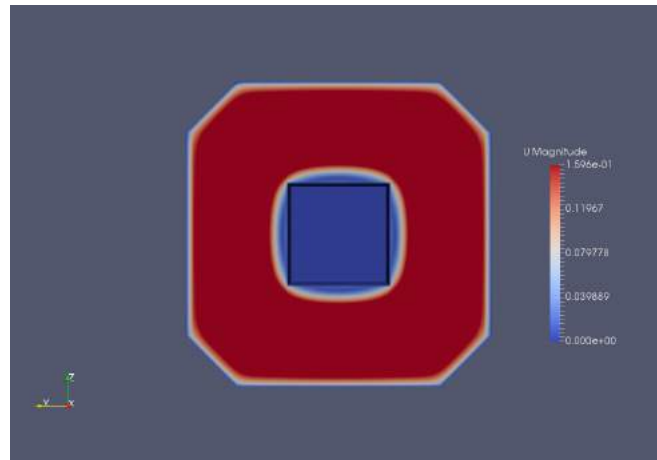
(d) Modelo 15x15.

Figura F-27.: Estudio Caso de Flujo Externo - Imágen Simulación. Velocidad Costado Lateral. Modelos 3x3, 5x5, 10x10 y 15x15. 6 Hz.

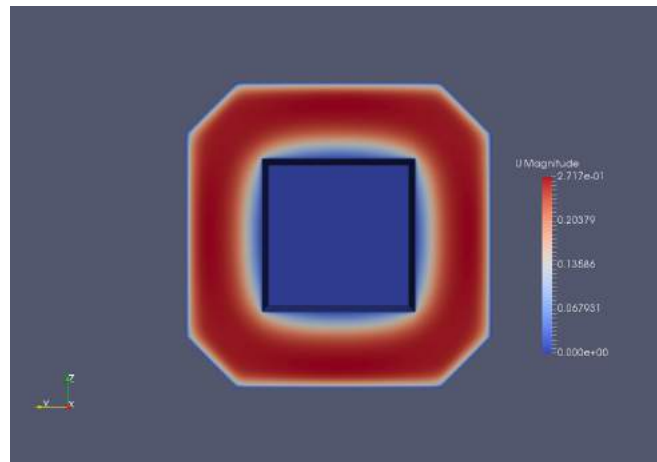


(a) Modelo 3x3.

(b) Modelo 5x5.

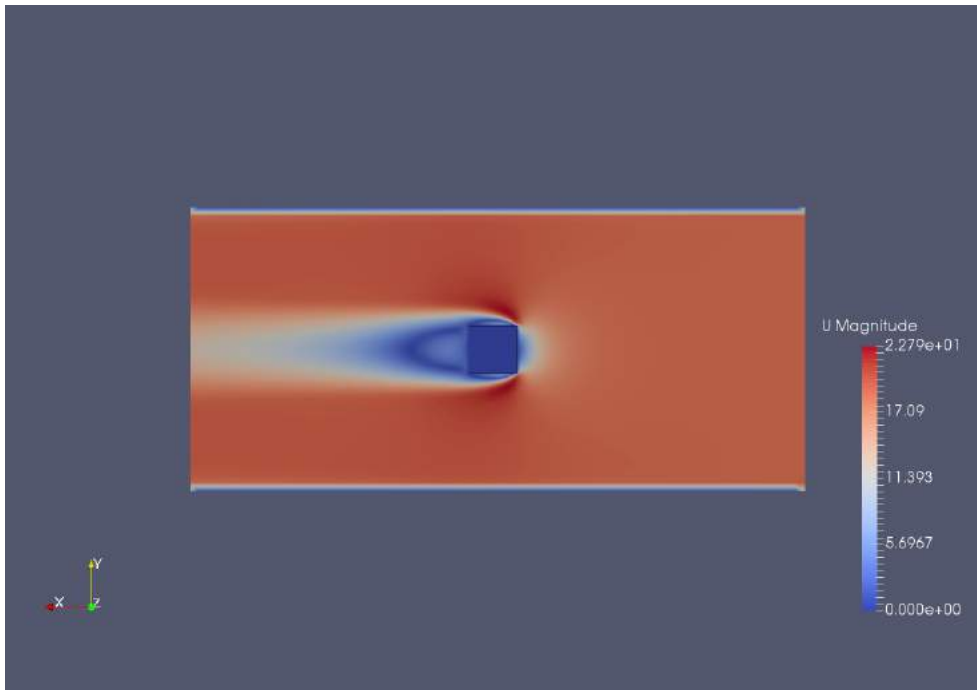


(c) Modelo 10x10.

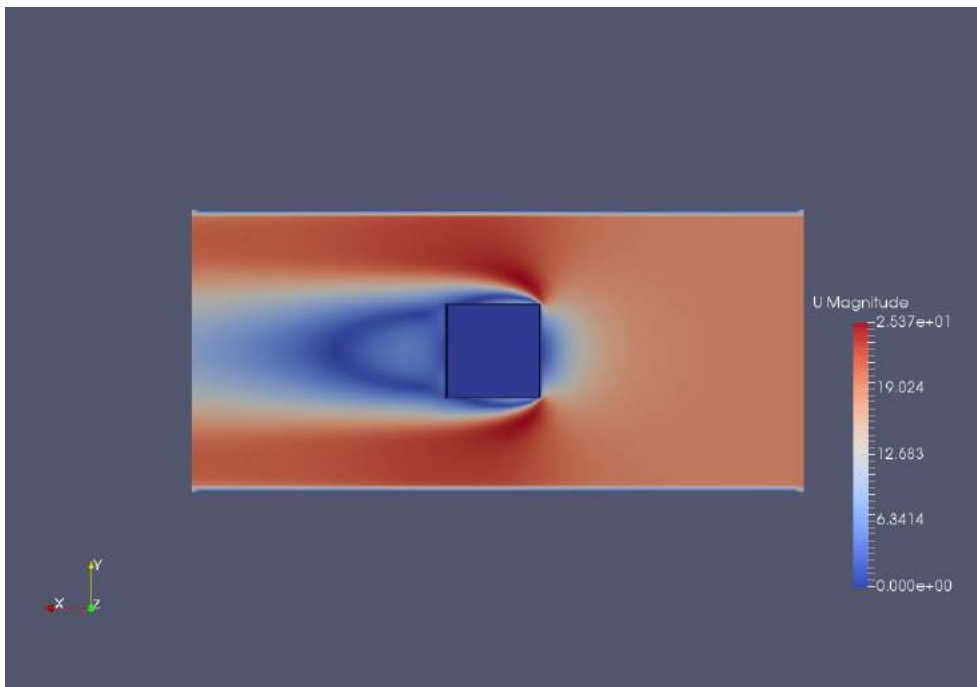


(d) Modelo 15x15.

Figura F-28.: Estudio Caso de Flujo Externo - Imágen Simulación. Velocidad Costado Frontal. Modelos 3x3, 5x5, 10x10 y 15x15. 6 Hz.

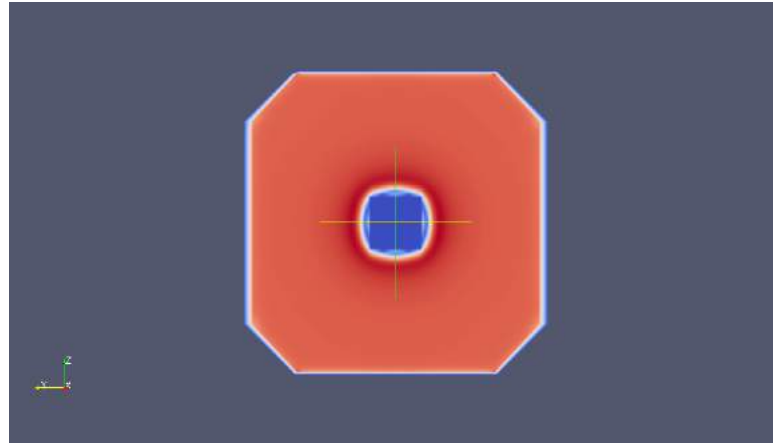


(a) Modelo 5x5.

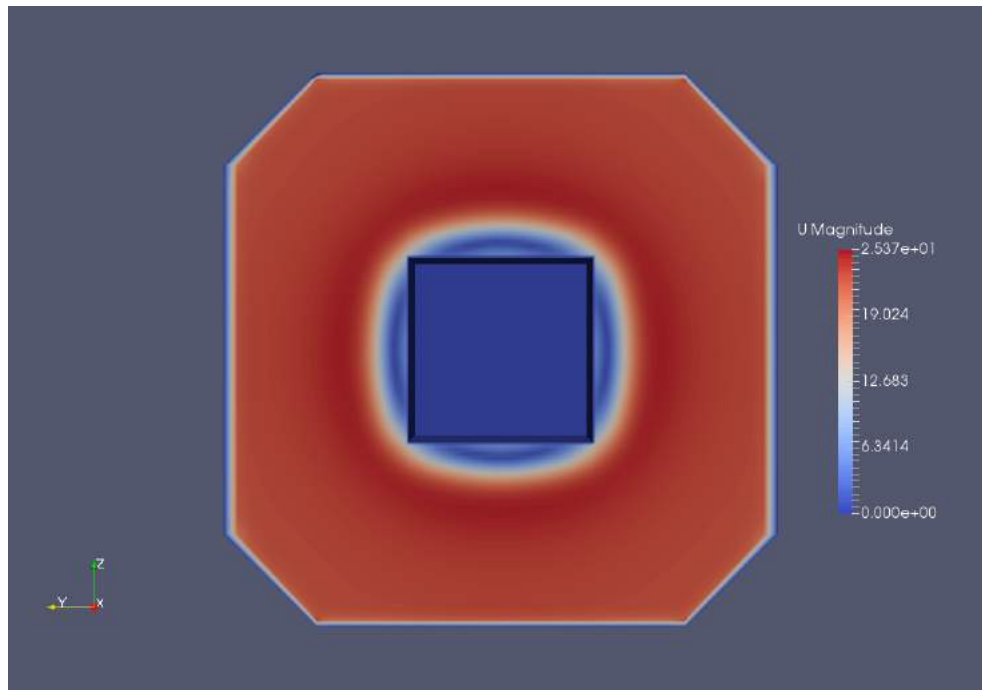


(b) Modelo 10x10.

Figura F-29.: Estudio Caso de Flujo Externo - Imágen Simulación. Velocidad Costado Lateral. Modelos 5x5 y 10x10. 60 Hz..

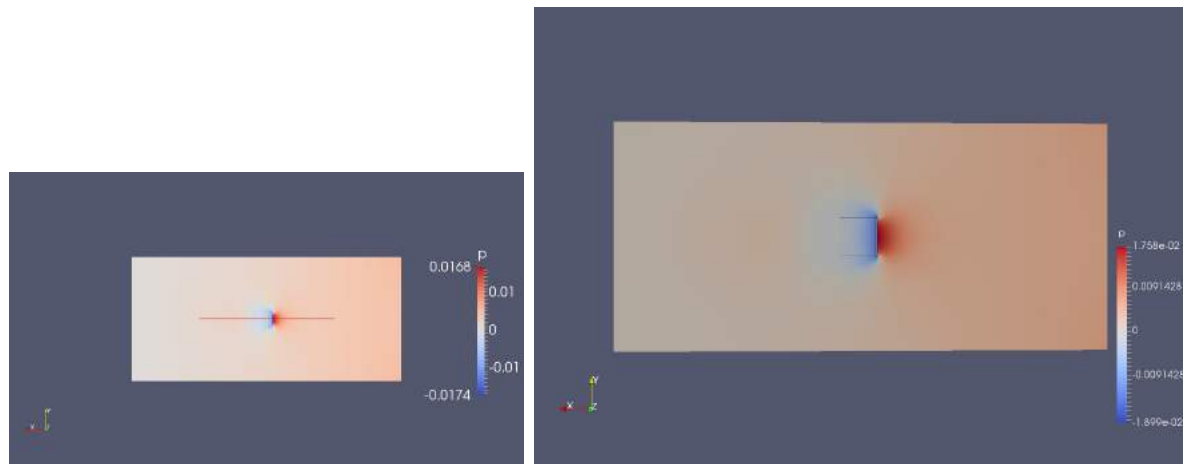


(a) Modelo 5x5.



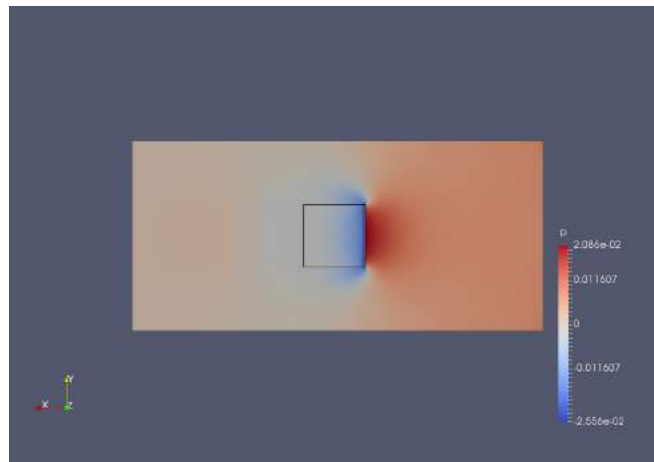
(b) Modelo 10x10.

Figura F-30.: Estudio Caso de Flujo Externo - Imágen Simulación. Velocidad Costado Frontal. Modelos 5x5 y 10x10. 60 Hz.

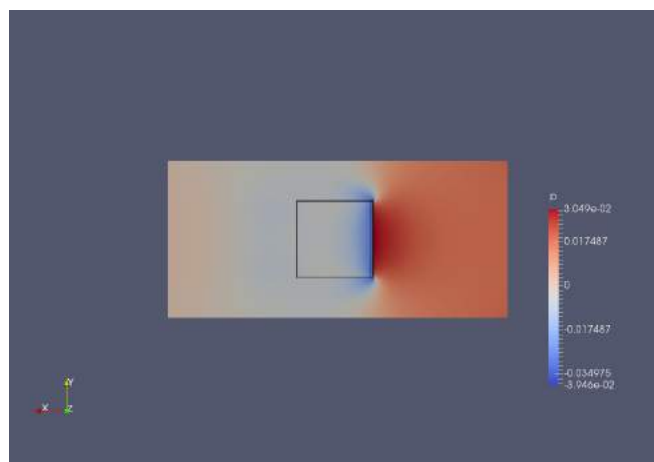


(a) Modelo 3x3.

(b) Modelo 5x5.

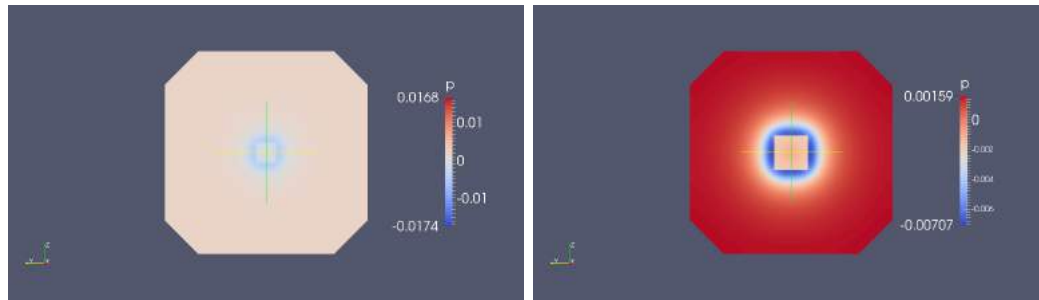


(c) Modelo 10x10.



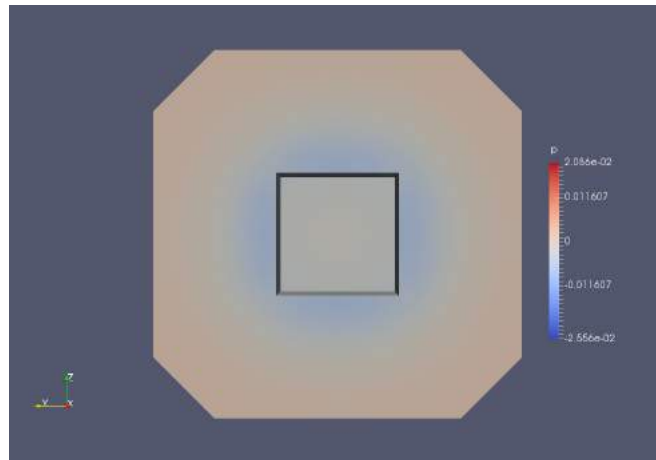
(d) Modelo 15x15.

Figura F-31.: Estudio Caso de Flujo Externo - Imágen Simulación. Presión Costado Lateral. Modelos 3x3, 5x5, 10x10 y 15x15. 6 Hz.

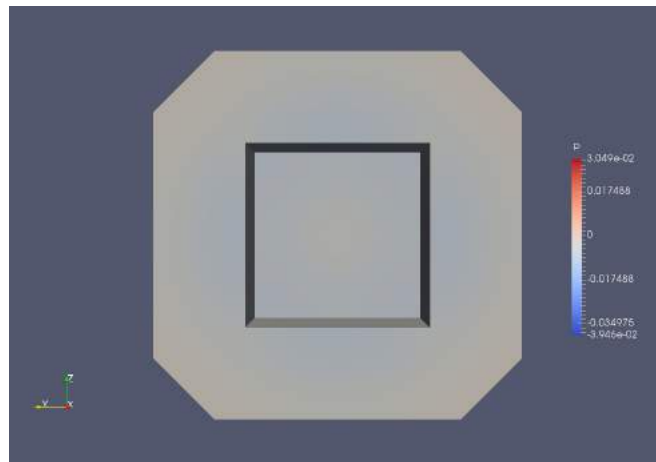


(a) Modelo 3x3.

(b) Modelo 5x5.

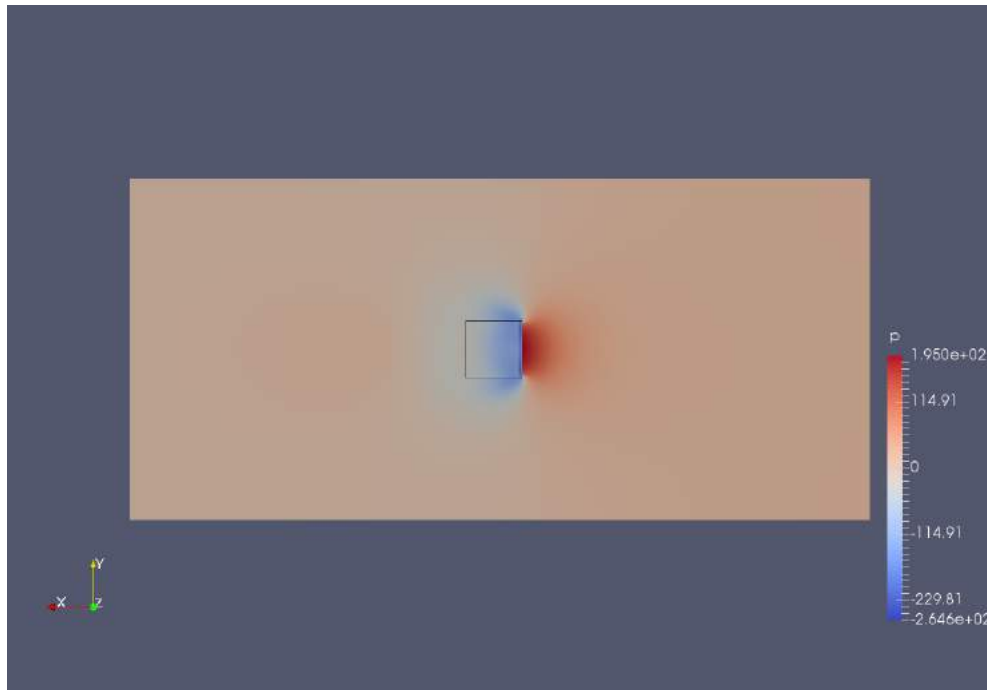


(c) Modelo 10x10.

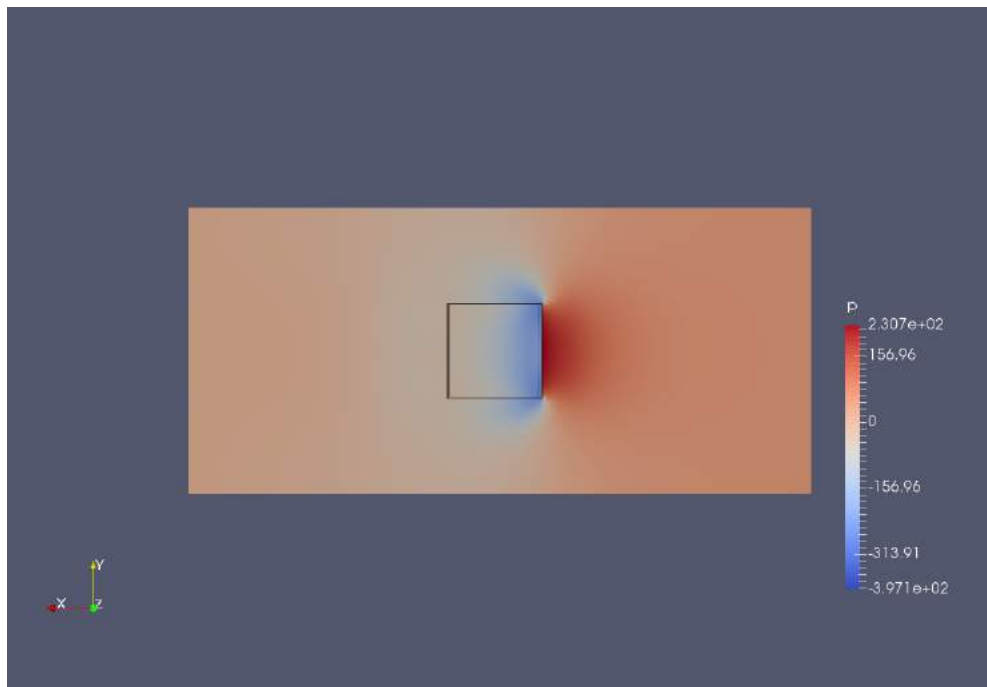


(d) Modelo 15x15.

Figura F-32.: Estudio Caso de Flujo Externo - Imagen Simulación. Presión Costado Frontal. Modelos 3x3, 5x5, 10x10 y 15x15. 6 Hz.

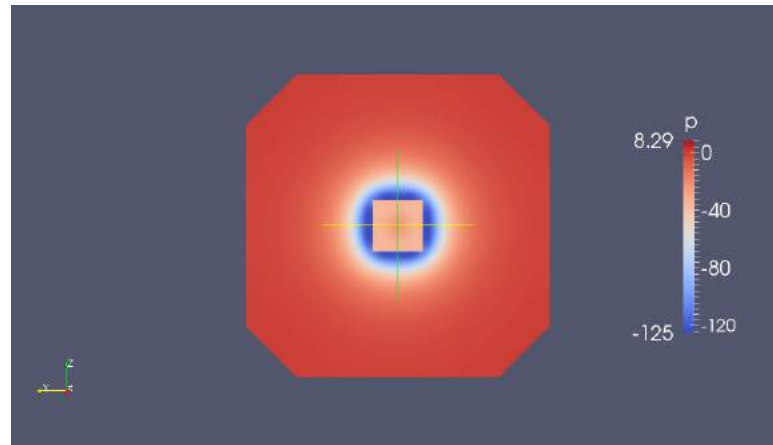


(a) Modelo 5x5.

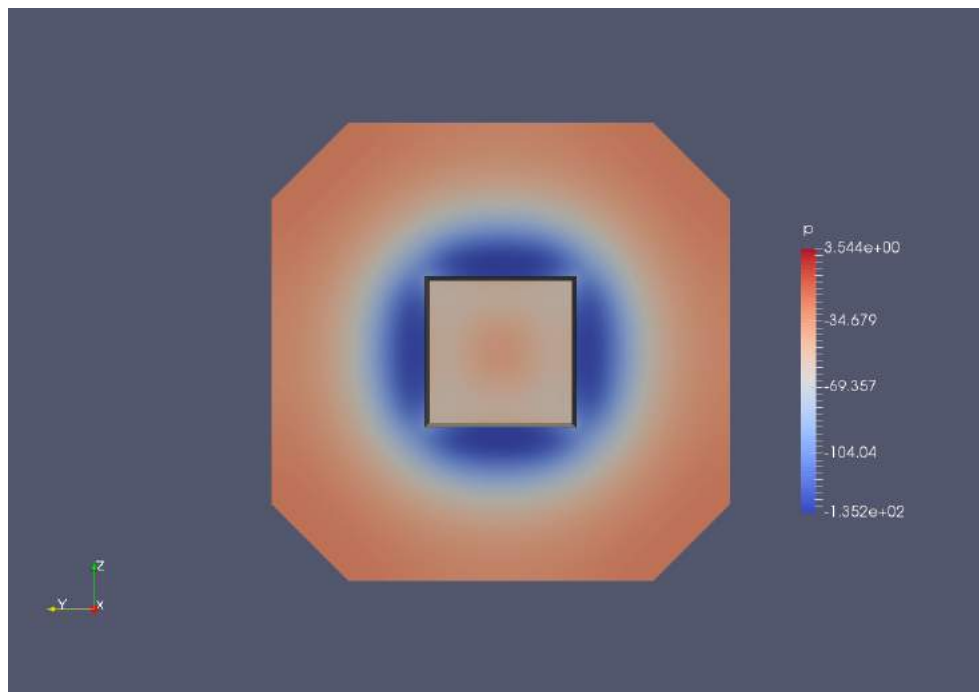


(b) Modelo 10x10.

Figura F-33.: Estudio Caso de Flujo Externo - Imágen Simulación. Presión Costado Lateral. Modelos 5x5 y 10x10. 60 Hz..



(a) Modelo 5x5.



(b) Modelo 10x10.

Figura F-34.: Estudio Caso de Flujo Externo - Imágen Simulación. Presión Costado Frontal. Modelos 5x5 y 10x10. 60 Hz.

G. Anexo G: PUNTOS DE MEDICIÓN PRUEBAS EXPERIMENTALES

A continuación se relacionan los puntos de medición tanto en la zona de pruebas como en la *Settling Chamber 2* para el desarrollo de pruebas experimentales.

G.1. Puntos de Medición - Tomas para Ingreso de Instrumento No 1, 2.

1. Ingreso Instrumento: Toma 1, Toma 2.

2. Descripción de la Ubicación: El instrumento se desplaza desde la pared superior hasta pared inferior de la zona de pruebas.

PUNTO	DISTANCIA (mm)
1	35
2	45
3	55
4	65
5	75
6	85
7	95
8	105
9	115
10	125
11	135
12	145
13	155
14	165
15	175
16	185
17	195
18	205
19	215
20	225
21	235
22	245
23	255
24	265
25	275
26	285
27	295
28	305

Tabla G-1.: Puntos de Medición - Ingreso de Instrumento Tomas 1 y 2.

G.2. Puntos de Medición - Tomas Estáticas Zona de Pruebas y Settling Chamber 2

1. **Ingreso Instrumento:** Tomas Estáticas zona de pruebas y *Settling Chamber 2* .
2. **Descripción de la Ubicación:** Las Tomas estáticas son ubicadas en las paredes superior e inferior de la *Settling Chamber 2* y la Zona de Pruebas, estas se enumeran de acuerdo al orden de ubicación desde la zona de ingreso de cada sección hasta la zona de salida. En la *Settling Chamber 2* se ubica un toma estática por cada pared que la compone.

PUNTO	DISTANCIA (mm) / DISTANCIA (mm) PARA COORDENADAS X, Y, Z
ZP TI-1	35
ZP TI-2	90
ZP TI-3	190
ZP TI-4	417
ZP TI-5	517
ZP TI-6	617
ZP TS-1	35
ZP TS-2	90
ZP TS-3	190
ZP TS-4	417
ZP TS-5	517
ZP TS-6	617
SC T1	X: 150, Y: 300, Z: 57
SC T2	X: 0, Y: 150, Z: 57
SC T3	X: 150, Y: 0, Z: 57
SC T4	X: 300, Y: 150, Z: 57

ZP TI=Zona de Pruebas Toma Inferior.
 ZP TS=Zona de Pruebas Toma Superior.
 SC T=*Settling Chamber 2* Toma.

Tabla G-2.: Puntos de Medición - Tomas Estáticas Zona de Pruebas y *Settling Chamber 2*.

G.3. Puntos de Medición - Puntos de Medición Coordenada X.

1. Ingreso Instrumento: Tapa Lateral.

2. Descripción de la Ubicación: El instrumento se desplaza desde la pared lateral derecha hasta la pared lateral izquierda de la zona de pruebas.

PUNTO	DISTANCIA (mm)
1	22,1
2	32,1
3	42,1
4	52,1
5	62,1
6	72,1
7	82,1
8	92,1
9	102,1
10	112,1
11	122,1
12	132,1
13	142,1
14	152,1
15	162,1
16	172,1
17	182,1
18	192,1
19	202,1
20	212,1
21	222,1
22	232,1
23	242,1
24	252,1
25	262,1
26	272,1
27	282,1
28	392,1
29	302,1

Tabla G-3.: Puntos de Medición - Puntos de Medición Coordenada X.

G.4. Puntos de Medición - Puntos de Medición Caso Flujo Externo.

G.4.1. Perfil de Velocidad

1. Ingreso Instrumento: Toma 2.

2. Descripción de la Ubicación: El instrumento se desplaza desde la pared superior de la zona de pruebas hasta la superficie del cilindro.

PUNTO	DISTANCIA (mm)
1	29,7
2	39,7
3	49,7
4	59,7
5	69,7
6	79,7
7	89,7
8	99,7
9	109,7
10	119,7
11	129,7

Tabla G-4.: Puntos de Medición - Puntos de Medición Cilindros de 5x5, 5x10 y 5x15.

PUNTO	DISTANCIA (mm)
1	29,7
2	39,7
3	49,7
4	59,7
5	69,7
6	79,7
7	89,7
8	99,7

Tabla G-5.: Puntos de Medición - Puntos de Medición Cilindros de 10x5, 10x10 y 10x15.

PUNTO	DISTANCIA (mm)
1	29,7
2	39,7
3	49,7
4	59,7
5	69,7

Tabla G-6.: Puntos de Medición - Puntos de Medición Cilindros de 15x5, 15x10 y 15x15.

G.4.2. Distribución de Presión

1. Ingreso Instrumento: Tomas Estáticas Cilindros.

2. Descripción de la Ubicación: Las tomas estan ubicadas en la superficie superior del Cilindro Rectangular y en la superficie frontal. Se mide en sentido de la dirección del flujo, es decir de la entrada de zona de pruebas a salida.

PUNTO	DISTANCIA (mm) / DISTANCIA (mm) PARA COORDENADAS X, Y
T1	10
T2	25
T3	40
T4 5X5	X:25, Y:25
T4 5X10	X:50, Y:25
T4 5X15	X:75, Y:25

Tabla G-7.: Puntos de Medición - Tomas Estáticas Cilindros de 5x5, 5x10 y 5x15.

PUNTO	DISTANCIA (mm) / DISTANCIA (mm) PARA COORDENADAS X, Y
T1	15
T2	32,5
T3	50
T4	67,5
T5	85
T6 5X5	X:25, Y:50
T6 5X10	X:50, Y:50
T6 5X15	X:75, Y:50

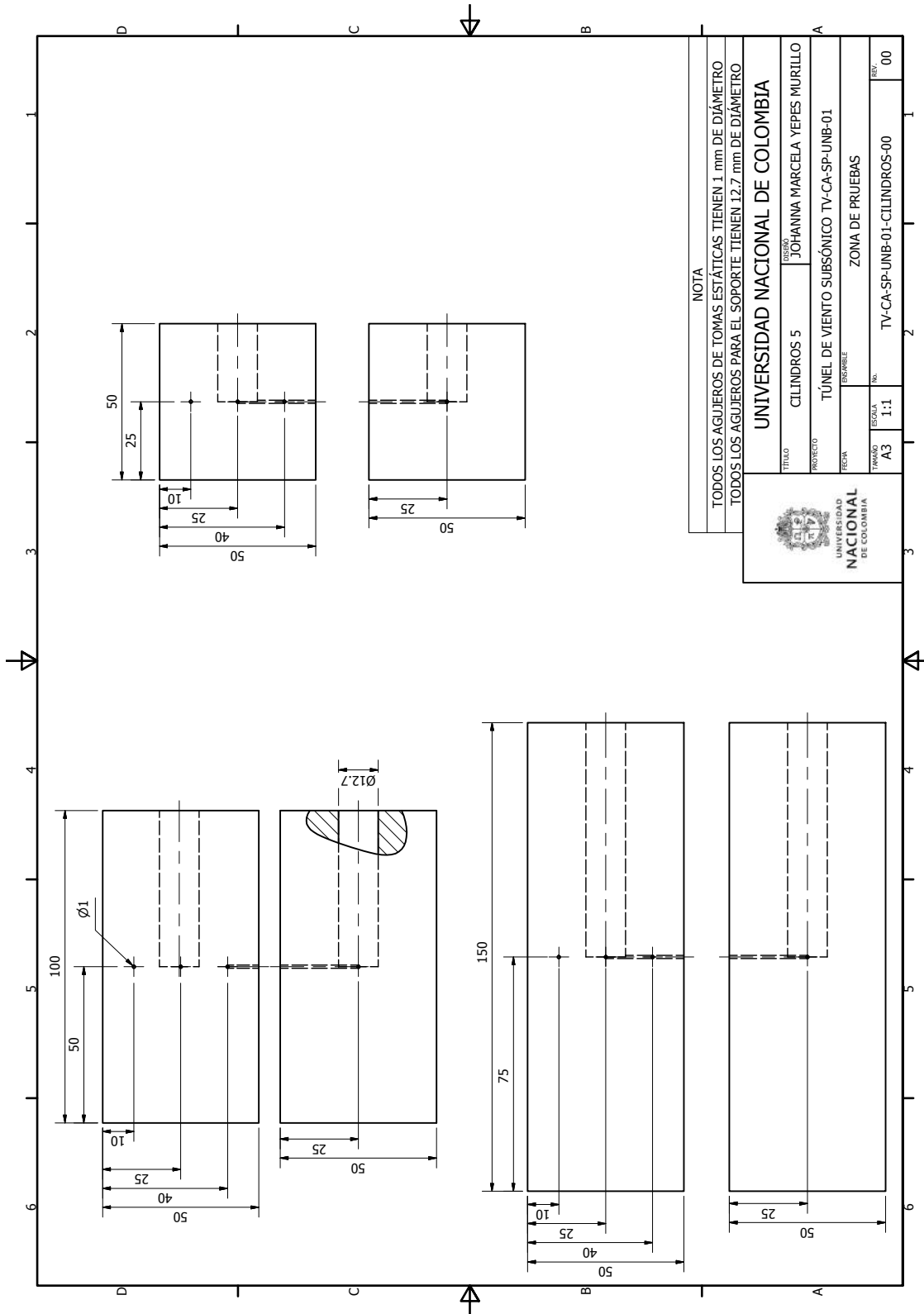
Tabla G-8.: Puntos de Medición - Tomas Estáticas Cilindros de 10x5, 10x10 y 10x15.

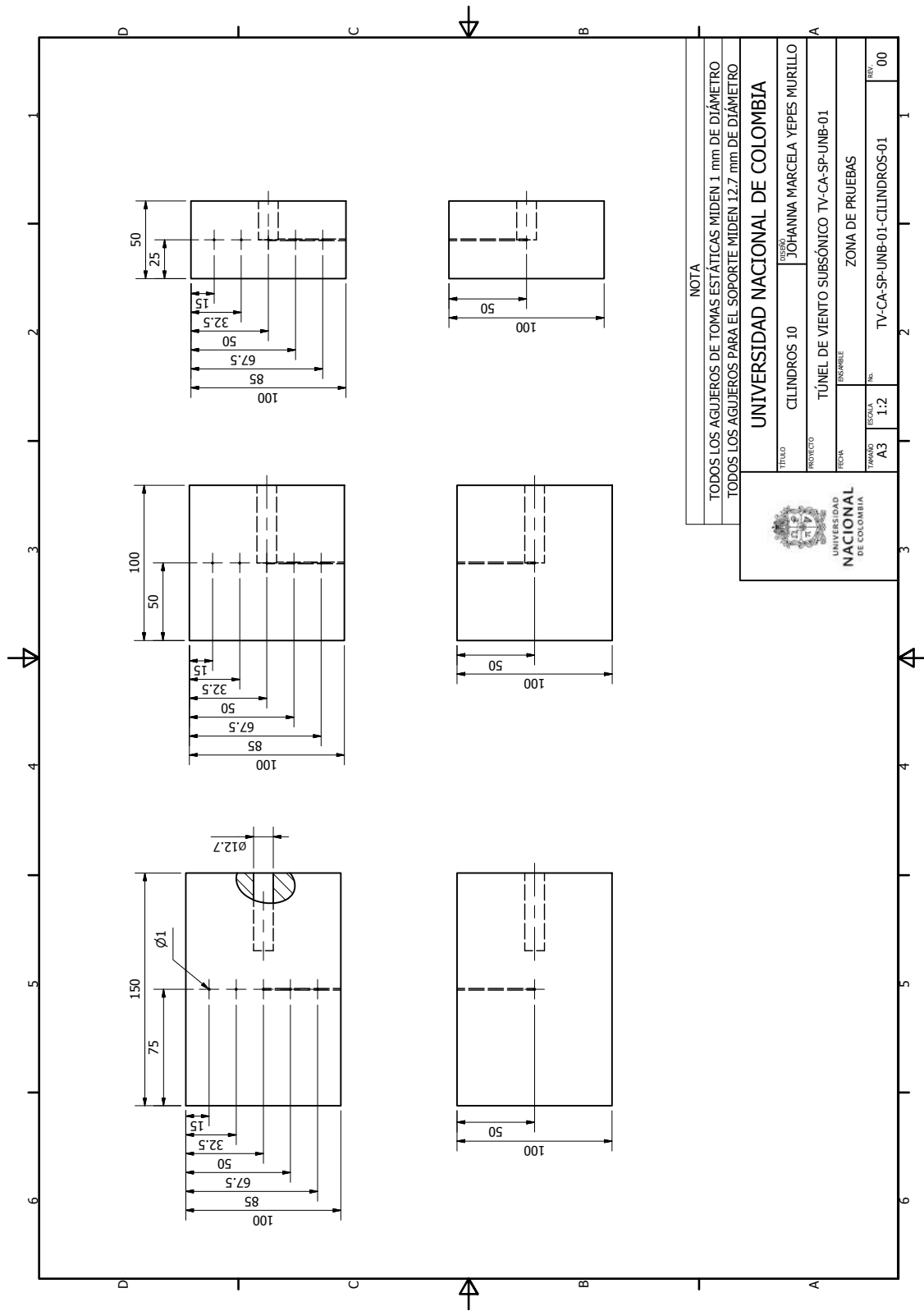
PUNTO	DISTANCIA (mm) / DISTANCIA (mm) PARA COORDENADAS X, Y
T1	12
T2	37,5
T3	75
T4	100,5
T5	138
T6 5X5	X:25, Y:75
T6 5X10	X:50, Y:75
T6 5X15	X:75, Y:75

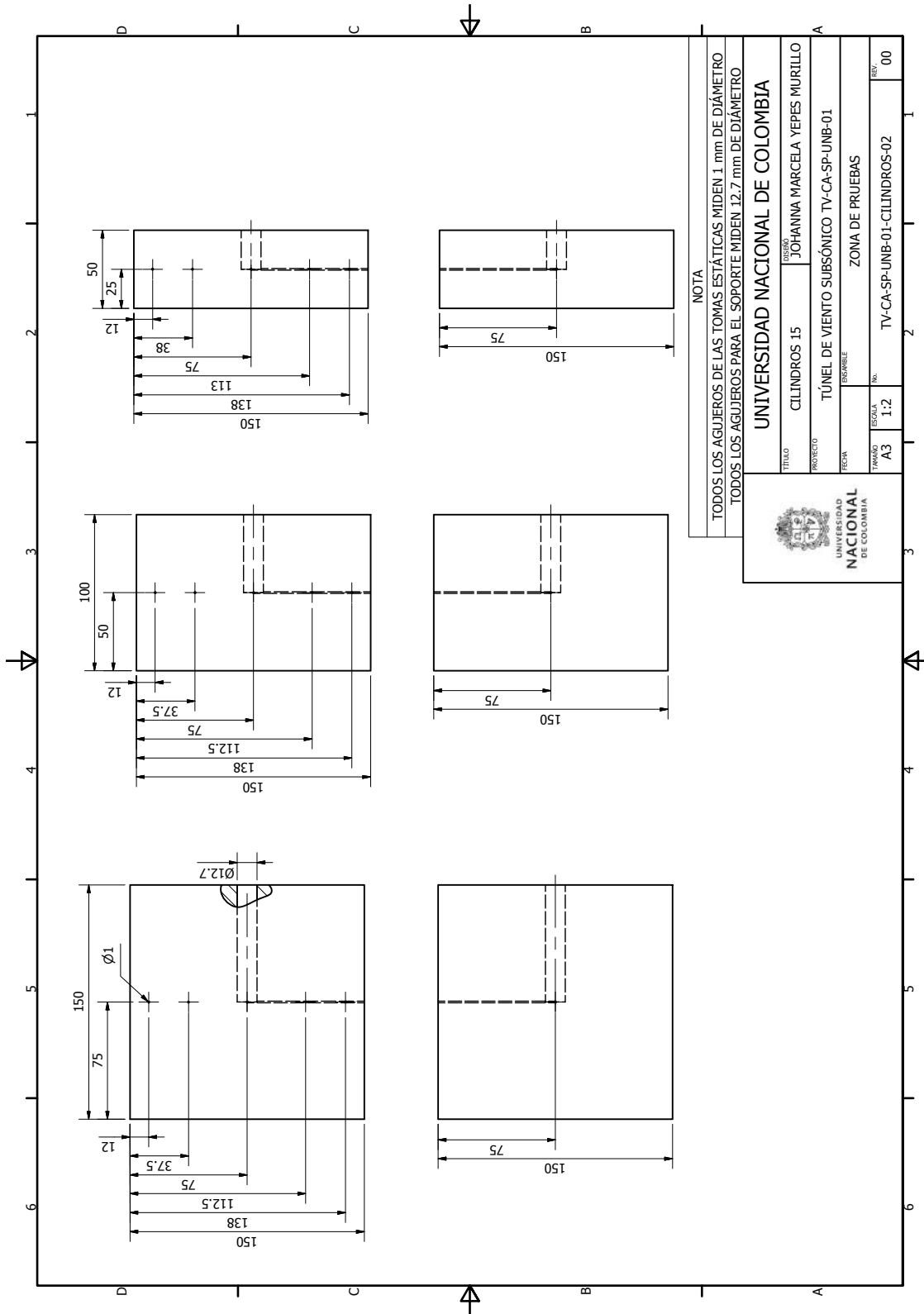
Tabla G-9.: Puntos de Medición - Tomas Estáticas Cilindros de 15x5, 15x10 y 15x15.

H. Anexo H: ESPECIFICACIONES DE DISEÑO CILINDROS RECTANGULARES

A continuación se presentan los planos de diseño de los cilindros rectangulares, en ellos se especifican los puntos de ubicación de las tomas estáticas.







I. Anexo I: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS EXTECH HD350

Anemómetro con Tubo de Pitot para servicio pesado y manómetro para presión diferencial Modelo HD350. Medidor portátil que permite medir velocidad del aire, flujo de aire, temperatura del aire y presión de calibrador/diferencial [1] (Ver Figura I-1) .



Figura I-1.: Especificaciones Técnicas EXTECH HD350 - Anemómetro Tubo Pitot + Manómetro Diferencial[1]

Las especificaciones técnicas se presentan en la Figura I-2.

Especificaciones	Rango	Resolución	Precisión
Presión			
psi	0.7252psi	0.0001psi	±0.3%FS
Mbar	50.00mbar	0.01mbar	±0.3%FS
inH ₂ O	20.07inH ₂ O	0.01inH ₂ O	±0.3%FS
mmH ₂ O	509.8mmH ₂ O	0.01mmH ₂ O	±0.3%FS
Pa	5000Pa	1Pa	±0.3%FS
Repetibilidad	±0.2% (Max. ±0.5%FS)	-	-
Linearidad / Histeresis	±0.29FS	-	-
Máxima presión	10psi	-	-
Tiempo de respuesta	0.5s típico	-	-
Velocidad del aire			
ft/min	200 a 15733	1	±3% rdg
m/s	1 a 80.00	0.01	±3% rdg
km/h	3.5 a 288.0	0.1	±3% rdg
MPH	2.25 a 178.66	0.01	±3% rdg
nudos	2.0 a 154.6	0.1	±3% rdg
Flujo de aire			
CFM	0 a 99,999	0.001	±3% rdg
CMM	0 a 99,999	0.001	±3% rdg
Temperatura			
°F	32.0 a 122.0°F	0.1°	±2°F
°C	0 a 50°C	0.1°	±1°C
Dimension / peso			
Meter: 8.2 x 2.9 x 1.9" (210 x 75 x 50mm) / 12oz (340g)			
Pitot Tube: 15.4 x 7.7" (390 x 195mm) / 7.2oz (204g)			

Figura I-2.: Especificaciones Técnicas EXTECH HD350 - Especificaciones Técnicas Anemómetro Tubo Pitot + Manómetro Diferencial [1]

J. Anexo J: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS TERMOHIGRÓMETRO Y BARÓMETRO REGISTRADOR DE DATOS PCE-THB 40

Registrador de datos que detecta la temperatura y humedad ambiental, así como la presión barométrica [44].



Figura J-1.: Especificaciones Técnicas Termohigrómetro y Barómetro Registrador de Datos PCE-THB 40 - Termohigrómetro y Barómetro [44]

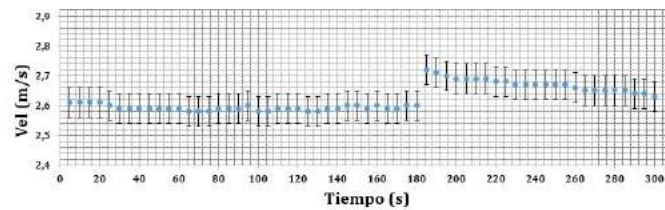
Las especificaciones técnicas se presentan en la Figura J-2.

Especificaciones técnicas

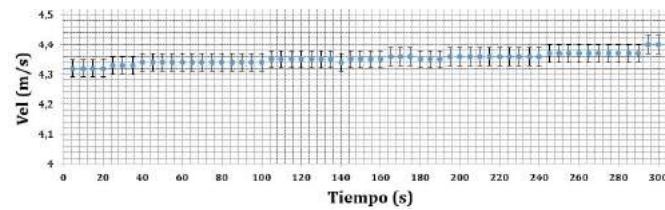
Rangos de medición	
-Temperatura	0 ... + 50°C
-Humedad relativa del aire	10 ... 90 % H.r.
-Presión barométrica	10 ... 1100 hPa (mbar)
Resolución	
-Temperatura	0,1 °C
-Humedad relativa del aire	0,1% H.r.
-Presión barométrica	0,1 hPa a 1000 hPa (sino 1 hPa)
Precisión	
-Temperatura	±0,8 °C
-Humedad relativa del aire	±4 % H.r. del valor medido ±1 % H.r. (>70 % H.r., sino ±4 % H.r.)
-Presión barométrica	±2 hPa a 1000 hPa, sino ±3 hPa
Cuota de medición	
	5,10, 30, 60, 120, 300 o 600 segundos, o automático (almacena un dato cuando hay una alteración del valor de ±1 °C, ±1 % H.r. o ±1 hPa)
Memoria	
	flexible, mediante tarjeta de memoria SD 1 ... 16 GB (se incluye en el envío tarjeta de 2 GB)
Temperatura ambiental	
	0 ... +50 °C; <90 % H.r.
Alimentación	
	6 x 1,5 baterías AAA / 9 V adaptador de red (opcional)
Dimensiones	
	132 x 80 x 32 mm
Peso (batería incluida)	
	285 g

Figura J-2.: Especificaciones Técnicas Termohigrómetro y Barómetro Registrador de Datos PCE-THB 40 - Especificaciones Técnicas Generales [44]

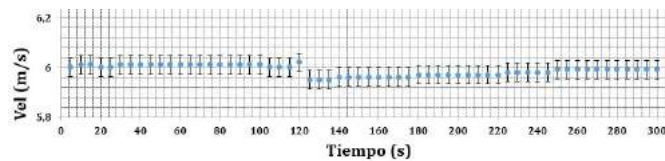
K. Anexo K: RANGO DE VELOCIDAD A LO LARGO DEL TIEMPO



(a) Velocidad Vs Tiempo. 10 Hz.

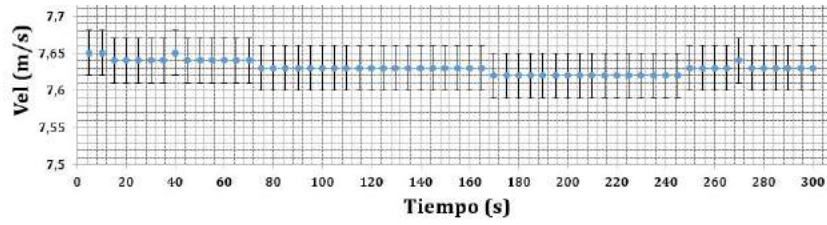


(b) Velocidad Vs Tiempo. 15 Hz.

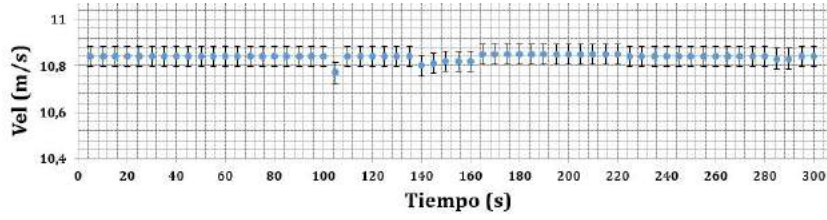


(c) Velocidad Vs Tiempo. 20 Hz.

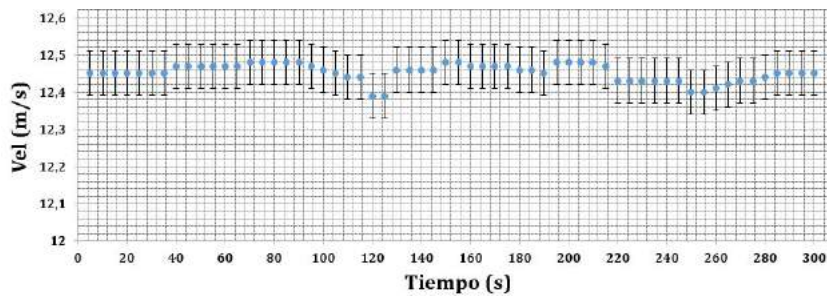
Figura K-1.: Rango de Velocidad a lo Largo del Tiempo - Velocidad Vs Tiempo 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz.



(a) Velocidad Vs Tiempo. 25 Hz.

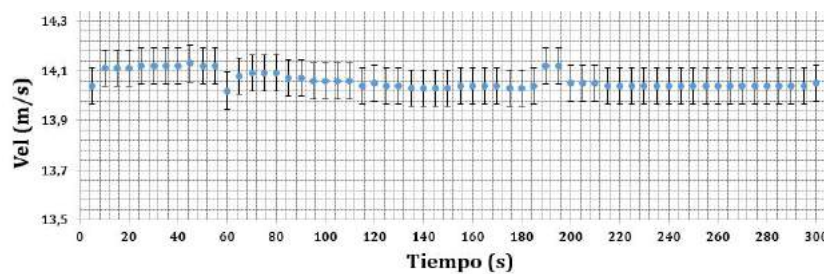


(b) Velocidad Vs Tiempo. 35 Hz.

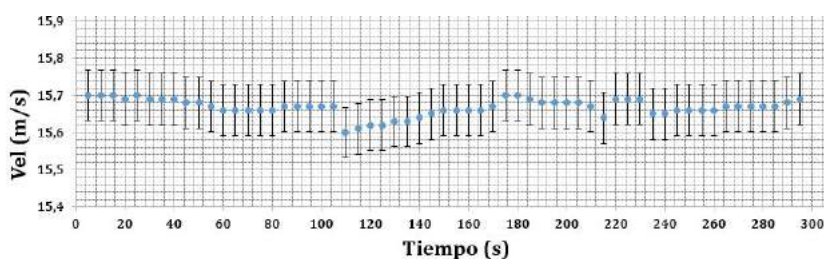


(c) Velocidad Vs Tiempo. 40 Hz.

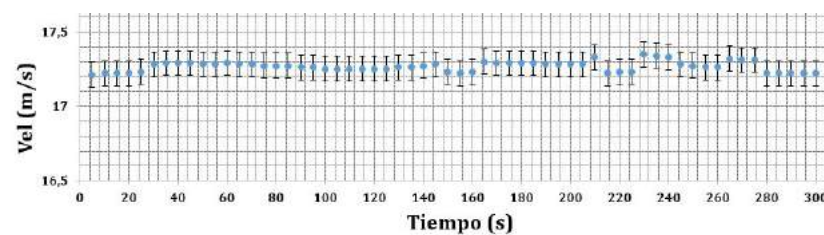
Figura K-2.: Rango de Velocidad a lo Largo del Tiempo - Velocidad Vs Tiempo 25 Hz, 35 Hz, 40 Hz.



(a) Velocidad Vs Tiempo. 45 Hz.



(b) Velocidad Vs Tiempo. 50 Hz.



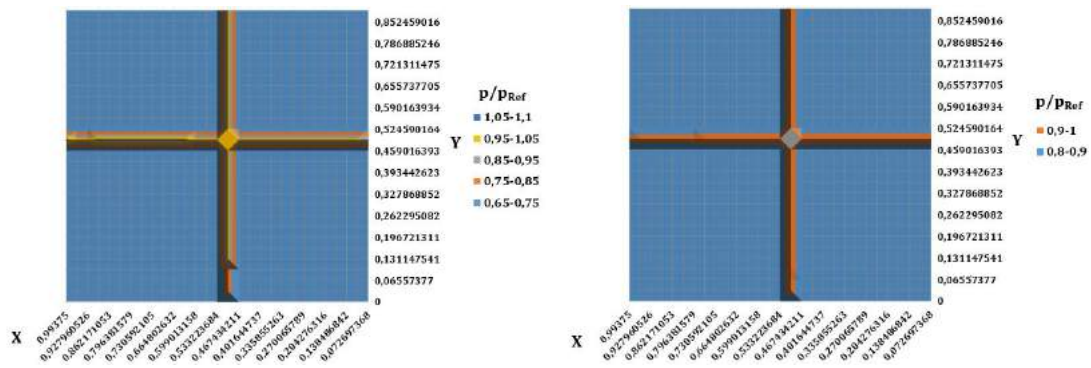
(c) Velocidad Vs Tiempo. 55 Hz.

Figura K-3.: Rango de Velocidad a lo Largo del Tiempo - Velocidad Vs Tiempo 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz.

Frecuencia	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz	55 Hz
Media	2,623	4,351	5,987	7,630	10,838	12,452	14,060	15,667	17,266
Desv. Estándar	0,041	0,016	0,020	0,008	0,012	0,023	0,032	0,022	0,033
Varianza	0,001	0,0002	0,0004	0,00006	0,0001	0,0005	0,001	0,0005	0,001
Coef de Var	0,041	0,016	0,020	0,008	0,012	0,023	0,032	0,022	0,033
Valor Min	2,58	4,32	5,95	7,62	10,77	12,39	14,02	15,6	17,21
Valor Max	2,72	4,40	6,02	7,65	10,85	12,48	14,13	15,7	17,35

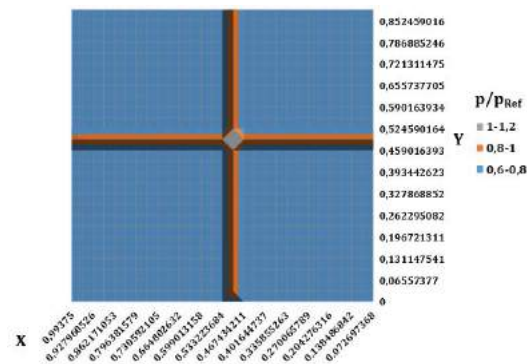
Tabla K-1.: Rango de Velocidad a lo Largo del Tiempo - Datos Estadísticos Frecuencias de 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz.

L. Anexo L: MAPA DE PRESIÓN



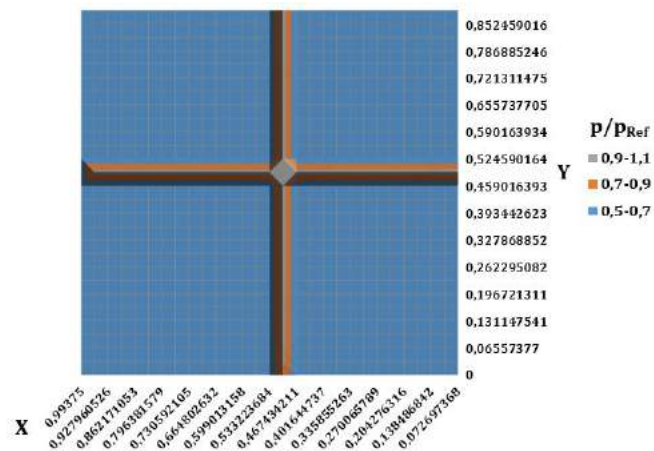
(a) Mapa de Presión. 10 Hz.

(b) Mapa de Presión. 15 Hz.

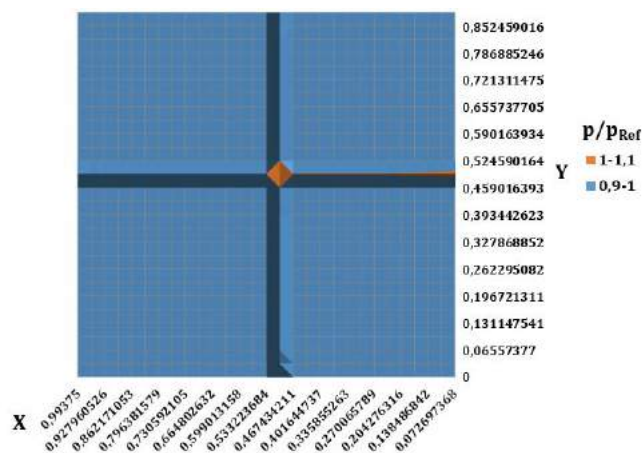


(c) Mapa de Presión. 20 Hz.

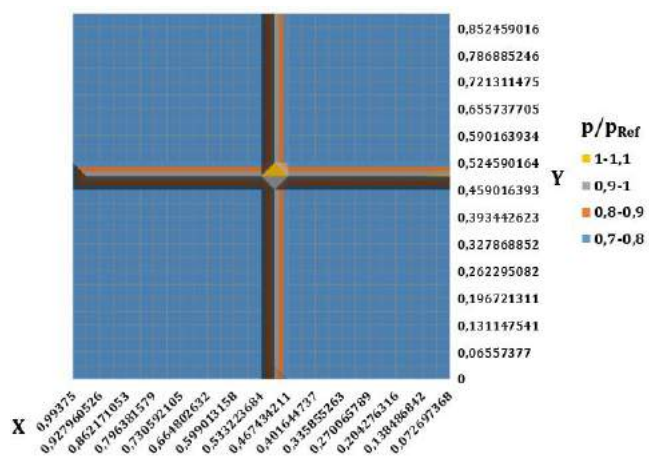
Figura L-1.: Mapa de Presión - Mapa de Presión Frecuencias de Operación 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz.



(a) Mapa de Presión. 25 Hz.



(b) Mapa de Presión. 35 Hz.



(c) Mapa de Presión. 40 Hz.

Figura L-2.: Mapa de Presión - Mapa de Presión Frecuencias de Operación 25 Hz, 35 Hz, 40 Hz.

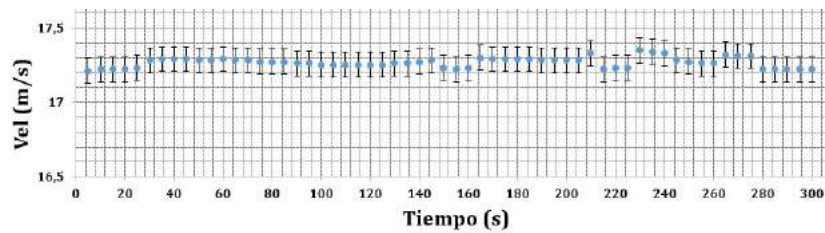
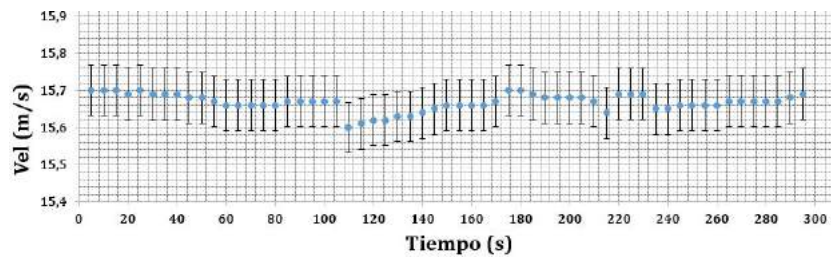
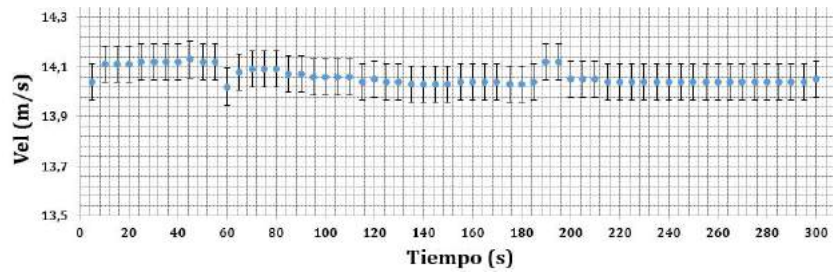
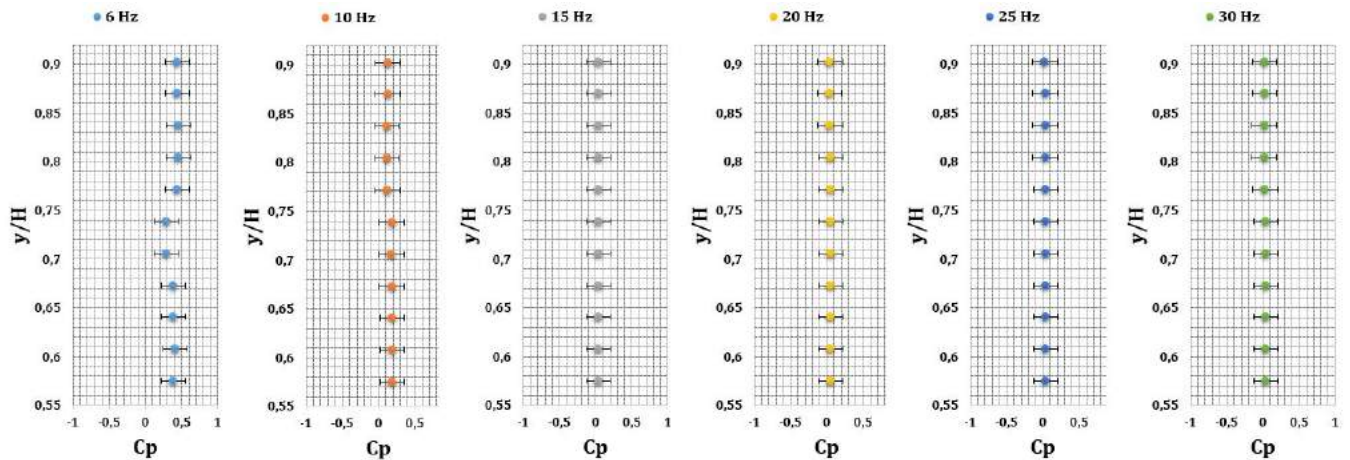


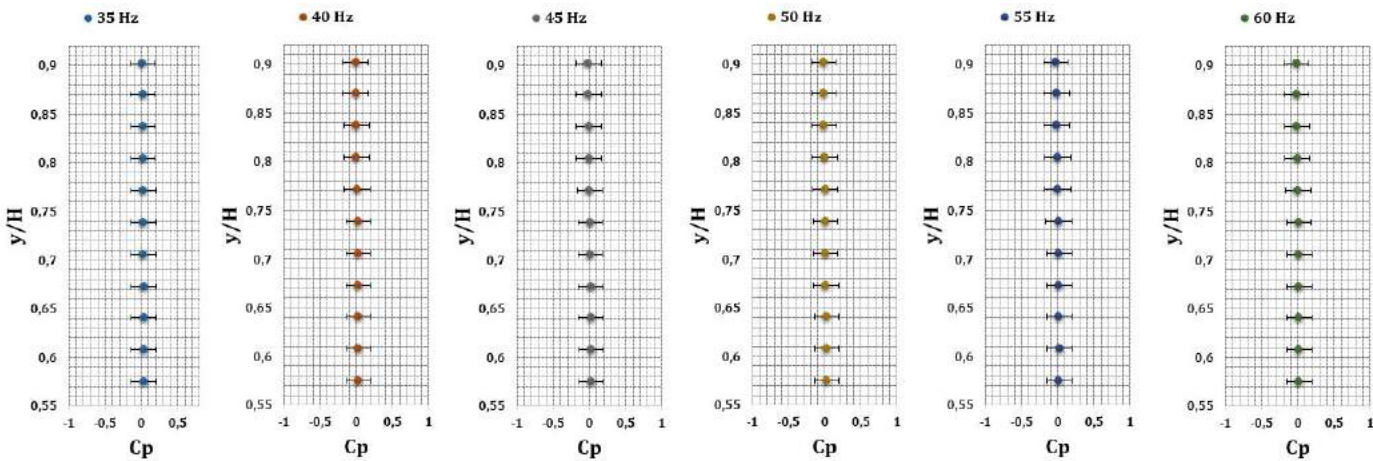
Figura L-3.: Mapa de Presión - Mapa de Presión Frecuencias de Operación 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz.

M. Anexo M: CASO DE FLUJO EXTERNO

M.1. Perfil de Velocidad

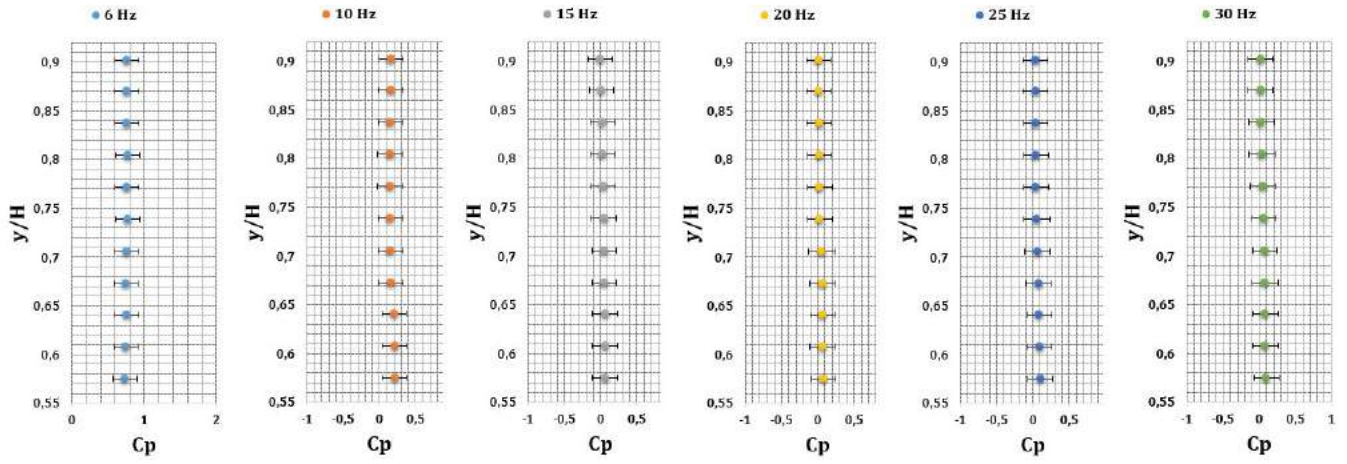


(a) Frecuencias de Operación 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

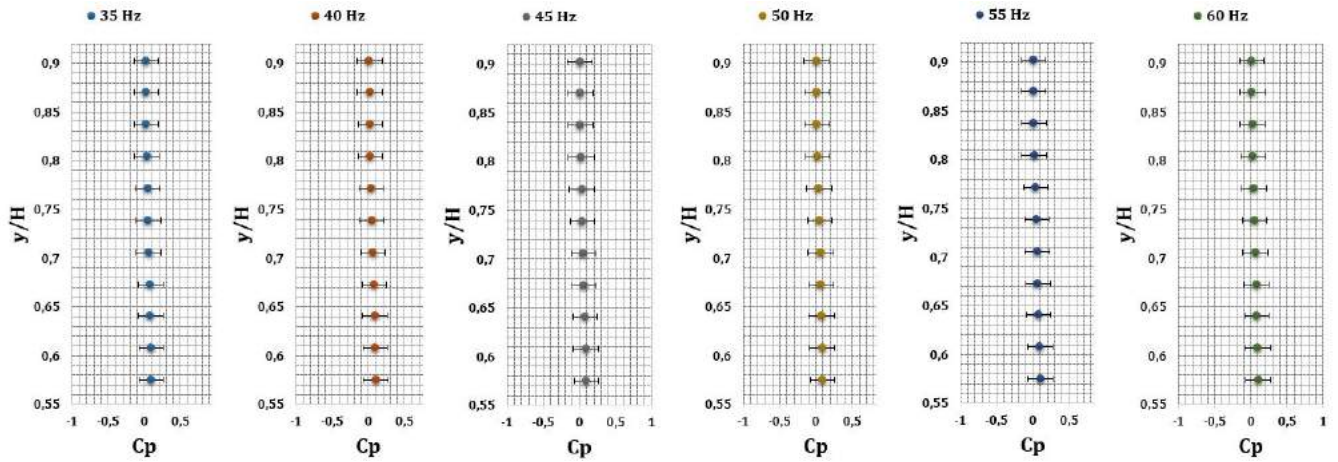


(b) Frecuencias de Operación 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura M-1.: Caso de Flujo Externo - Perfiles de Velocidad Cilindro Rectangular de 5x5.

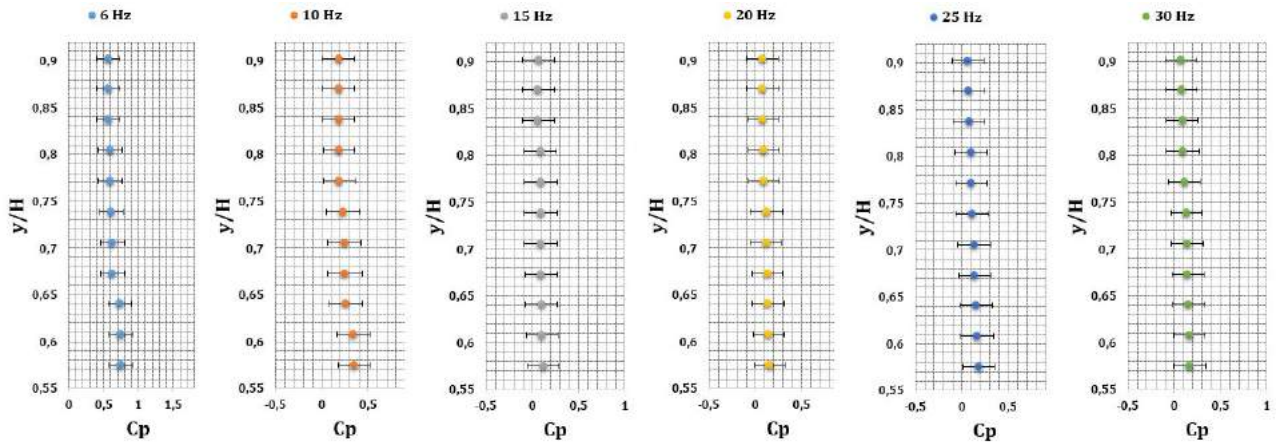


(a) Frecuencias de Operación 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

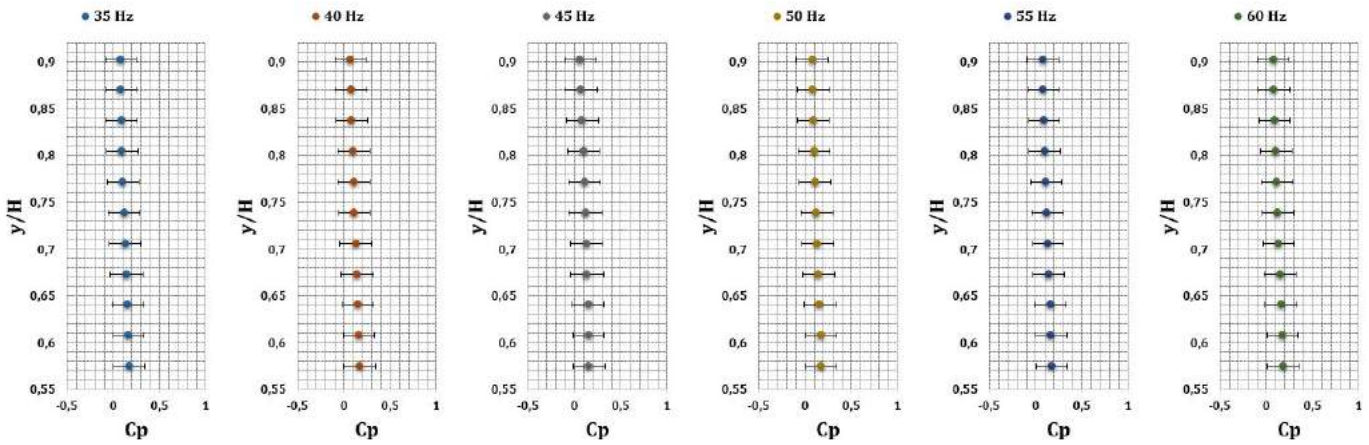


(b) Frecuencias de Operación 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura M-2.: Caso de Flujo Externo - Perfiles de Velocidad Cilindro Rectangular de 5x10.

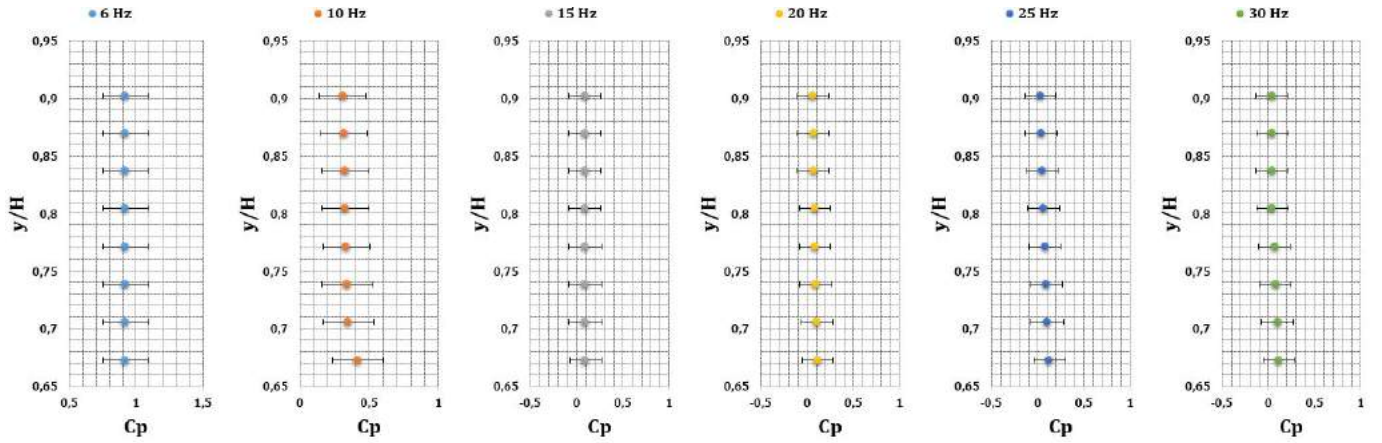


(a) Frecuencias de Operación 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

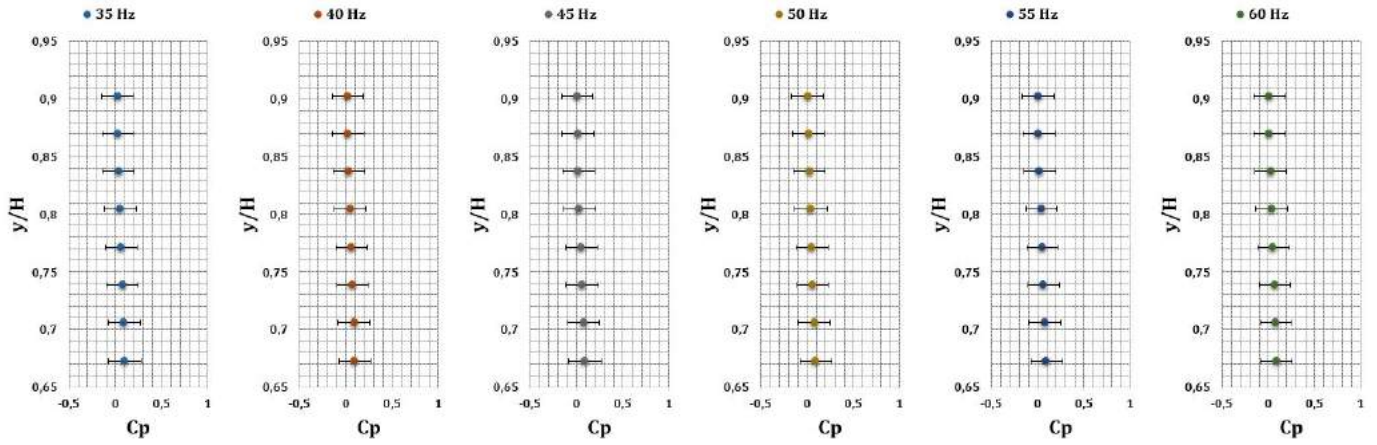


(b) Frecuencias de Operación 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura M-3.: Caso de Flujo Externo - Perfiles de Velocidad Cilindro Rectangular de 5x15.

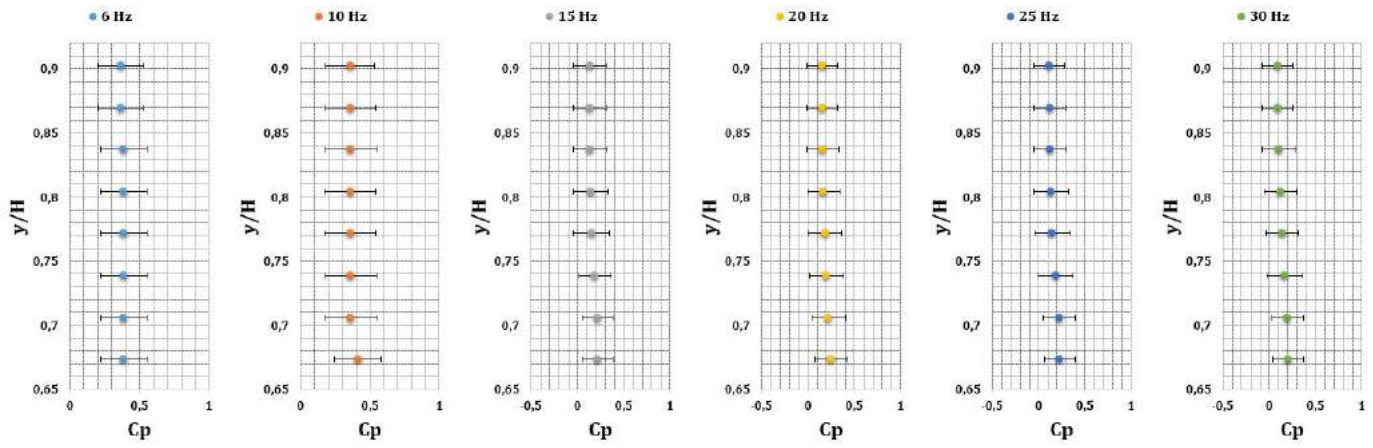


(a) Frecuencias de Operación 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

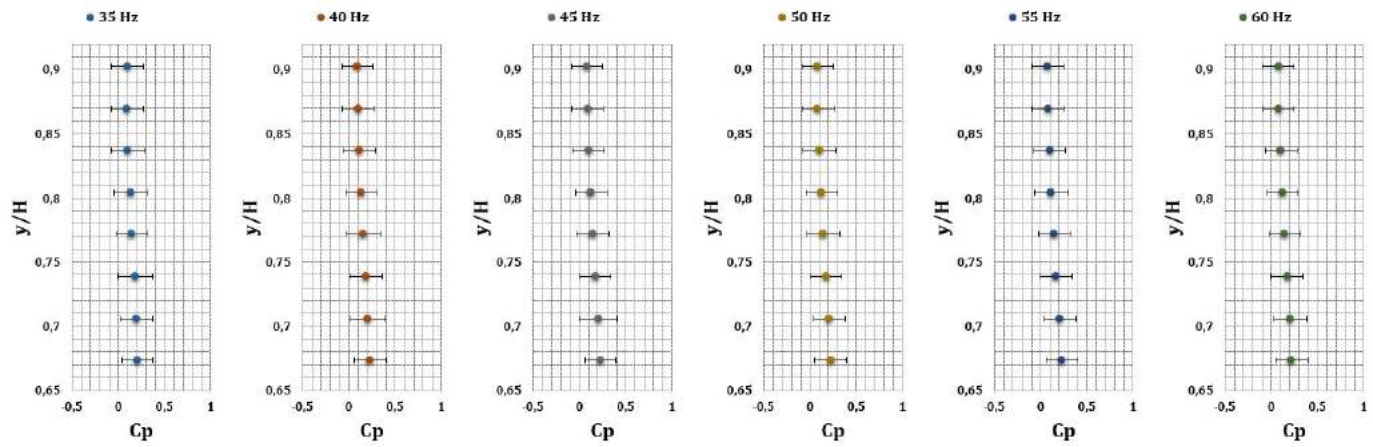


(b) Frecuencias de Operación 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura M-4.: Caso de Flujo Externo - Perfiles de Velocidad Cilindro Rectangular de 10x5.

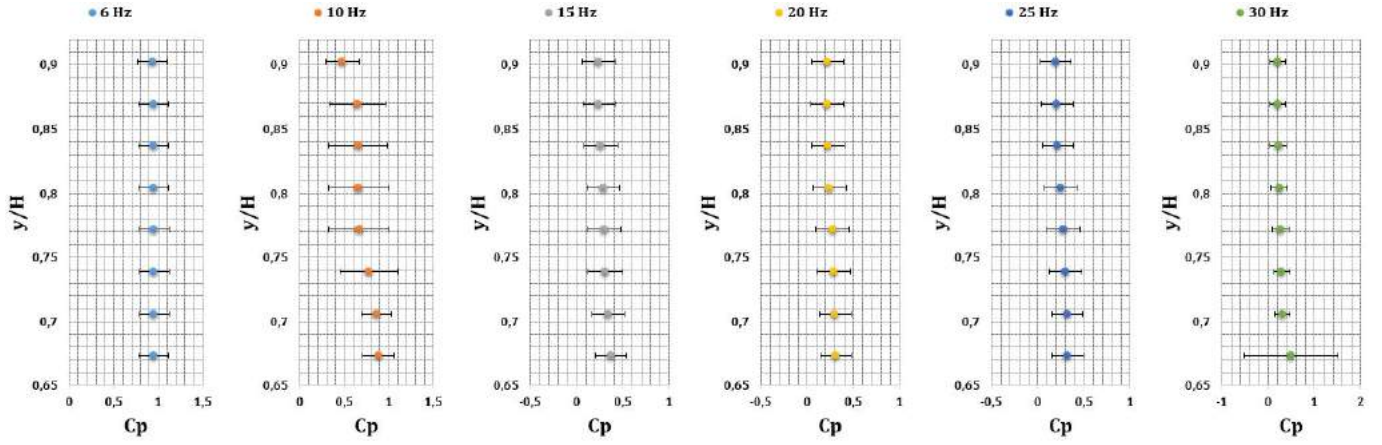


(a) Frecuencias de Operación 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

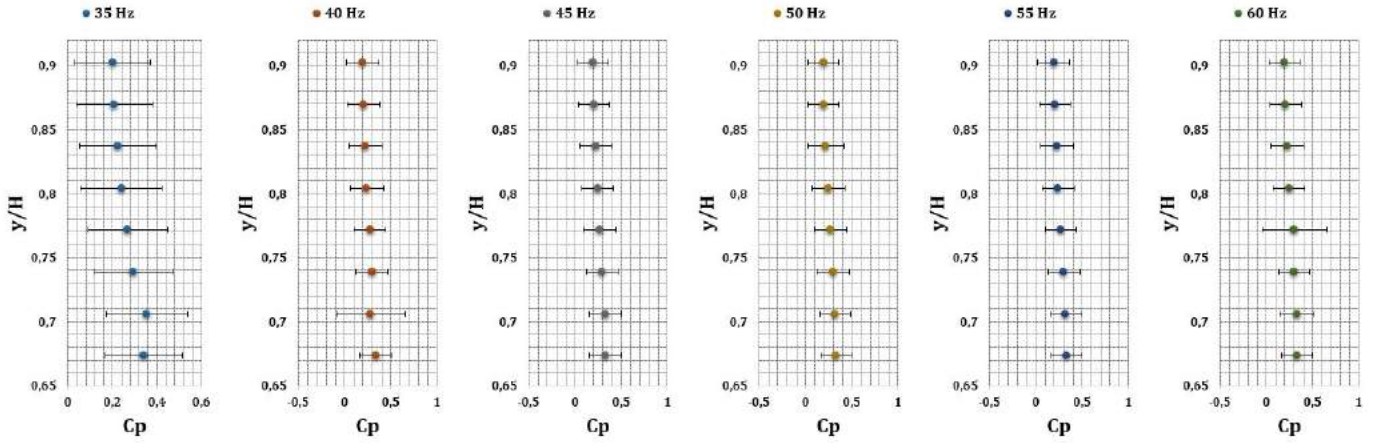


(b) Frecuencias de Operación 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura M-5.: Caso de Flujo Externo - Perfiles de Velocidad Cilindro Rectangular de 10x10.

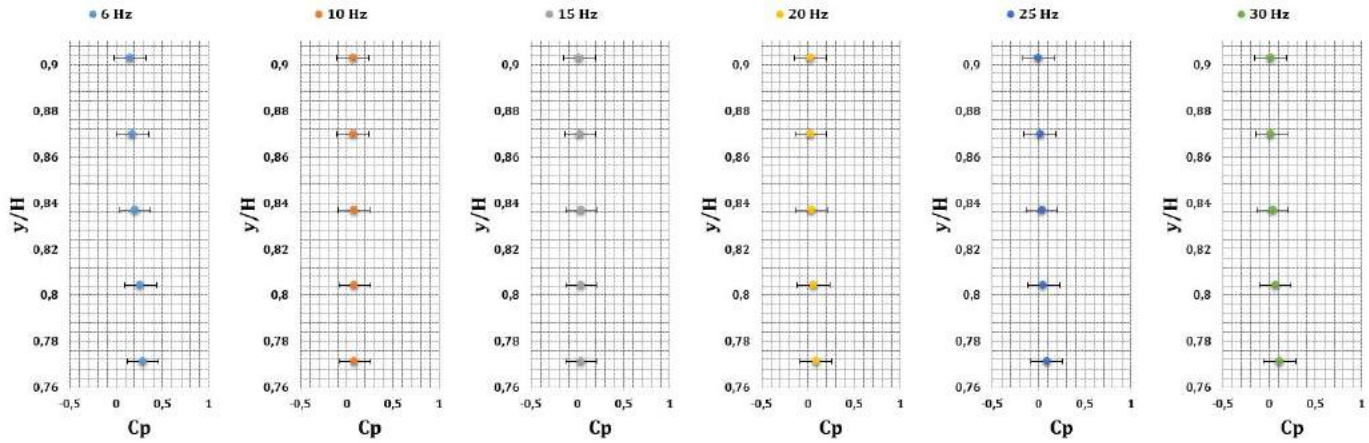


(a) Frecuencias de Operación 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

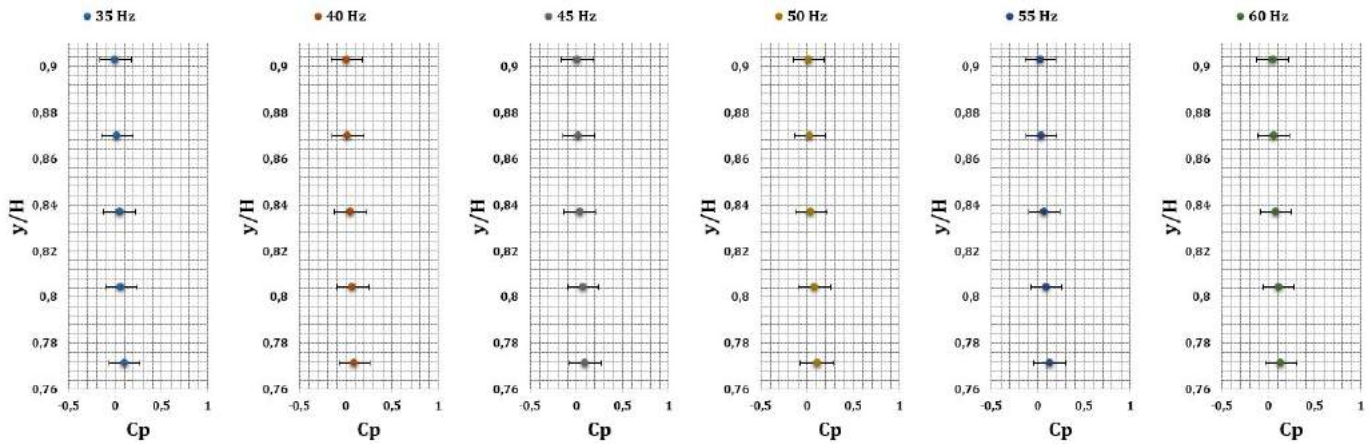


(b) Frecuencias de Operación 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura M-6.: Caso de Flujo Externo - Perfiles de Velocidad Cilindro Rectangular de 10x15.

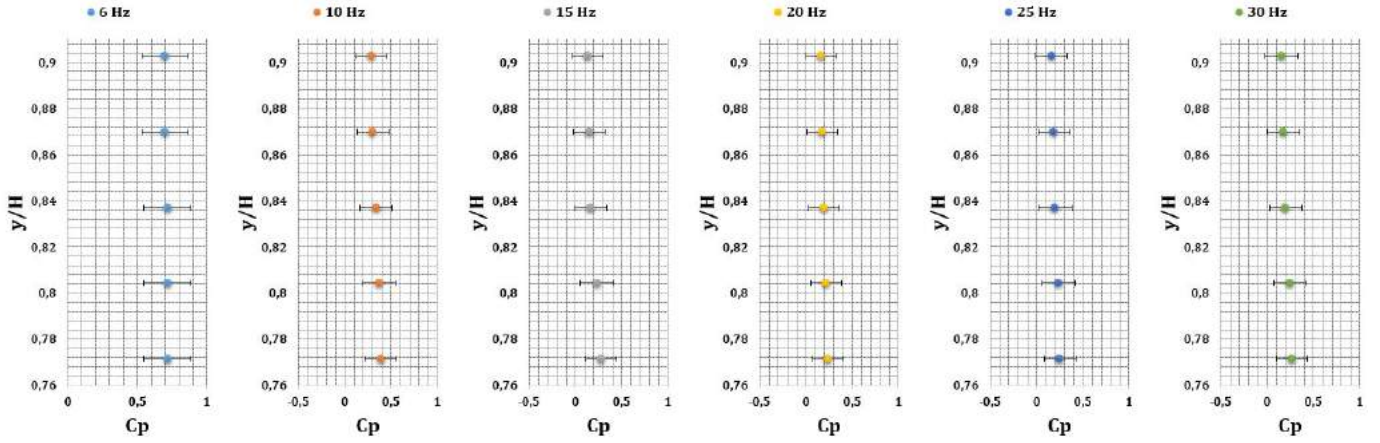


(a) Frecuencias de Operación 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

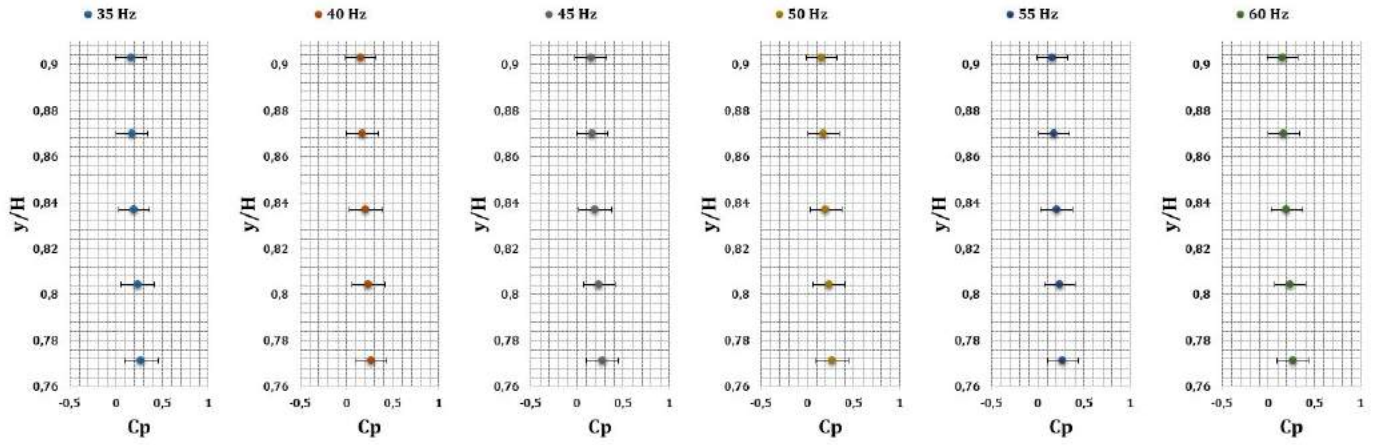


(b) Frecuencias de Operación 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura M-7.: Caso de Flujo Externo - Perfiles de Velocidad Cilindro Rectangular de 15x5.

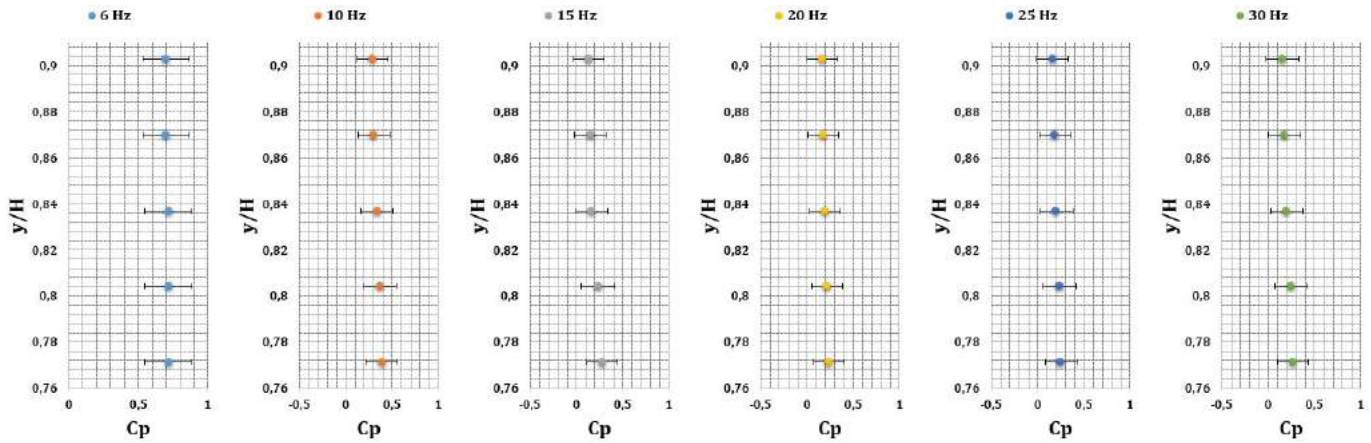


(a) Frecuencias de Operación 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

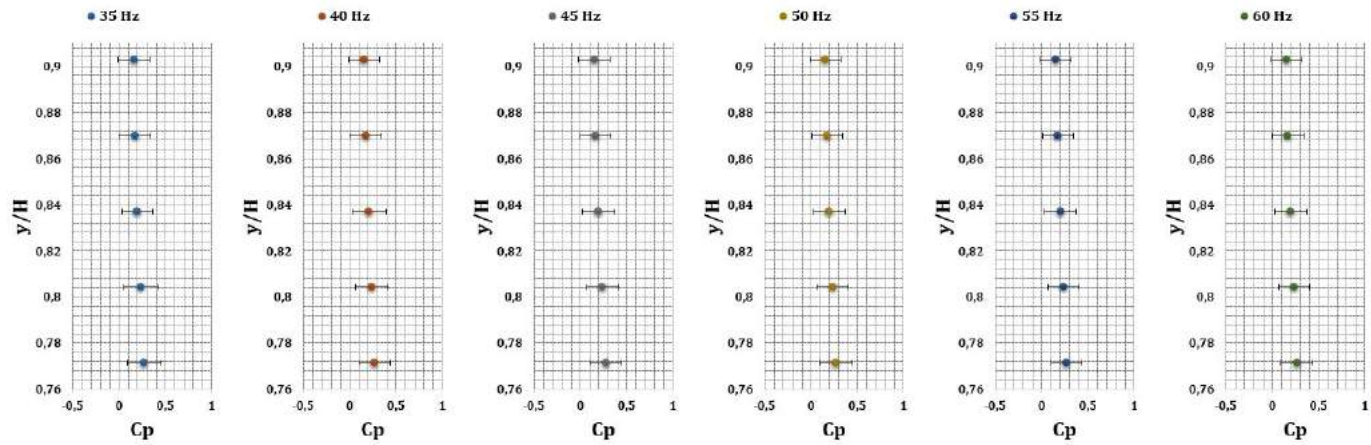


(b) Frecuencias de Operación 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura M-8.: Caso de Flujo Externo - Perfiles de Velocidad Cilindro Rectangular de 15x10.



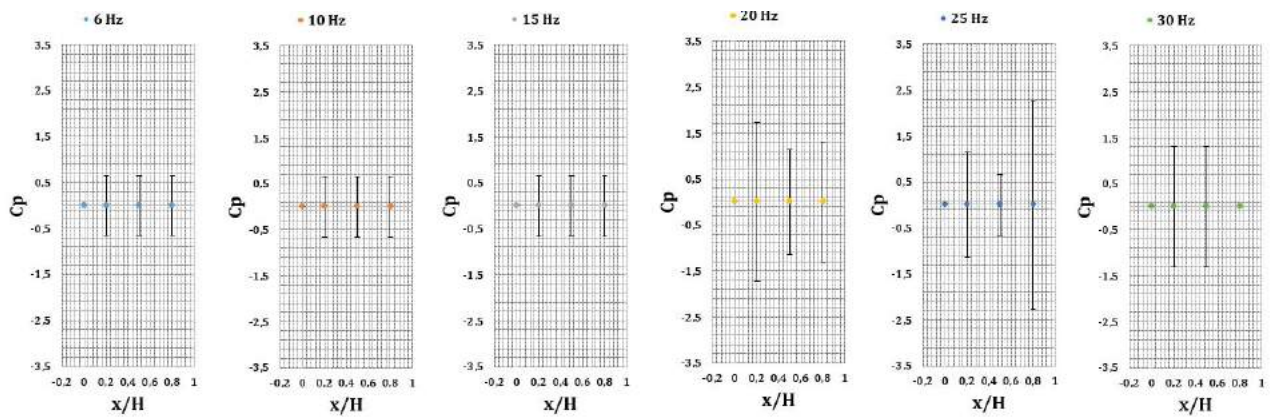
(a) Frecuencias de Operación 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.



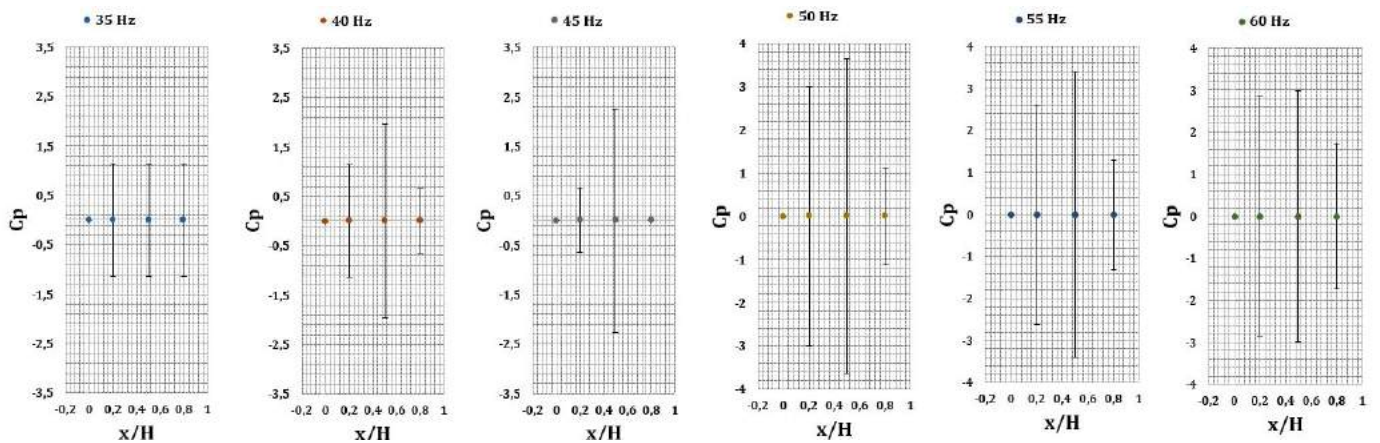
(b) Frecuencias de Operación 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura M-9.: Caso de Flujo Externo - Perfiles de Velocidad Cilindro Rectangular de 15x15.

M.2. Distribución de Presión

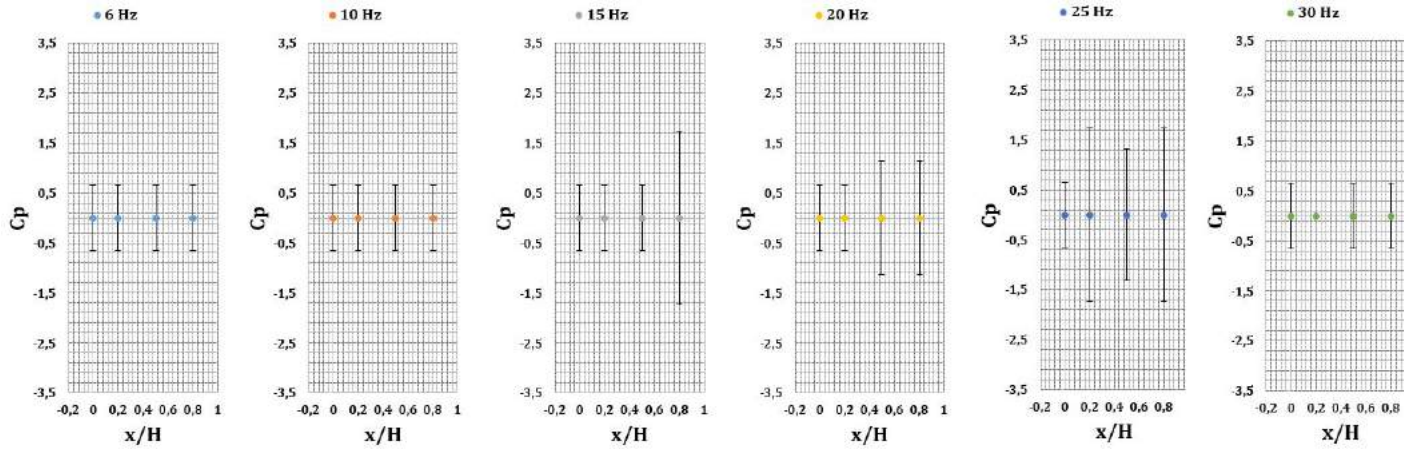


(a) Frecuencias de Operación 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

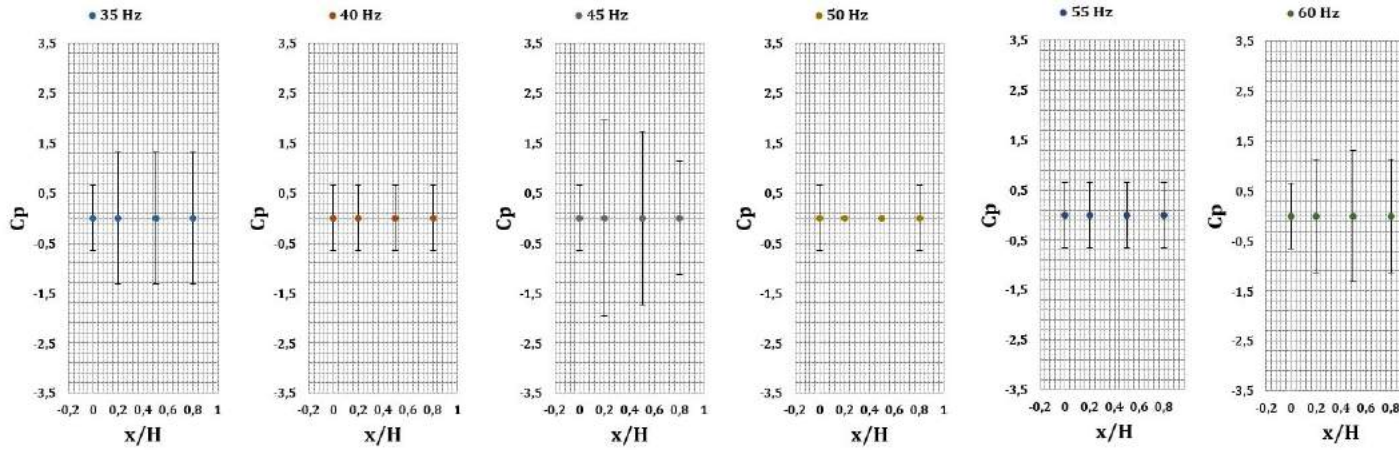


(b) Frecuencias de Operación 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura M-10.: Caso de Flujo Externo - Distribución de Presión Cilindro Rectangular de 5×5 .

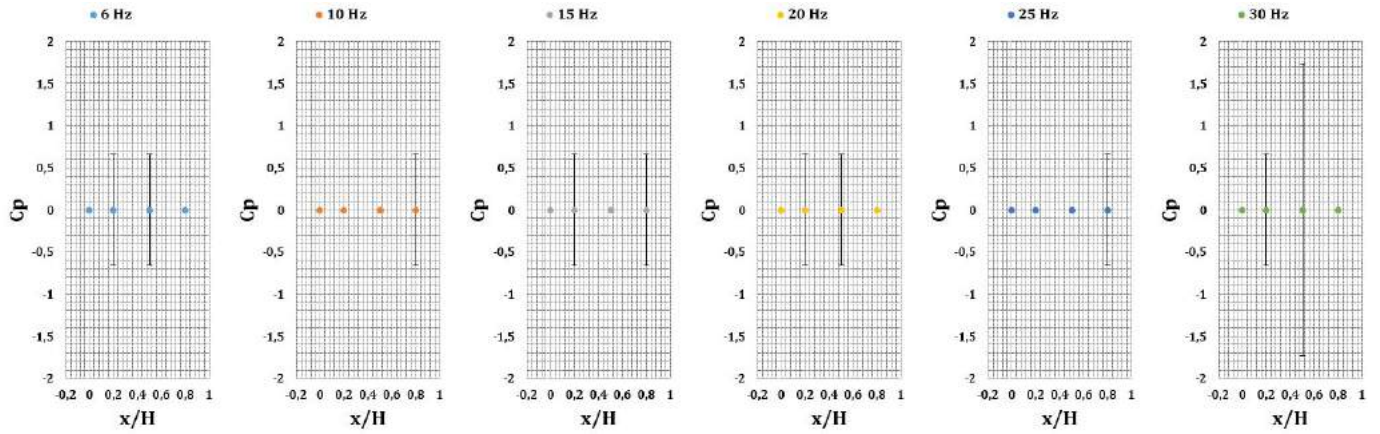


(a) Frecuencias de Operación 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

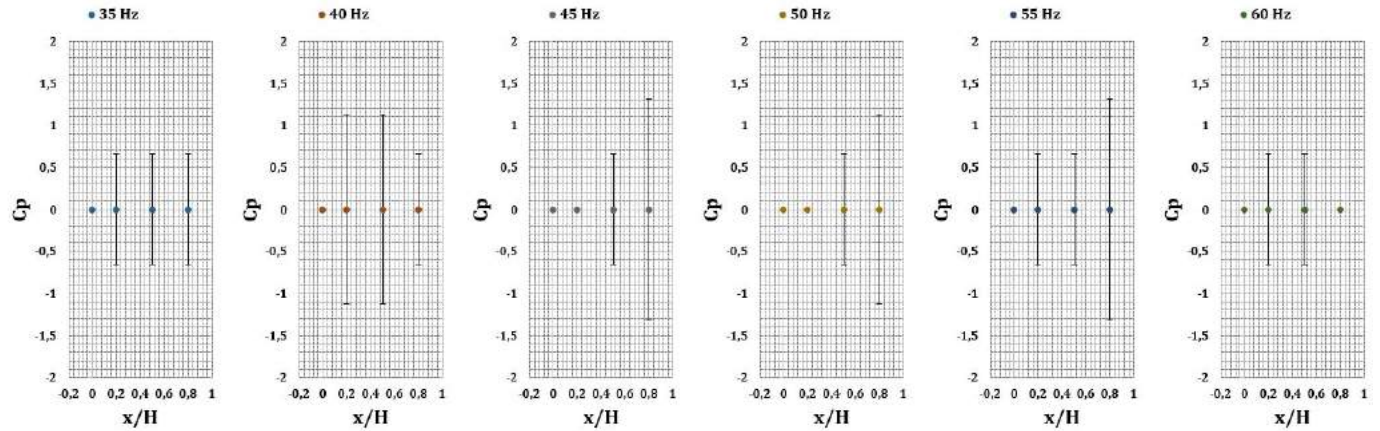


(b) Frecuencias de Operación 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura M-11.: Caso de Flujo Externo - Distribución de Presión Cilindro Rectangular de 5x10.

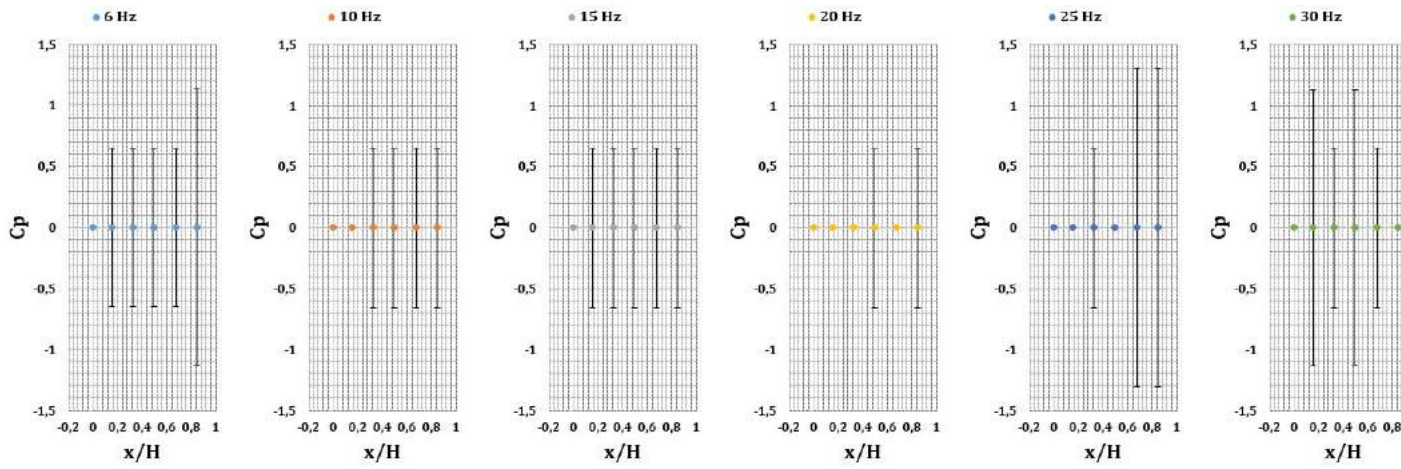


(a) Frecuencias de Operación 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

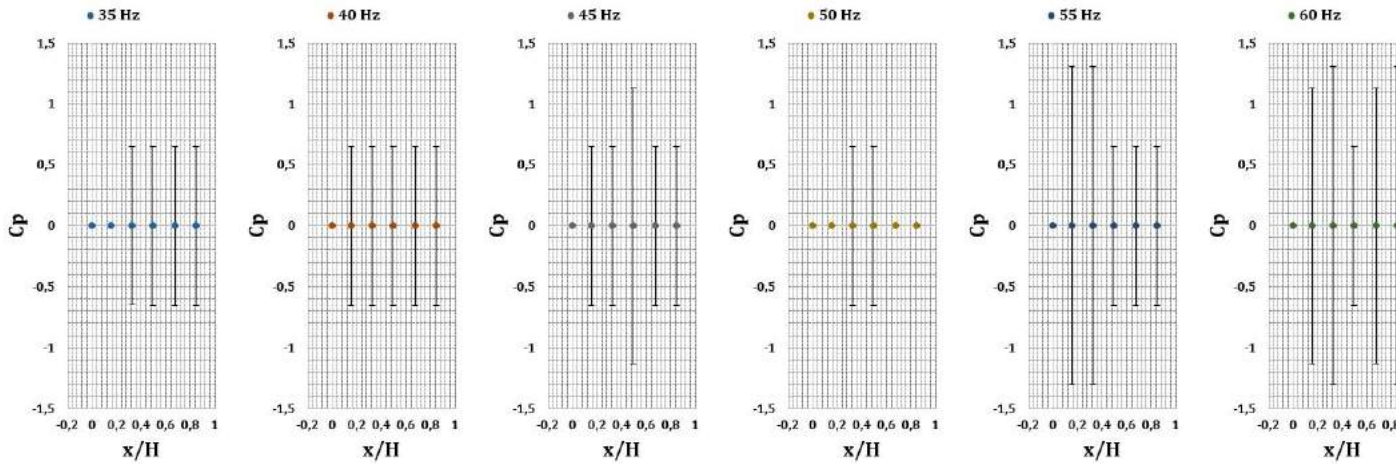


(b) Frecuencias de Operación 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura M-12.: Caso de Flujo Externo - Distribución de Presión Cilindro Rectangular de 5x15.

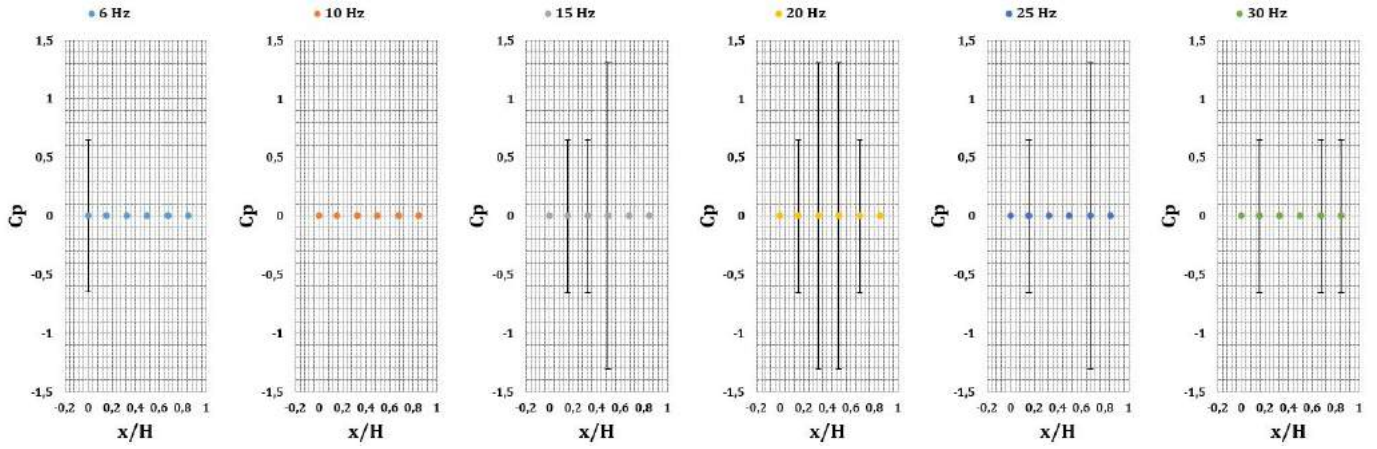


(a) Frecuencias de Operación 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

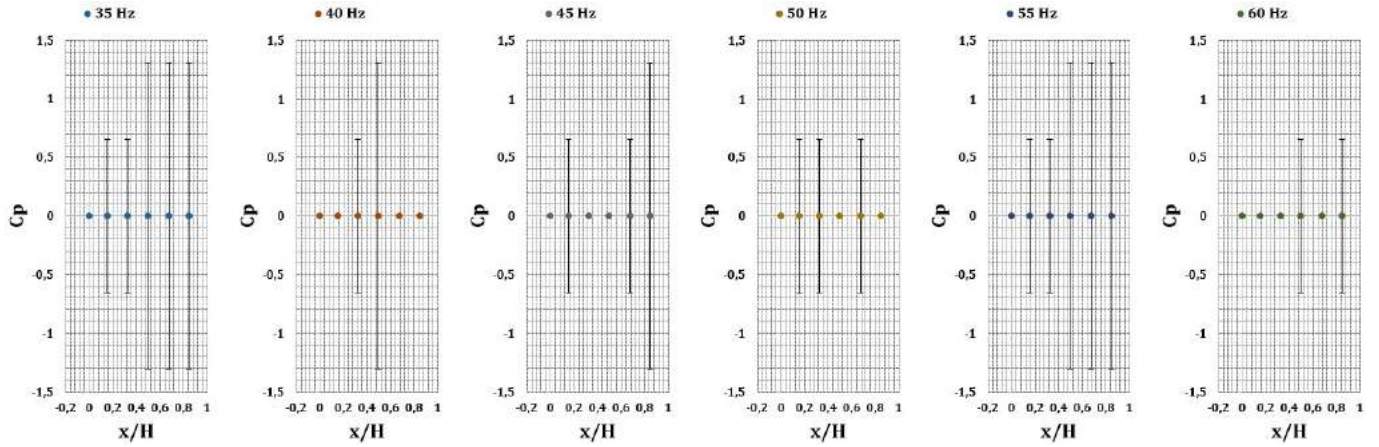


(b) Frecuencias de Operación 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura M-13.: Caso de Flujo Externo - Distribución de Presión Cilindro Rectangular de 10x5.

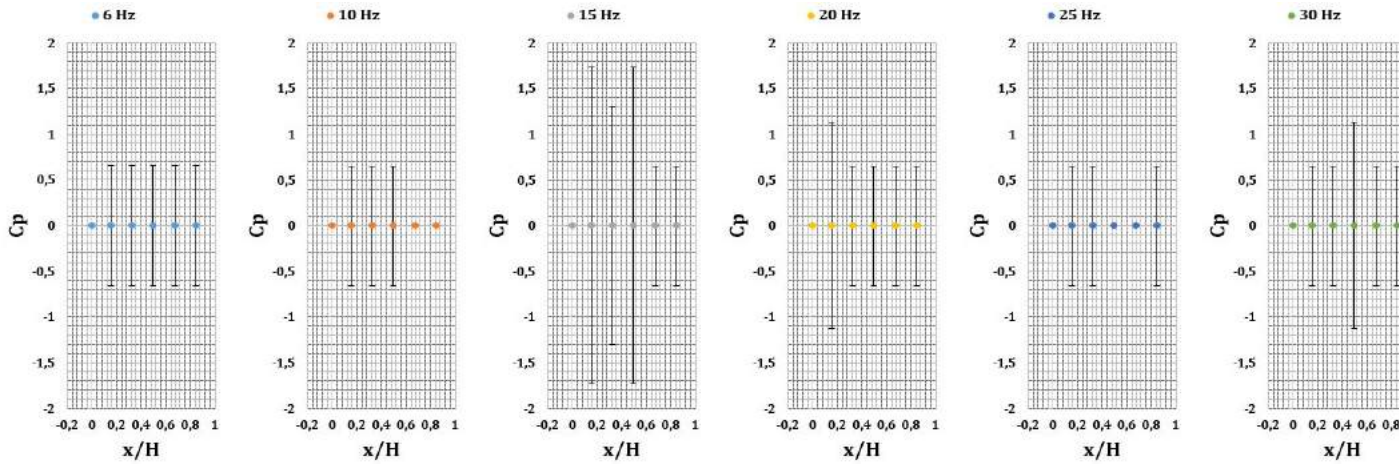


(a) Frecuencias de Operación 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

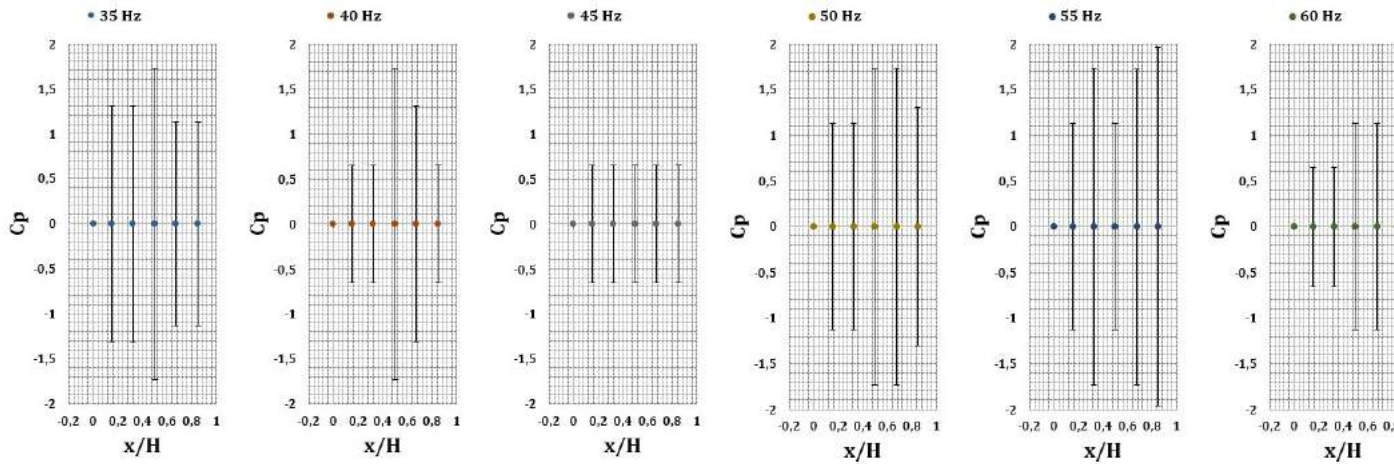


(b) Frecuencias de Operación 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura M-14.: Caso de Flujo Externo - Distribución de Presión Cilindro Rectangular de 10x10.

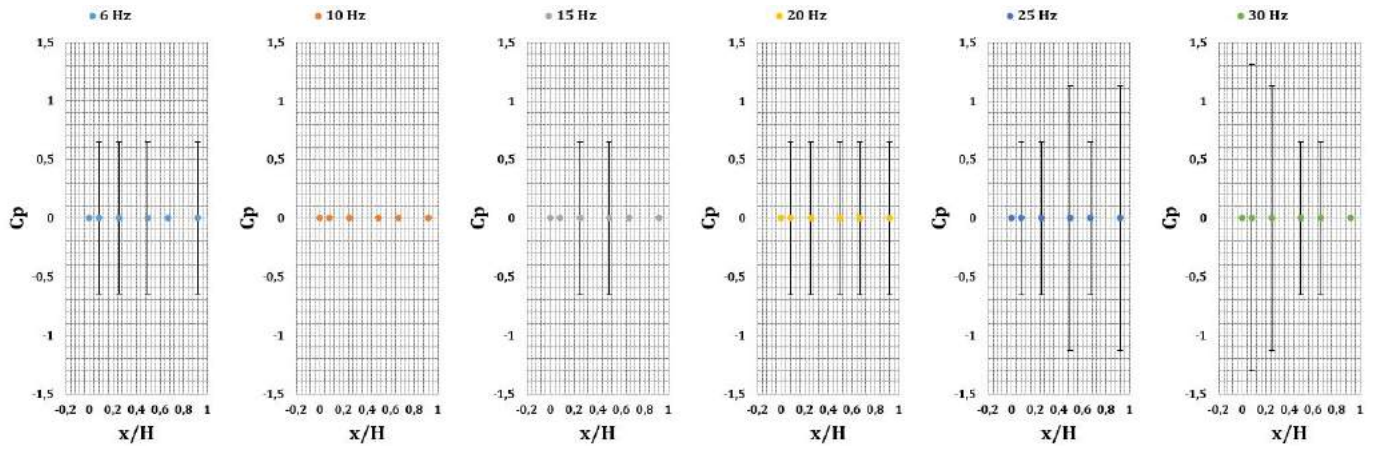


(a) Frecuencias de Operación 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

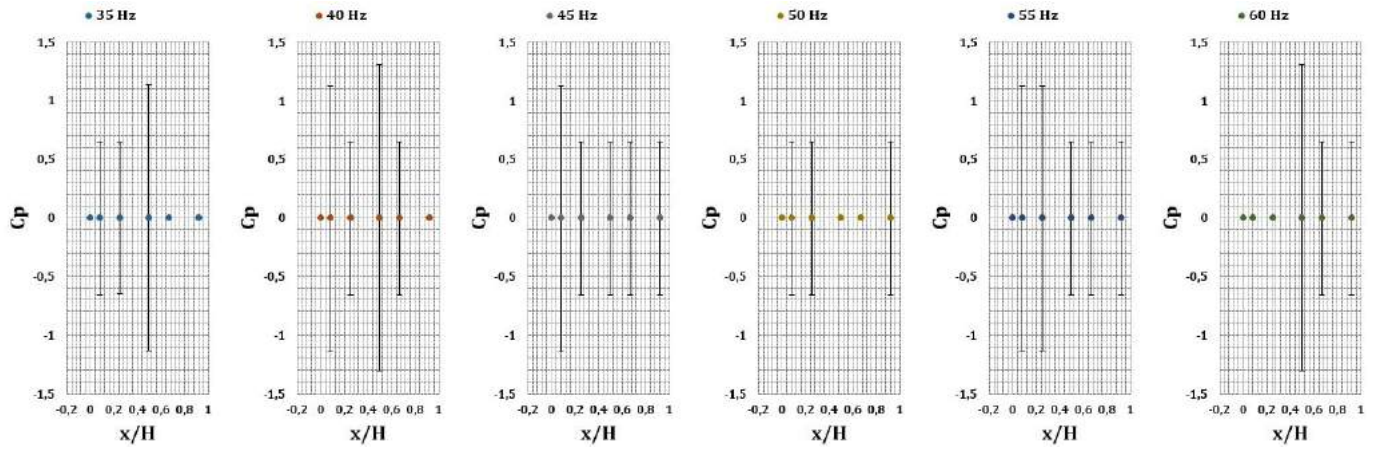


(b) Frecuencias de Operación 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura M-15.: Caso de Flujo Externo - Distribución de Presión Cilindro Rectangular de 10x15.

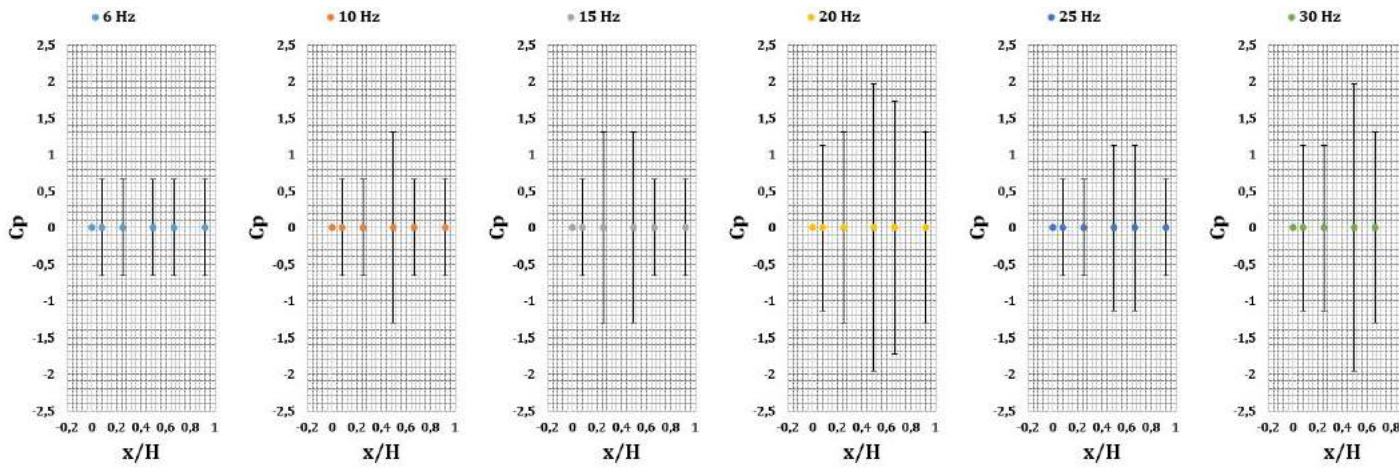


(a) Frecuencias de Operación 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

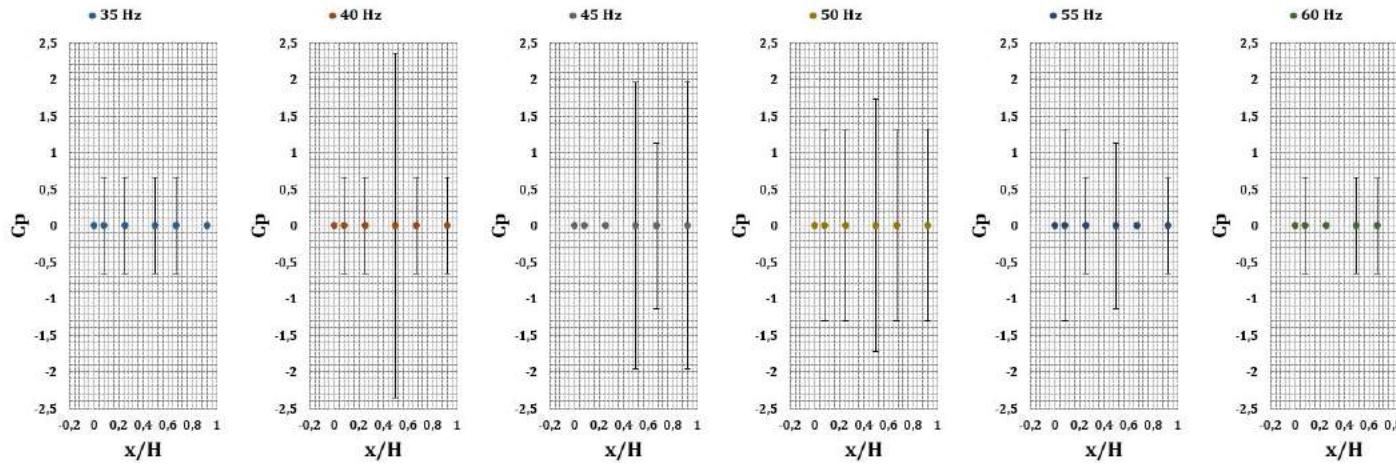


(b) Frecuencias de Operación 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura M-16.: Caso de Flujo Externo - Distribución de Presión Cilindro Rectangular de 15x5.

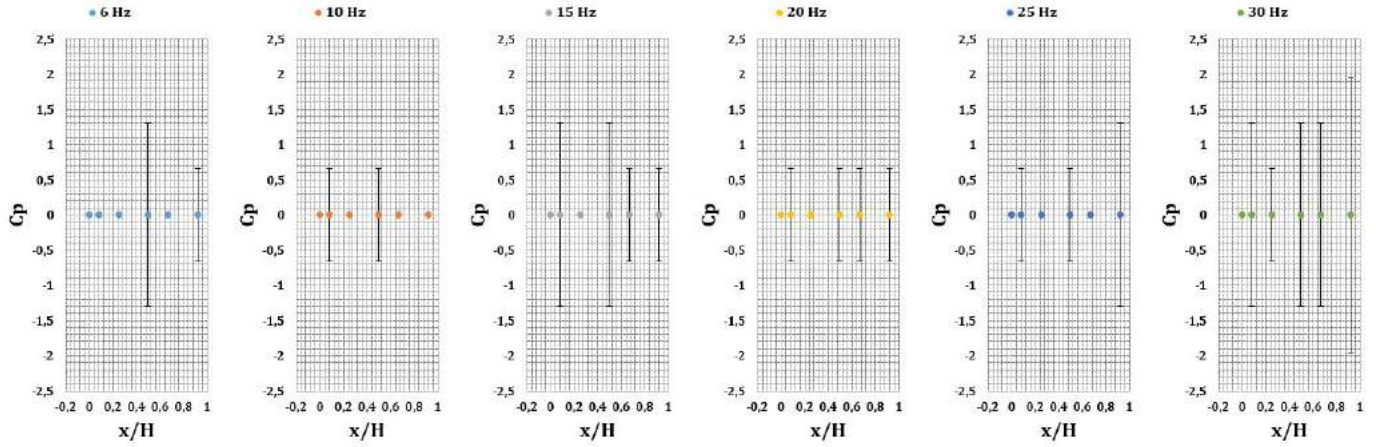


(a) Frecuencias de Operación 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.

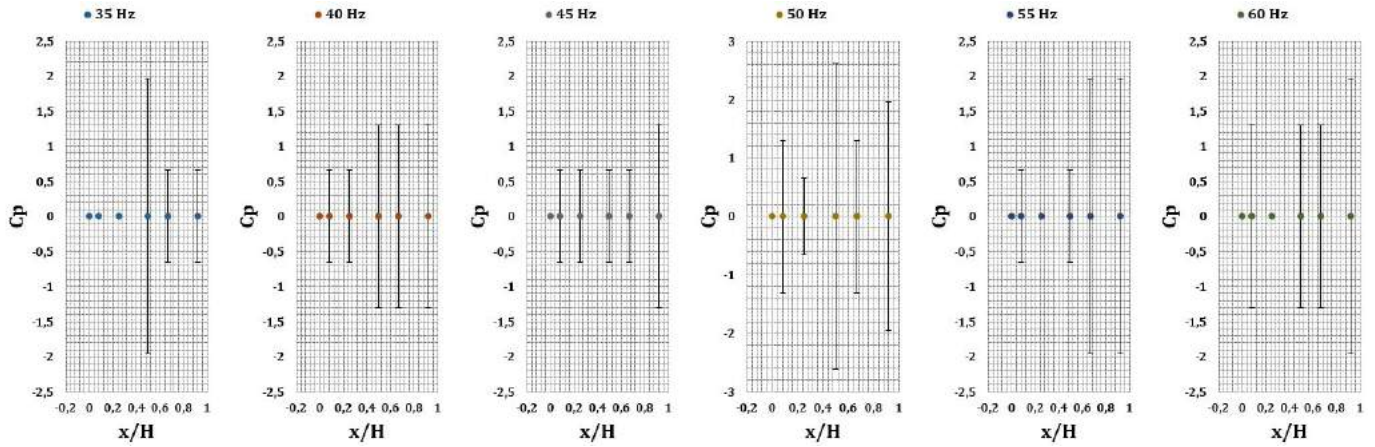


(b) Frecuencias de Operación 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura M-17.: Caso de Flujo Externo - Distribución de Presión Cilindro Rectangular de 15x10.



(a) Frecuencias de Operación 6 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz.



(b) Frecuencias de Operación 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz.

Figura M-18.: Caso de Flujo Externo - Distribución de Presión Cilindro Rectangular de 15x15.

N. Anexo N: FOTOGRAFÍAS

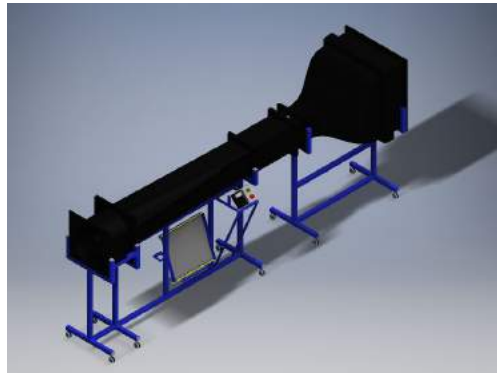


Figura N-1.: Fotografías - Modelado Ensamble General



Figura N-2.: Fotografías - Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01

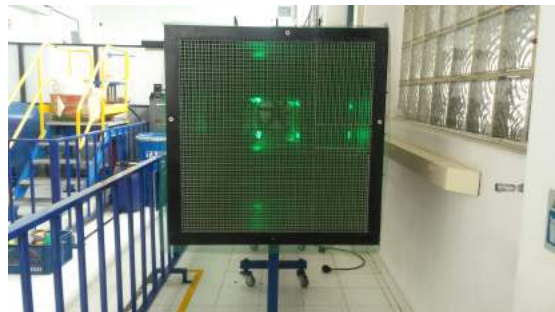


Figura N-3.: Fotografías - Túnel de Viento TV-CA-SP-UNB-01 Vista Frente

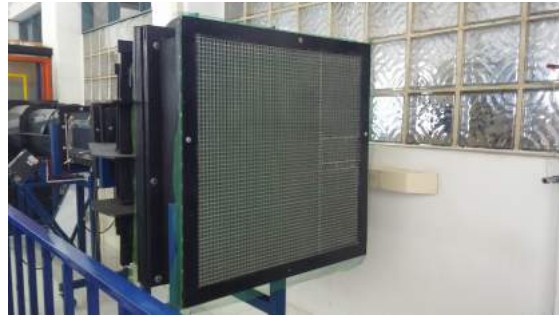


Figura N-4.: Fotografías - *Honeycomb*



Figura N-5.: Fotografías - *Settling Chamber 1*



Figura N-6.: Fotografías - Zona de Contracción



Figura N-7.: Fotografías - *Settling Chamber 2*

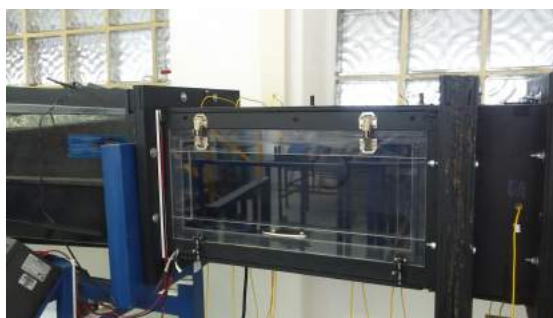


Figura N-8.: Fotografías - Zona de Pruebas

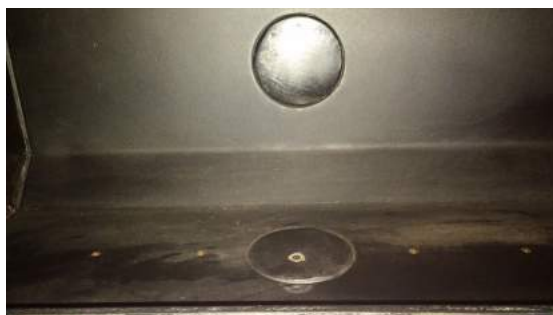


Figura N-9.: Fotografías - Tomas Estáticas Zona de Pruebas



Figura N-10.: Fotografías - Difusor

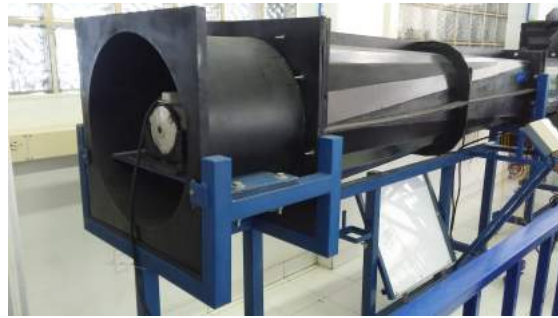
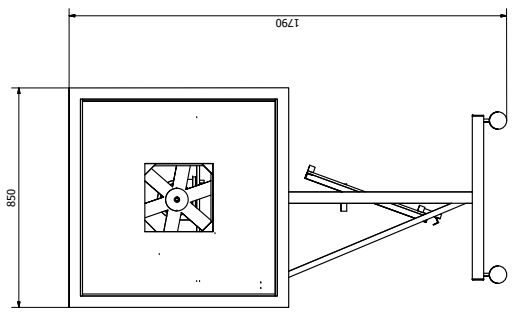
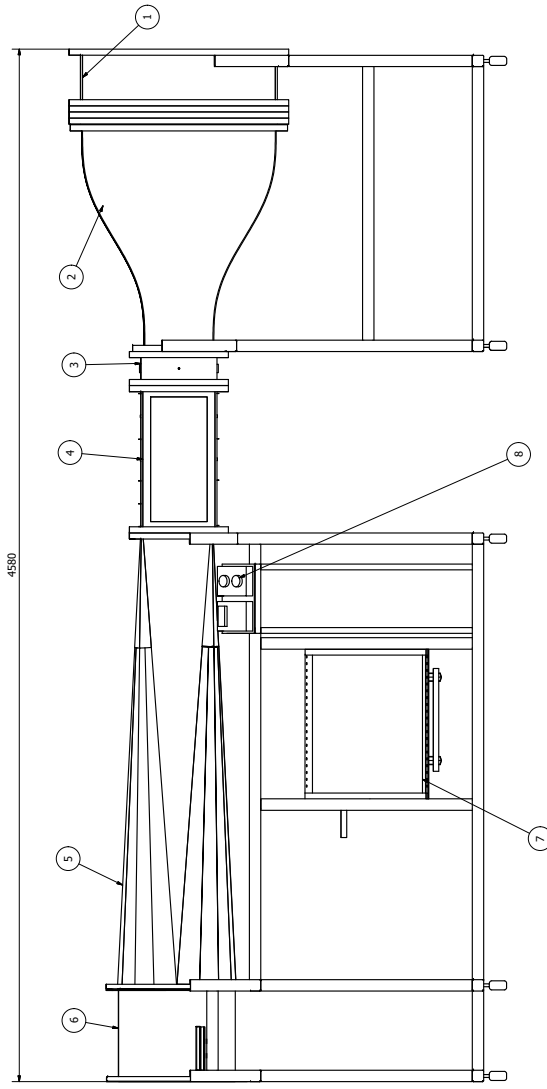


Figura N-11.: Fotografías - Zona de Potencia

Ñ. Anexo O: PLANOS



LISTA DE SECCIONES

ITEM	TITULO
1	PRIMERA SECCION DE ESTABILIZACION
2	SECCION DE CONTRACCION
3	SEGUNDA SECCION DE ESTABILIZACION
4	CONDUCTO
5	DIFFUSOR
6	SECCION DE POTENCIA
7	MULTIMANOMETRO DE DIFERENCIAL DE PRESION
8	CONTROL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

ENSBAMBLE GENERAL JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO

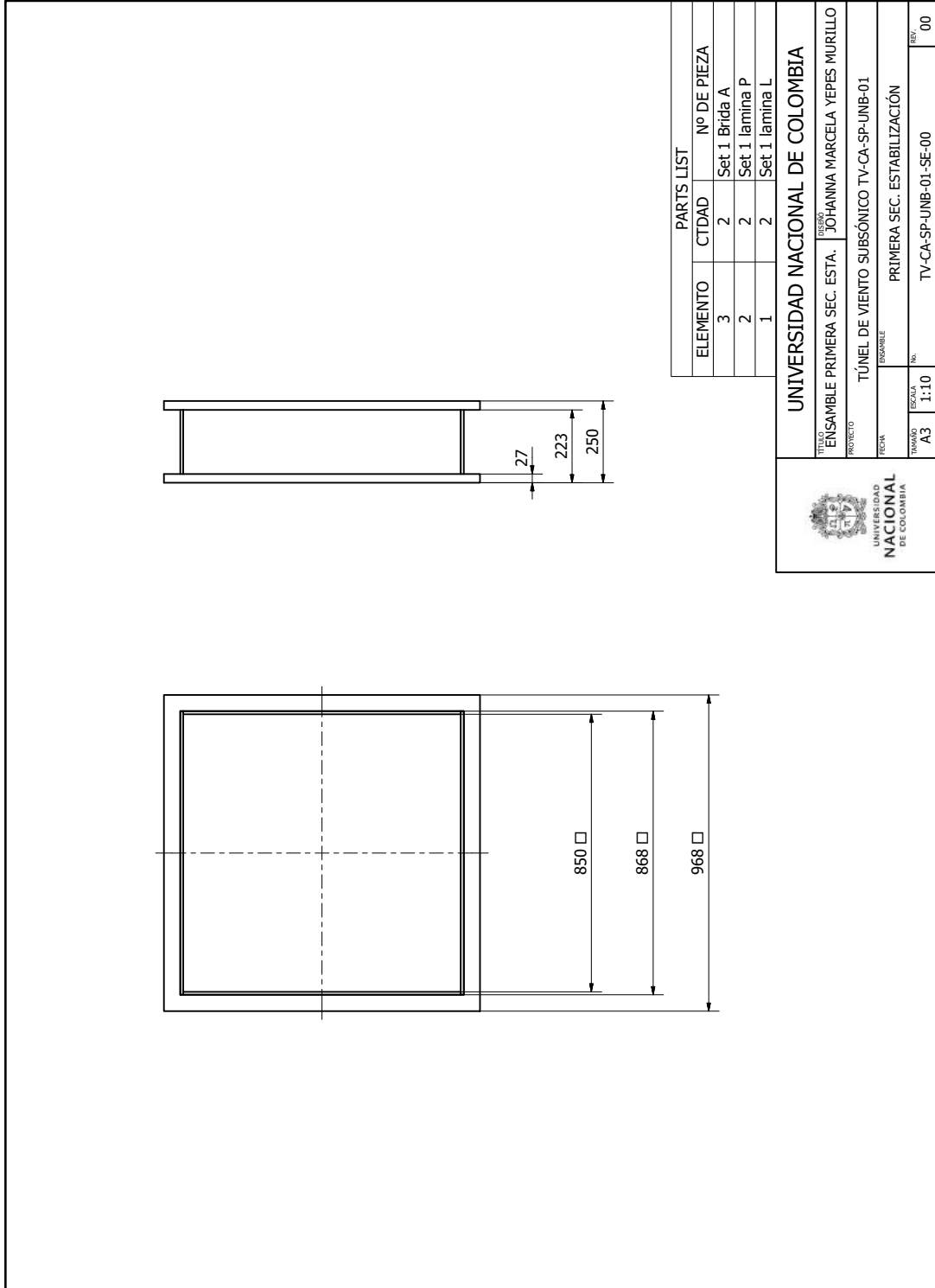
TUNEL DE VIENTO SUBSONICO TV-CA-SP-UNB-01

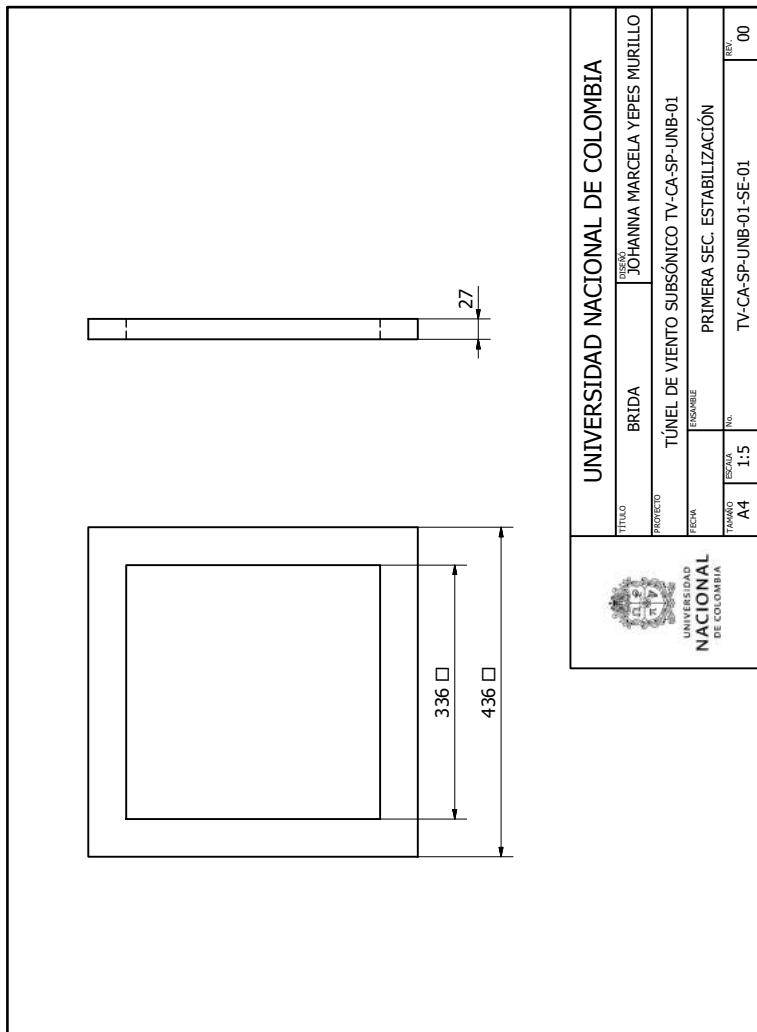
ENSBAMBLE GENERAL


AL 1:10

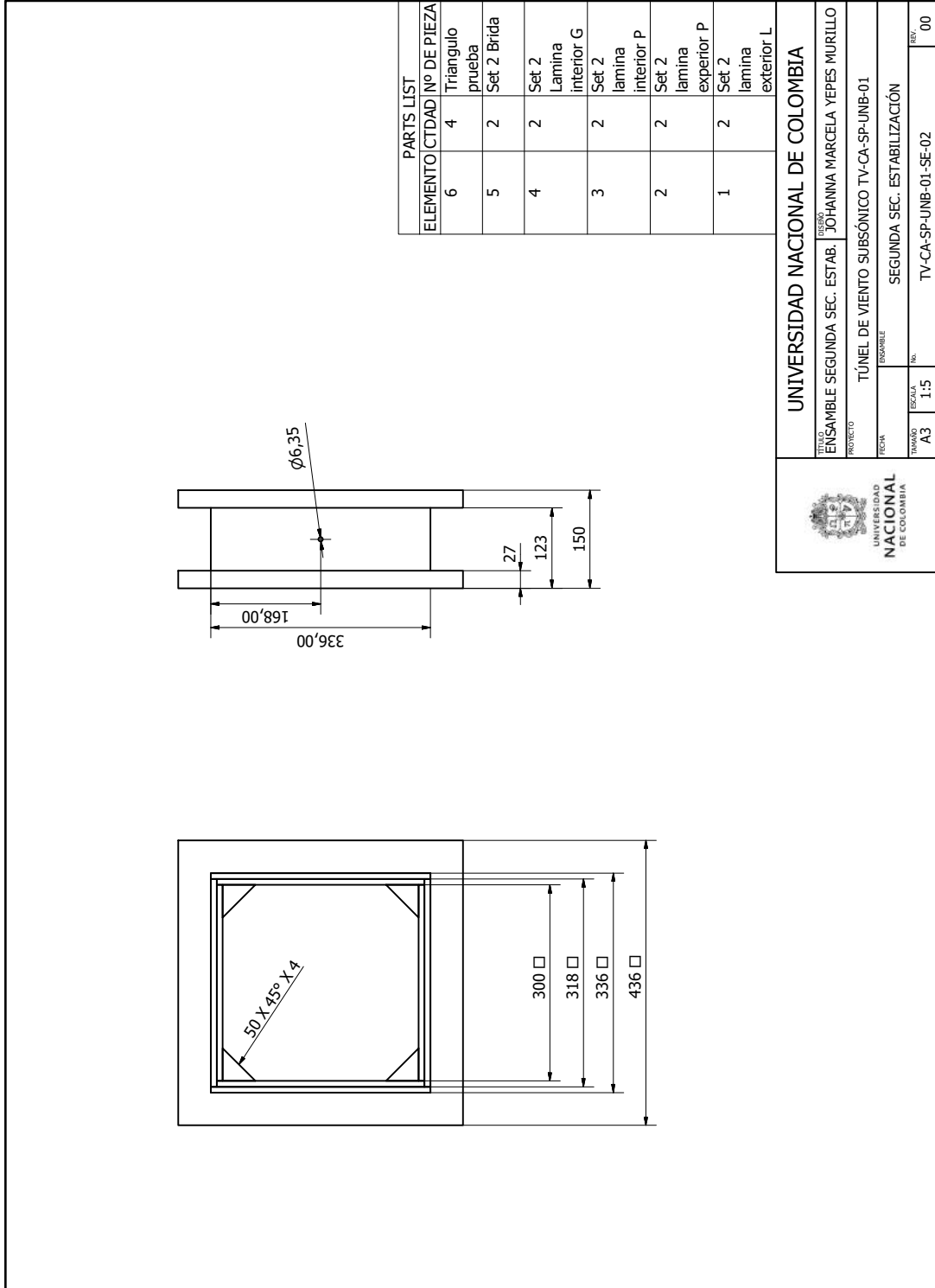
TV-CA-SP-UNB-01-EG-00

00

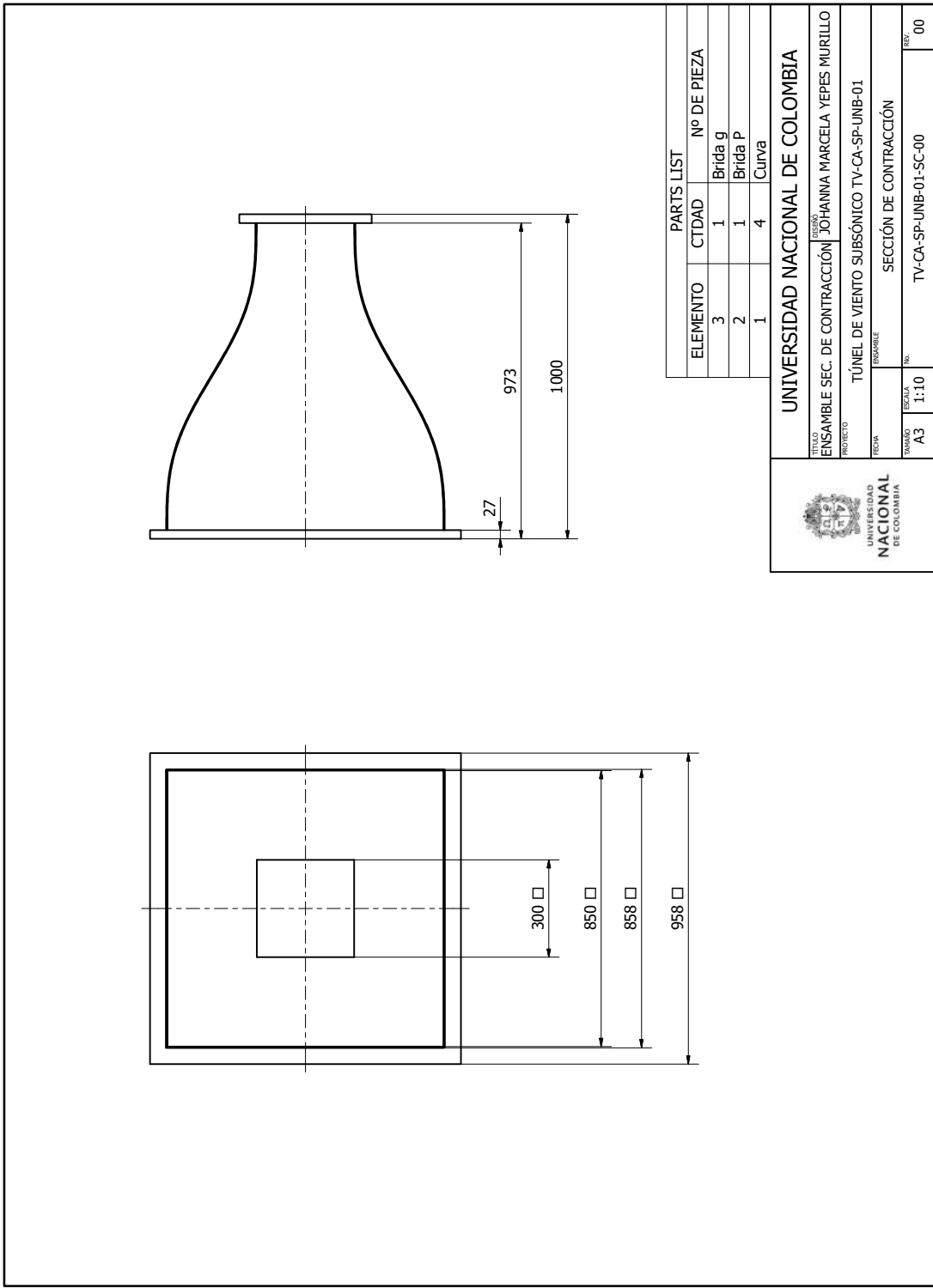




 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		TÍTULO BRIDA		DISEÑÓ JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO
		PROYECTO TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO TV-CA-SP-UNB-01		
FECHA		ENSAYÓ PRIMERA SEC. ESTABILIZACIÓN		
TAMAÑO A4	ESCALA 1:5	NÚM. TV-CA-SP-UNB-01-SE-01	REV. 00	



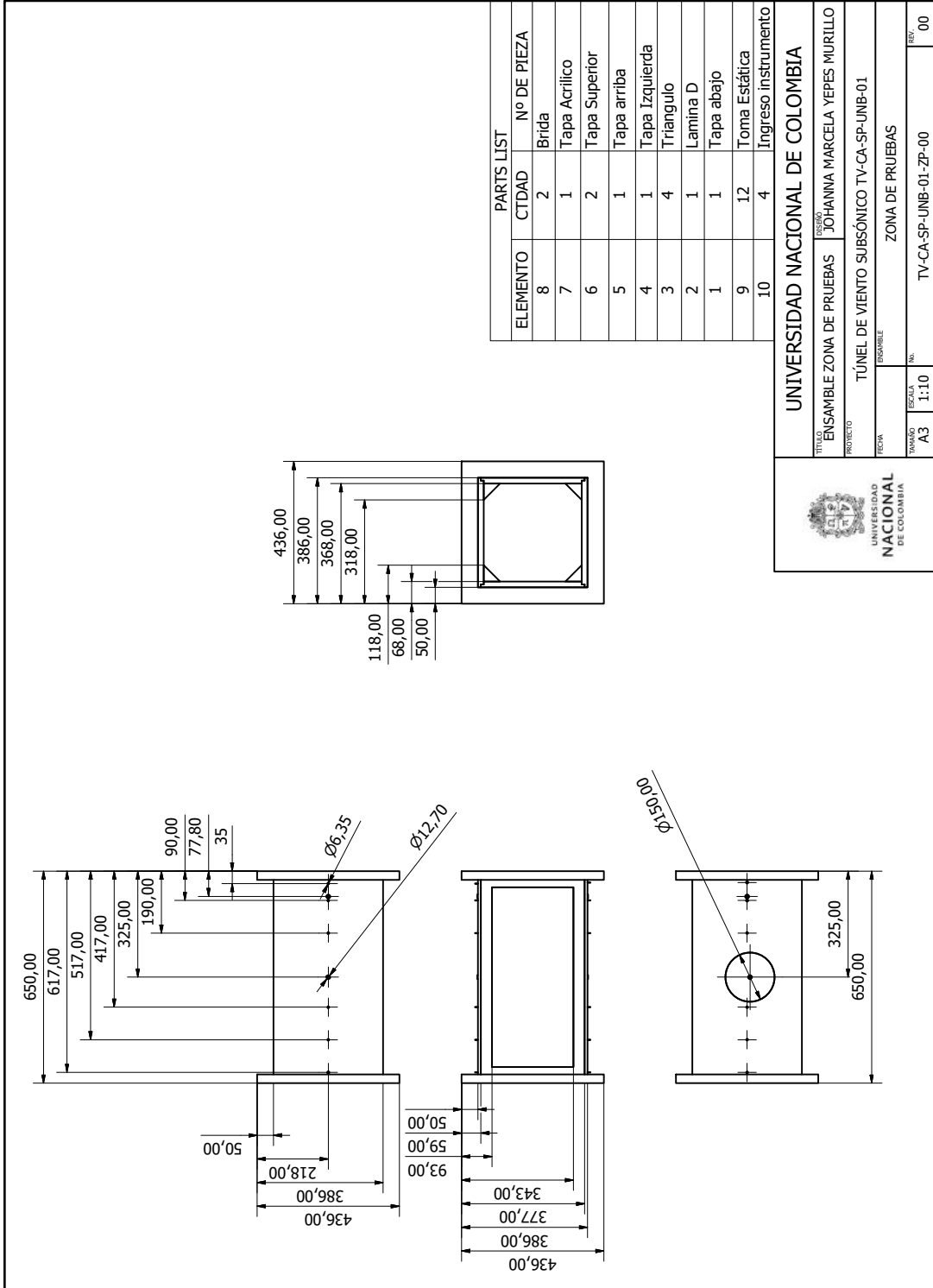
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
TÍTULO	031660 JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO
PROYECTO	TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO TV-CA-SP-UNB-01
FECHA	SEGUNDA SEC. ESTABILIZACIÓN
TAMAÑO	ESCALA
A3	1:5
	Nº
	TV-CA-SP-UNB-01-SE-02
	REV.
	00



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

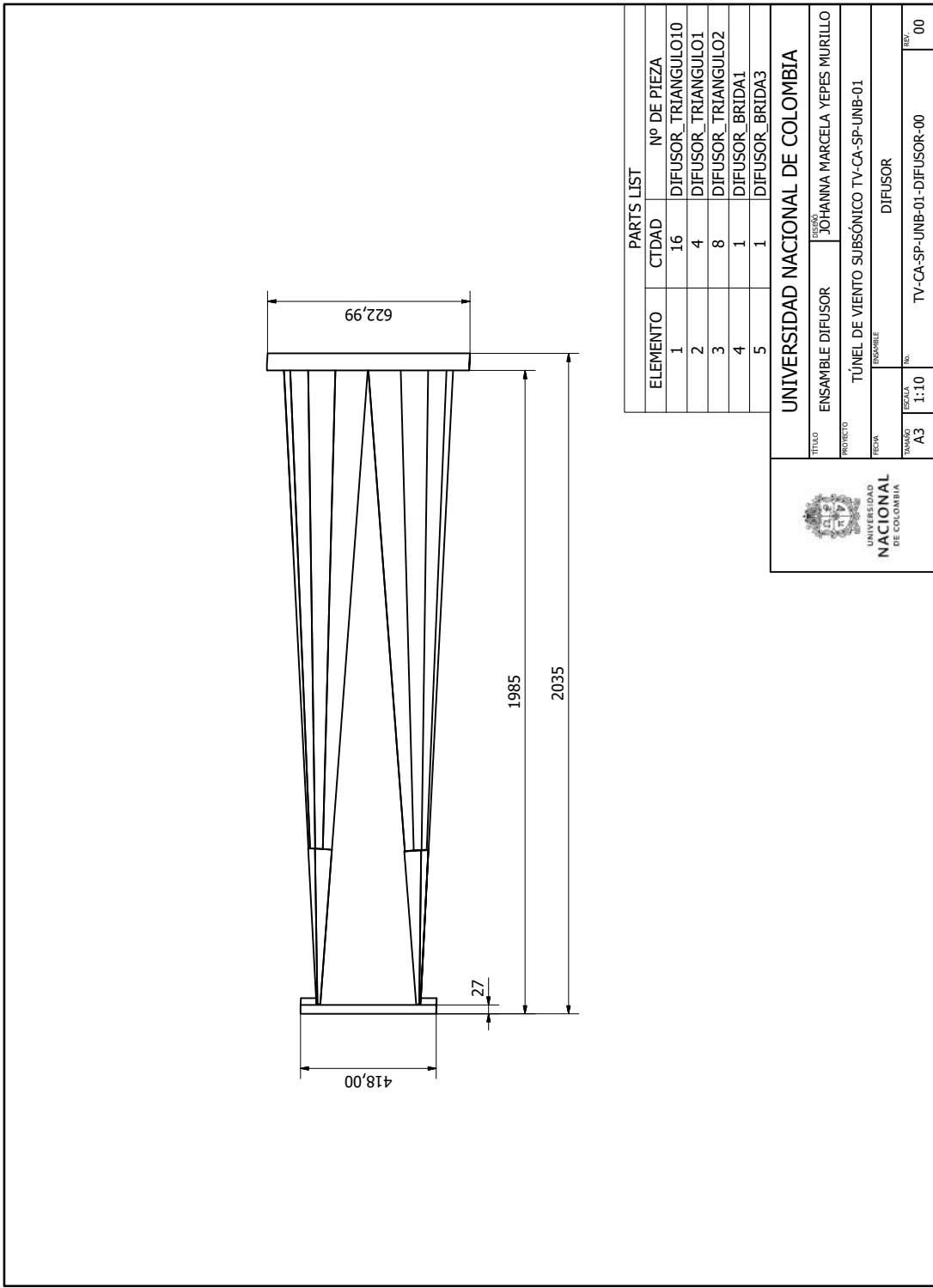
TÍTULO: ENSAMBLE SEC. DE CONTRACCIÓN
 DISEÑO: JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO
 PROYECTO: TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO TV-CA-SP-UNB-01

FECHA: ENSAMBLE
 ESCALA: SECCIÓN DE CONTRACCIÓN
 TAMAÑO: A3
 ESCALA: 1:10
 No.: TV-CA-SP-UNB-01-SC-00
 REV: 00



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

TÍTULO: ENSAMBLE ZONA DE PRUEBAS
 PROYECTO: JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO
 FECHA: TUNEL DE VIENTO SUBSÓNICO TV-CA-SP-UNB-01
 ESCALA: ZONA DE PRUEBAS
 TAMAÑO: A3
 Nº: TV-CA-SP-UNB-01-ZP-00
 REV: 00

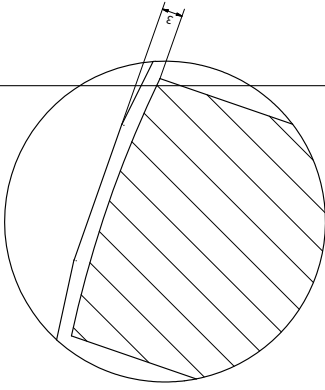


PARTS LIST		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	16	DIFUSOR_TRIANGULO10
2	4	DIFUSOR_TRIANGULO1
3	8	DIFUSOR_TRIANGULO2
4	1	DIFUSOR_BRIDA1
5	1	DIFUSOR_BRIDA3

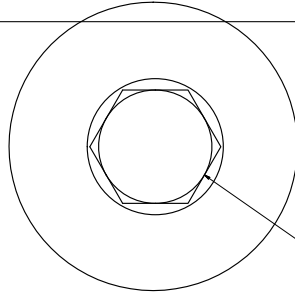


UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
TITULO	ENSAMBLE DIFUSOR
DESIGNO	JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO
PROYECTO	TUNEL DE VIENTO SUBSONICO TV-CA-SP-UNB-01
FECHA	ENSAMBLE
TAMANO	ESCALA
A3	1:10
	NO.
	TV-CA-SP-UNB-01-DIFUSOR-00
	REVIS.
	00

A (2:1)

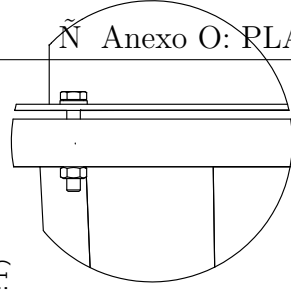


B (5:1)

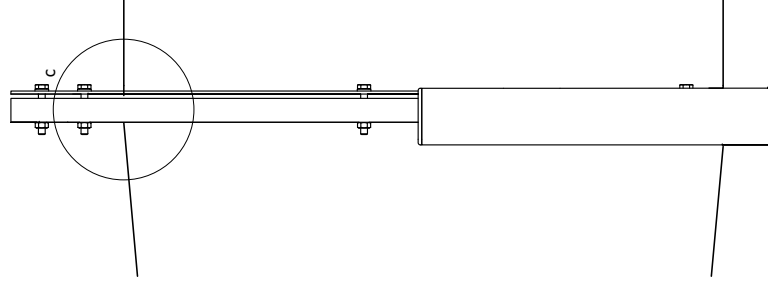
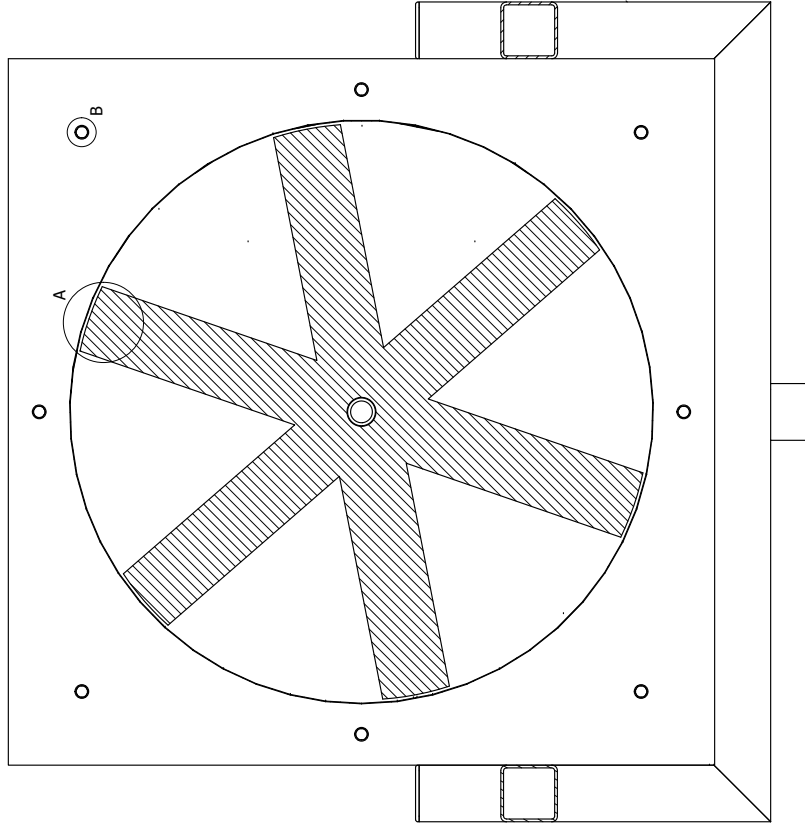


ISO 4014 - M6 x 40
 Perno de cabeza hexagonal
 12 tornillos

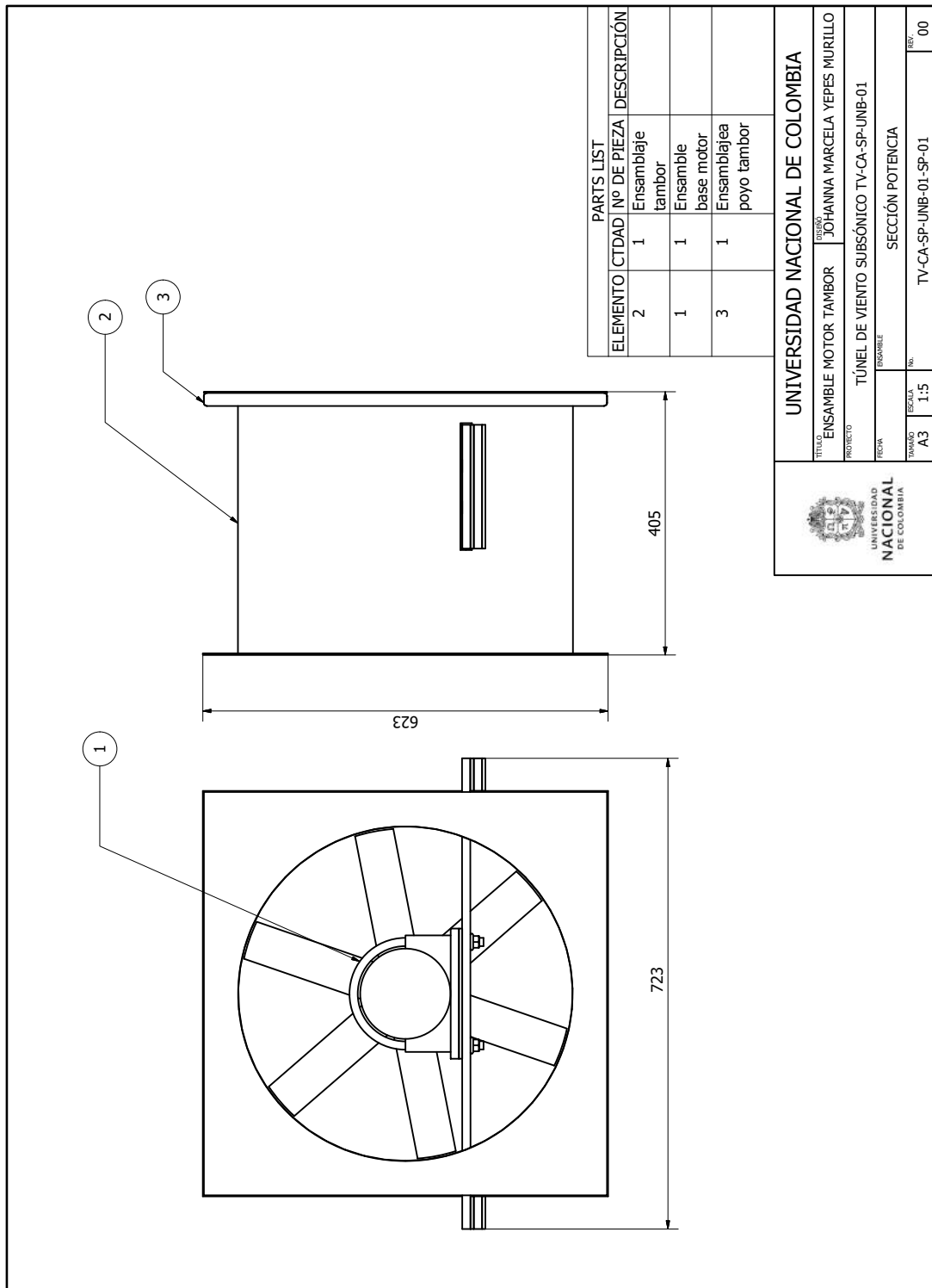
c (2:1)



AA (1:2)



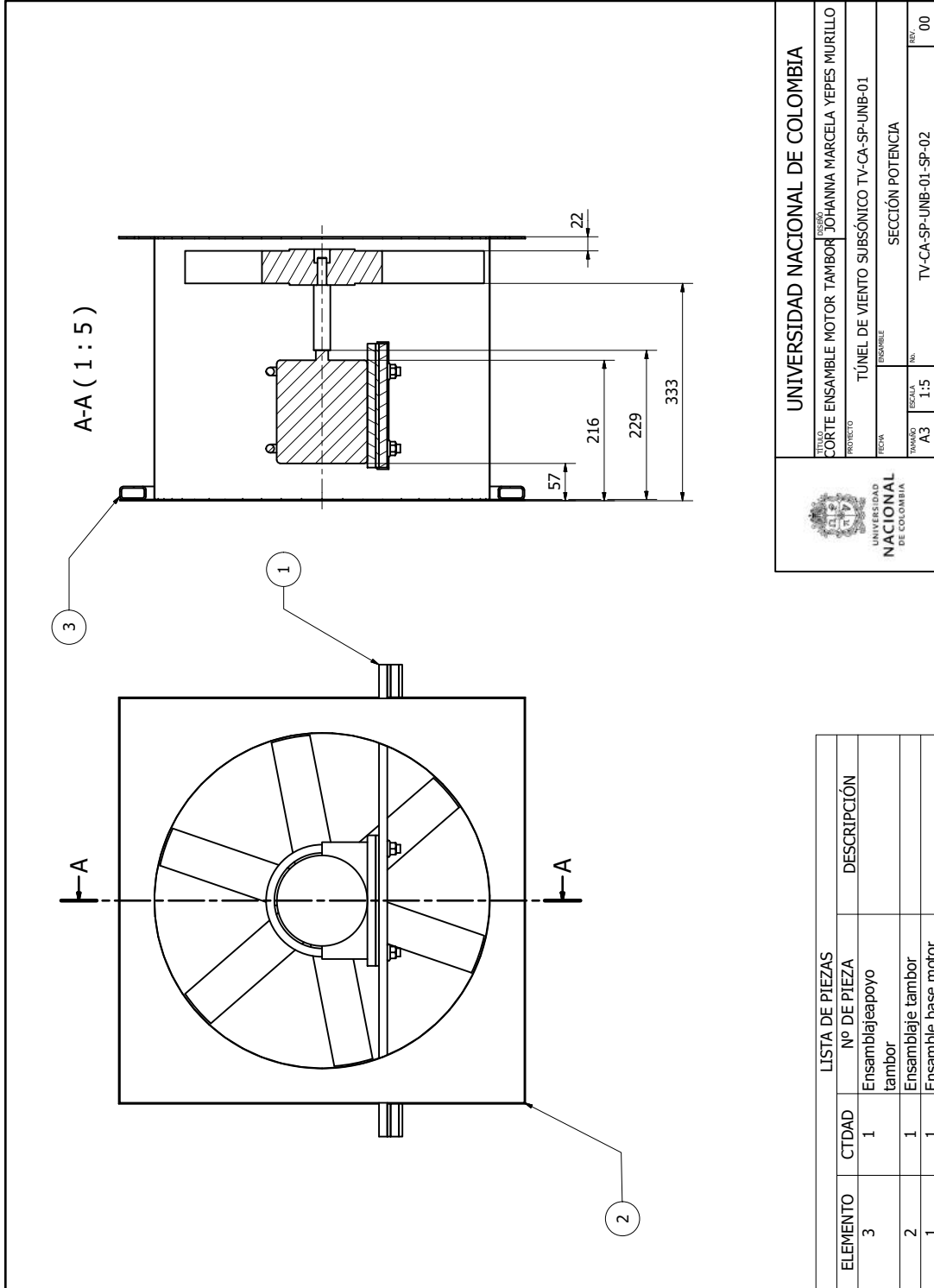
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
SUCURSION DE SECCION POTENCIA	
TUNEL DE VIENTO SUBSÓICO TV-CA-SP-UMB-01	
SECCION DE POTENCIA	
AL	1:2
01	00

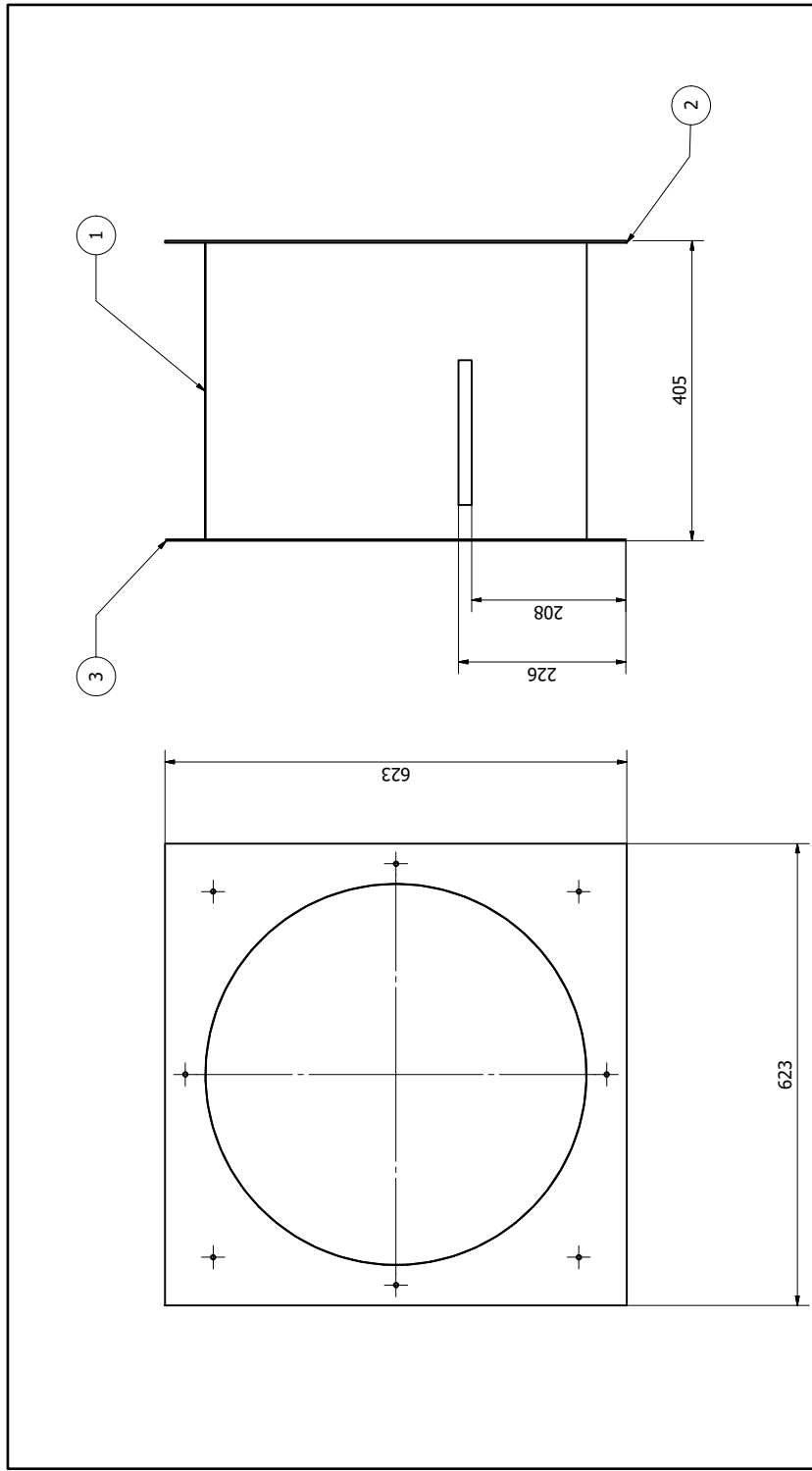


PARTS LIST			
ELEMENTO	CTIDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
2	1	Ensamblaje tambor	
1	1	Ensamble base motor	
3	1	Ensamblajea poyo tambor	


UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
TÍTULO:	ENSAMBLE MOTOR TAMBOR
DISEÑO:	JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO
PROYECTO:	TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO TV-CA-SP-UNB-01
FECHA:	ENSAMBLE
TAMAÑO:	A3
ESCALA:	1:5
SECCIÓN:	POTENCIA
Nº:	TV-CA-SP-UNB-01-SP-01
REV:	00







LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTIDAD	DESCRIPCIÓN
3	1	union a estructura
2	1	union a difusor
1	1	Tambor



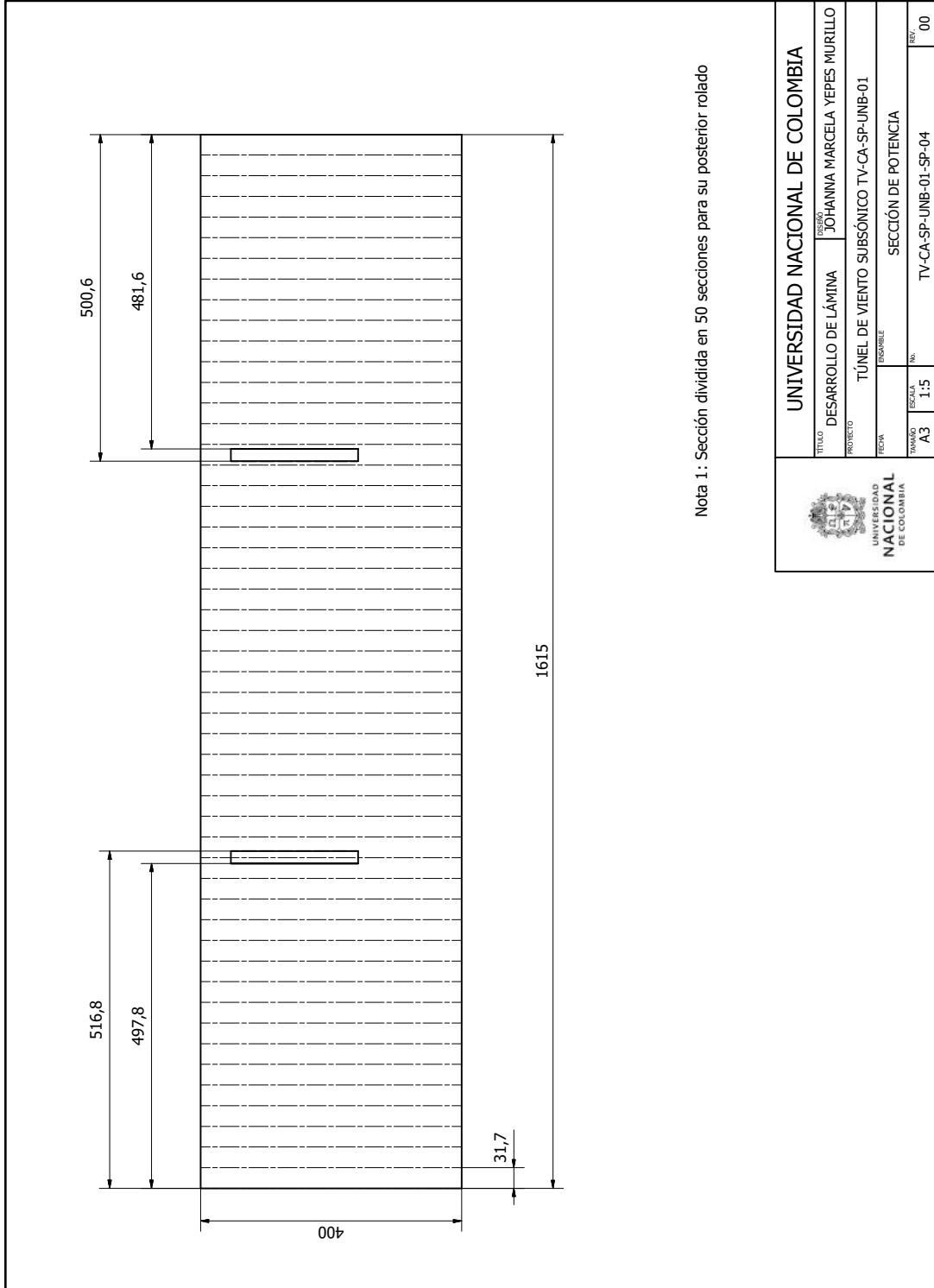
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA


TITULO: TAMBOR
 DISEÑO: JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO

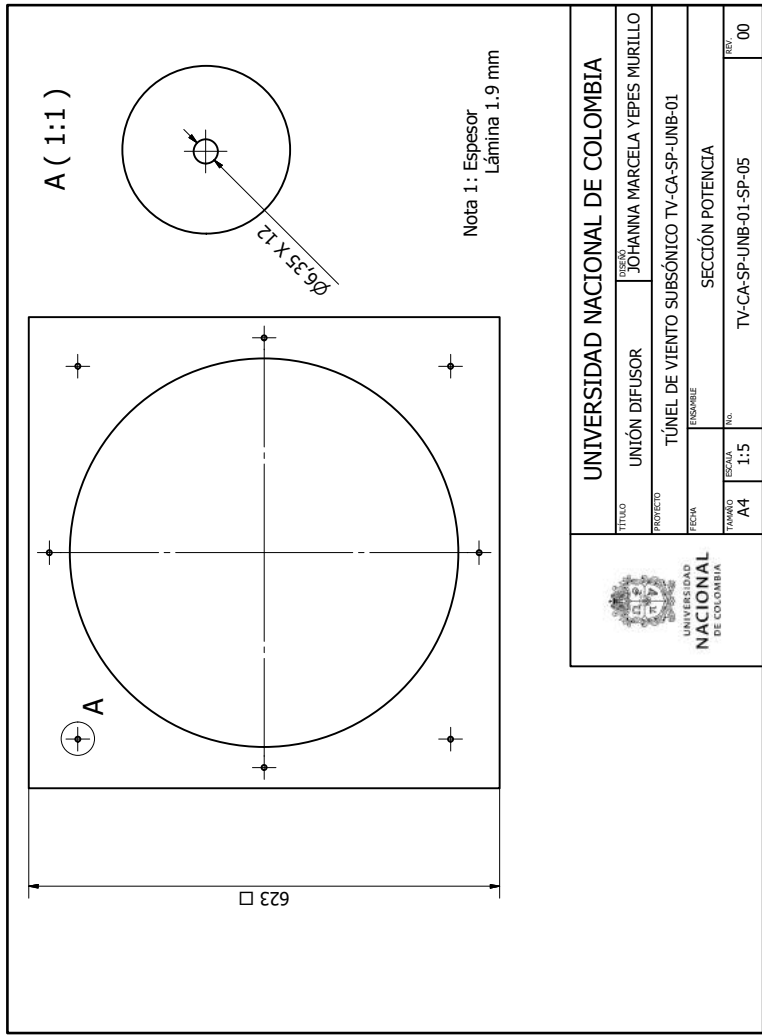
PROYECTO: TUNEL DE VIENTO SUBSÓNICO TV-CA-SP-UNB-01


FECHA: ENSAYABLE
 ESCALA: 1:5
 TAMAÑO: A3
 REVISIÓN: 00

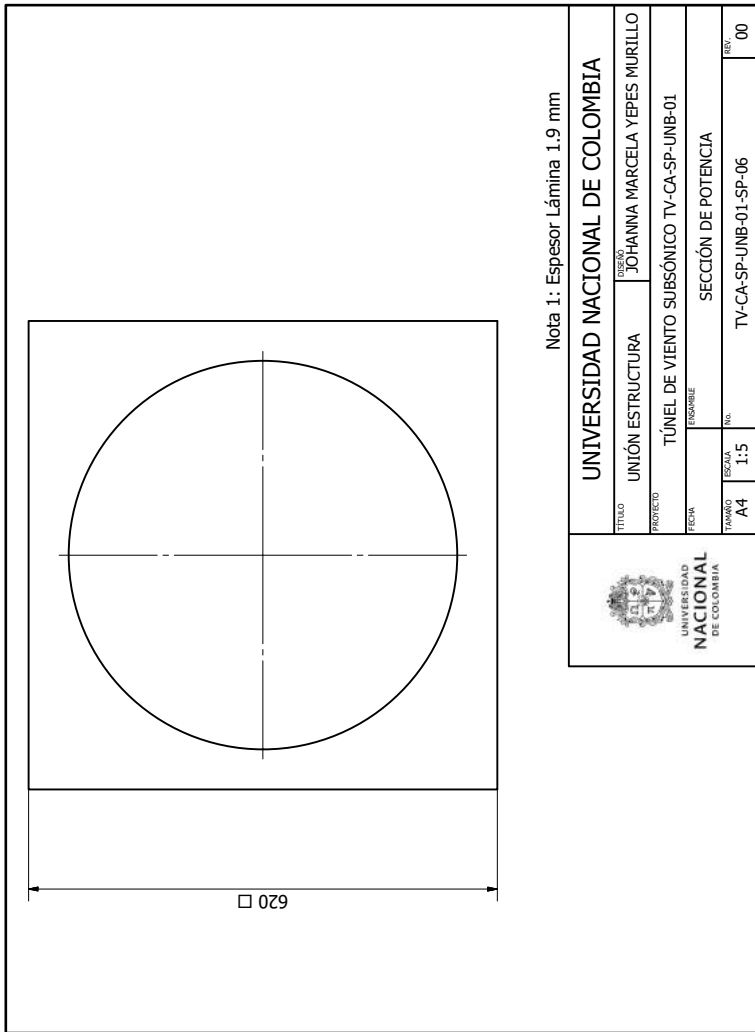


Nota 1: Sección dividida en 50 secciones para su posterior rolado


 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
		TÍTULO	DESARROLLO DE LÁMINA
PROYECTO		DESARROLLO	JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO
FECHA		TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO TV-CA-SP-UNB-01	
TAMAÑO		SECCIÓN DE POTENCIA	
A3	ESCALA	TV-CA-SP-UNB-01-SP-04	
		SERIE	
		00	

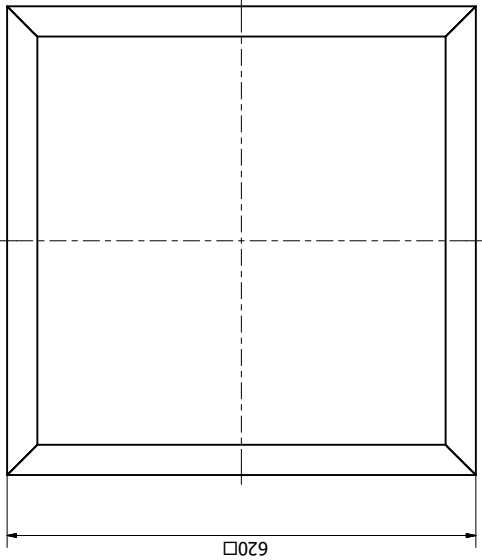



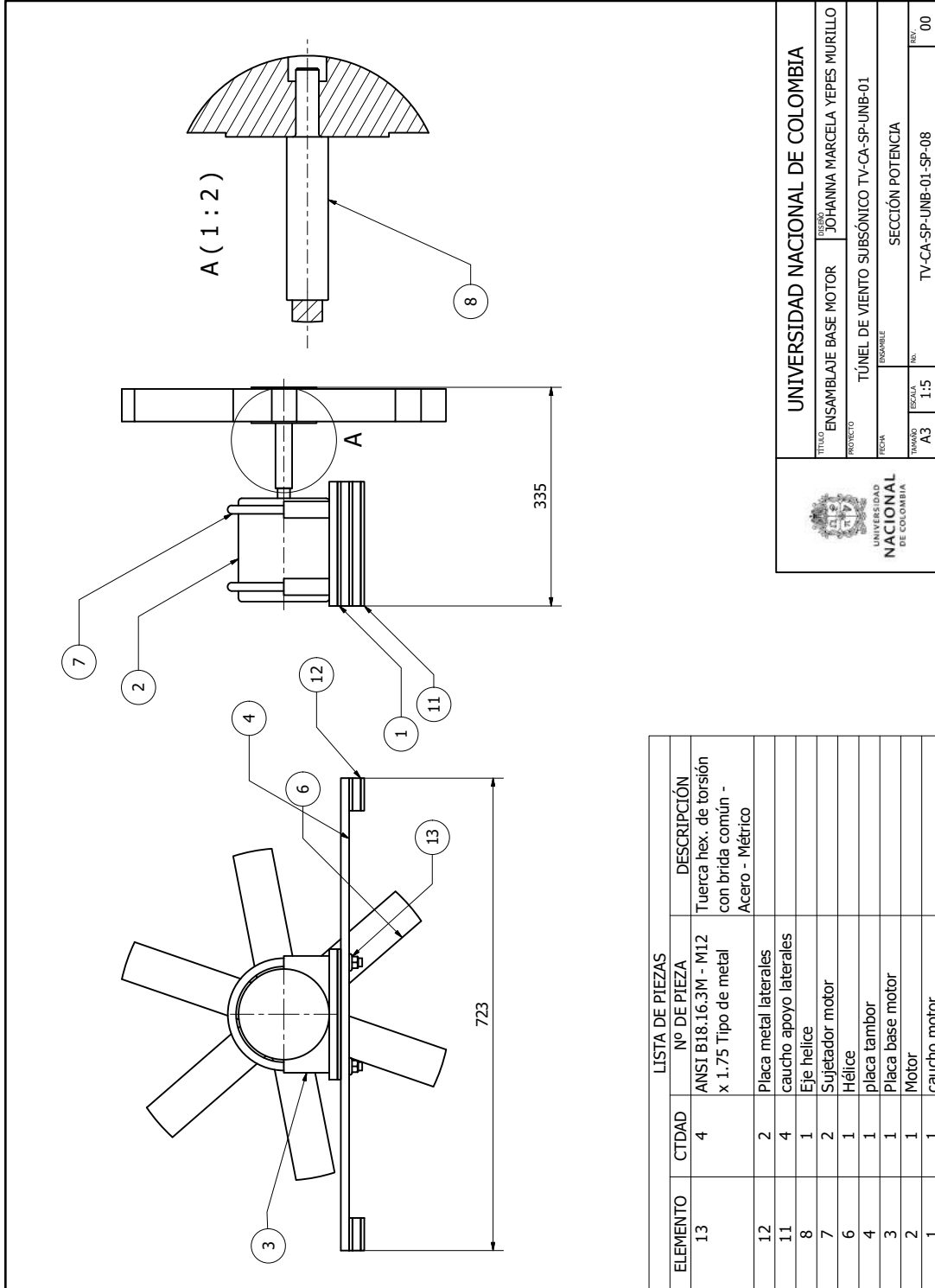
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		TÍTULO UNIÓN DIFUSOR		DISEÑÓ JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO	
		PROYECTO TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO TV-CA-SP-UNB-01			
FECHA		ENSAYÓ SECCIÓN POTENCIA			
TAMAÑO A4	ESCALA 1:5	NÚM. TV-CA-SP-UNB-01-SF-05		REV. 00	



Nota 1: Espesor Lámina 1.9 mm

		UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
TÍTULO	UNIÓN ESTRUCTURA	PROYECTADO POR	JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO
PROYECTO	TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO TV-CA-SP-UNB-01		
FECHA	ENSAYABLE		
TAMAÑO	ESCALA	NÚM.	REV.
A4	1:5	TV-CA-SP-UNB-01-SP-06	00

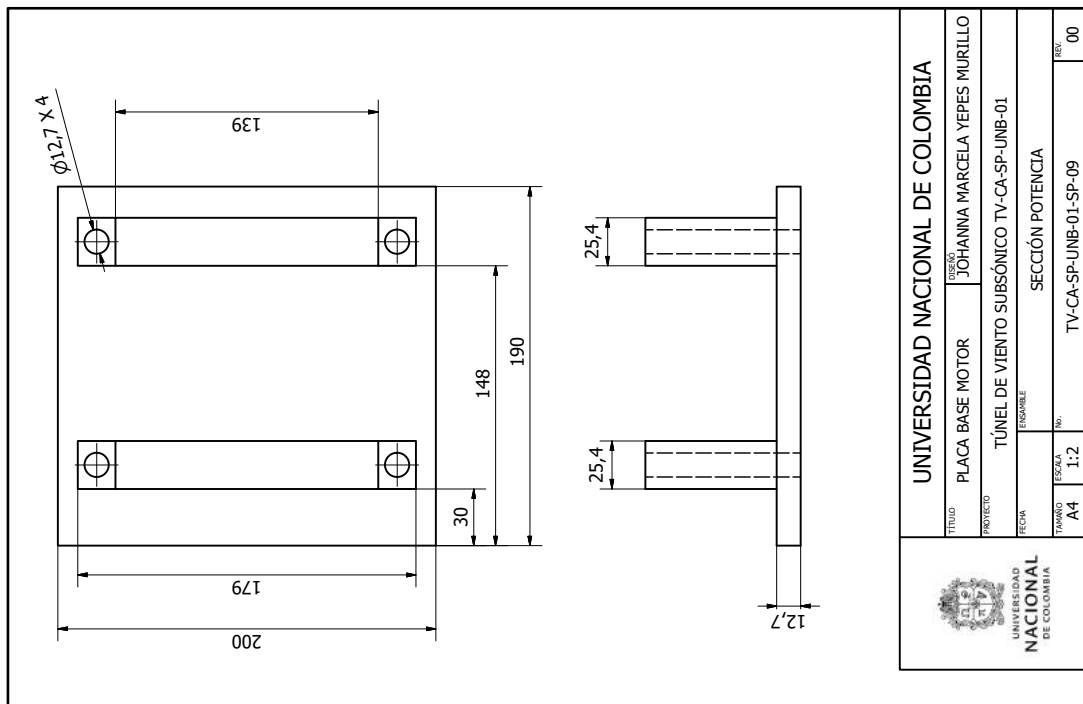
 <p>620</p>	<p>Nota: Perfiles ISO 4019 - 40x20x2.5 - 620</p>	
	 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA</p>	
<p>TÍTULO: PERFILES ISO 4019 DISEÑÓ: JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO</p>		
<p>PROYECTO: TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO TV-CA-SP-UNB-01</p>		
<p>FECHA: ENSAYO: SECCIÓN POTENCIA</p>		
TAMAÑO: A4	ESCALA: 1:5	REV: 00
<p>NÚM.: TV-CA-SP-UNB-01-SF-07</p>		




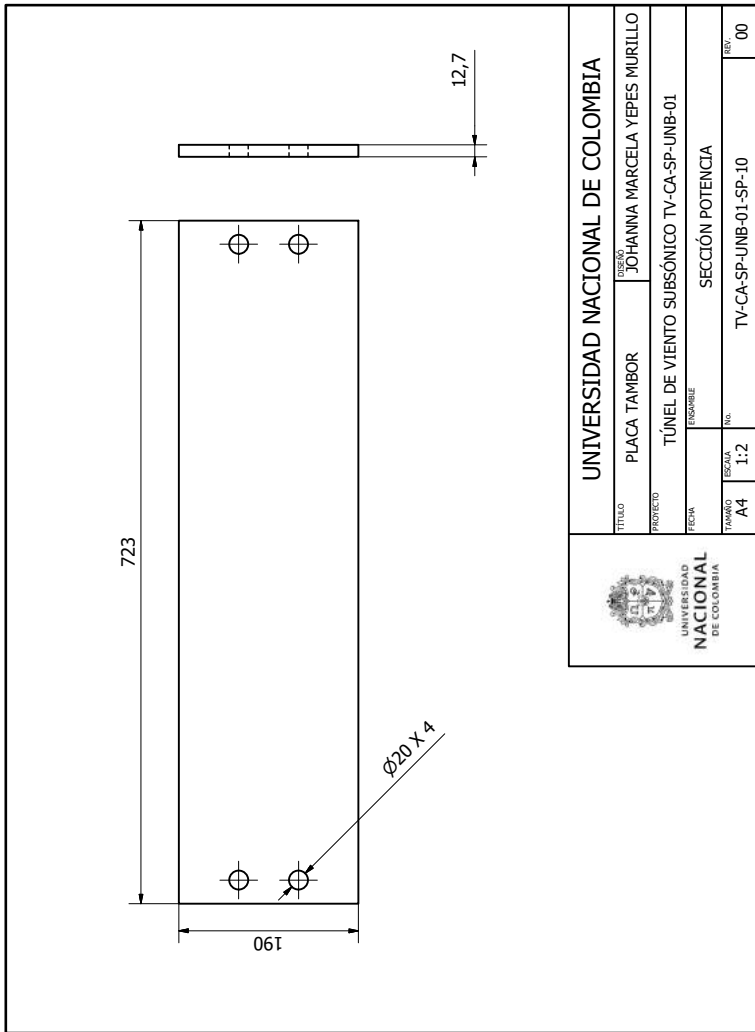
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

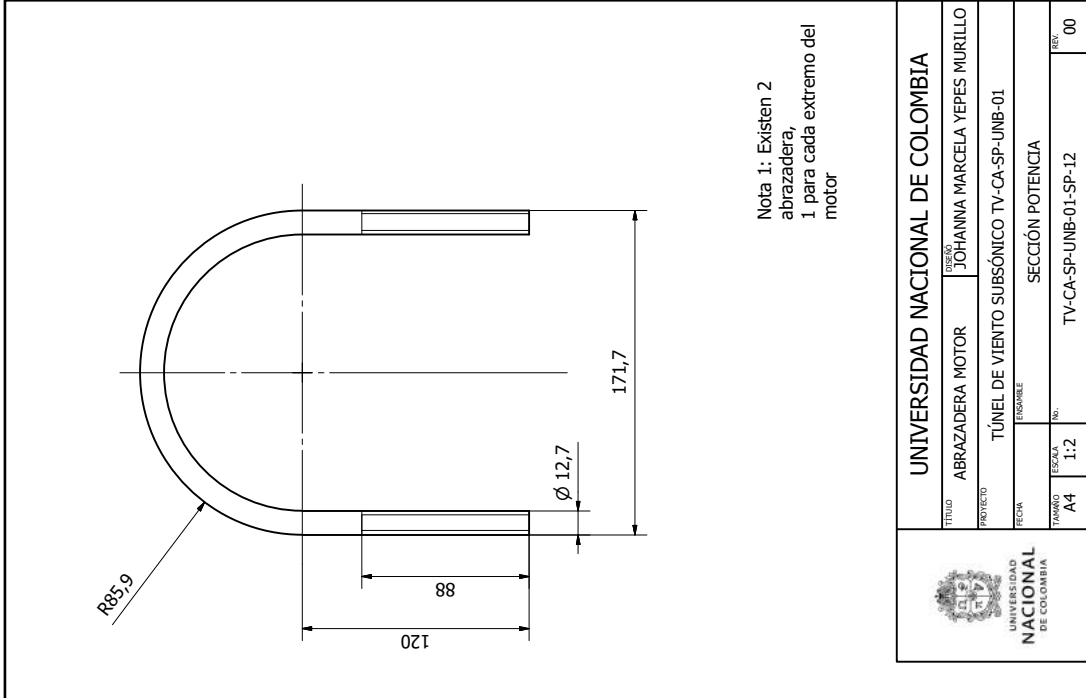
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
TÍTULO ENSAMBLAJE BASE MOTOR	<small>DESIGNADO</small> JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO
PROYECTO TUNEL DE VIENTO SUBSÓNICO TV-CA-SP-UNB-01	
FECHA	<small>ENSAMBLADO</small> SECCIÓN POTENCIA
TAMAJO A3	<small>ESCALA</small> 1:5
	<small>REV.</small> TV-CA-SP-UNB-01-SP-08
	<small>00</small>




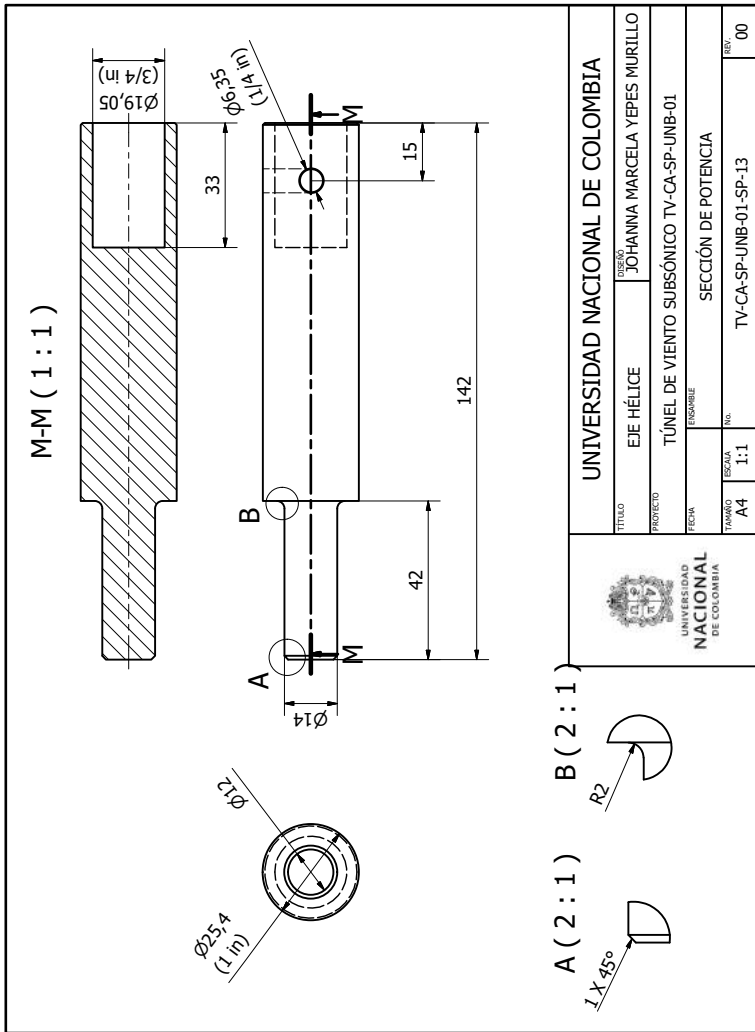
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		TÍTULO PLACA BASE MOTOR	
		DISEÑO JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO	
PROYECTO TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO TV-CA-SP-UNB-01		ESCALETA SECCIÓN POTENCIA	
TAMAÑO A4	ESCALA 1:2	No. TV-CA-SP-UNB-01-SP-09	REV. 00

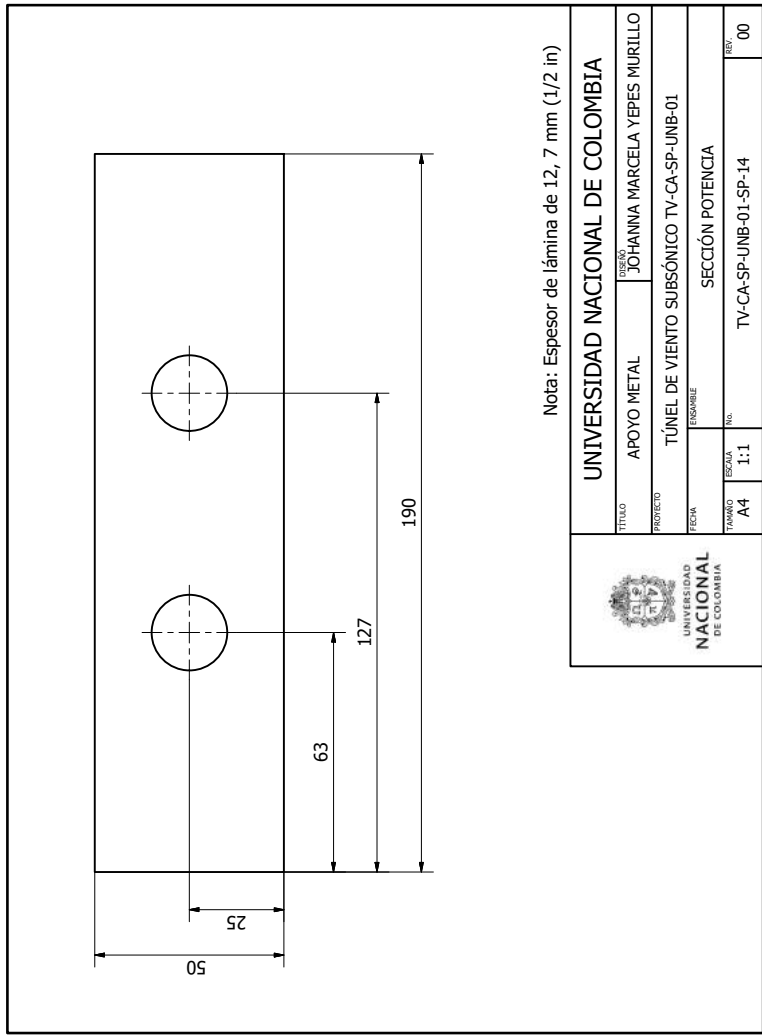





Nota 1: Existen 2 abrazadera, 1 para cada extremo del motor

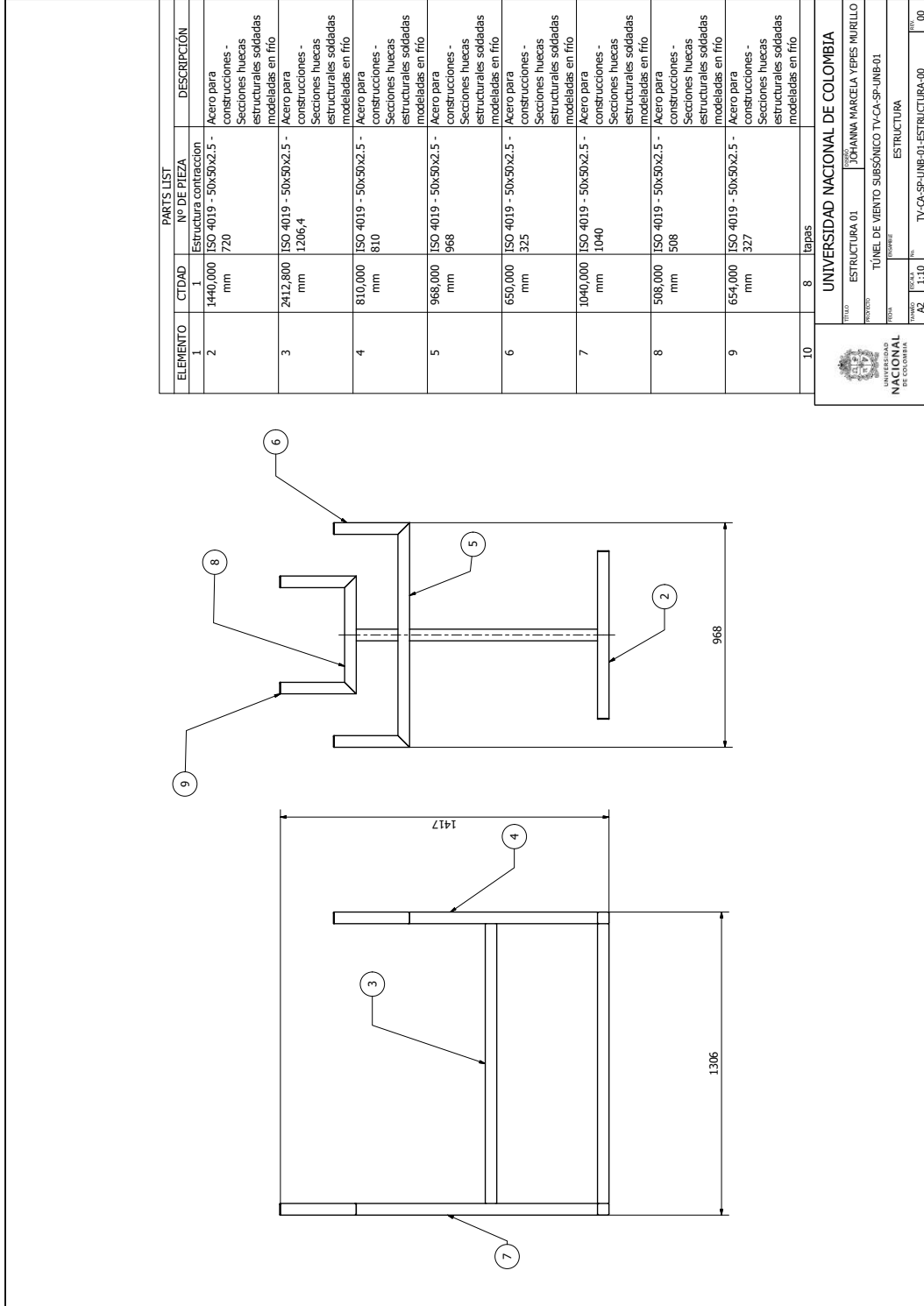
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
		TÍTULO	ABRAZADERA MOTOR
PROYECTO		DISEÑO	JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO
FECHA		TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO TV-CA-SP-UNB-01	
TAMAÑO		SECCIÓN POTENCIA	
A4	ESCALA	1:2	REV. 00
		TV-CA-SP-UNB-01-SP-12	






Nota: Espesor de lámina de 12,7 mm (1/2 in)

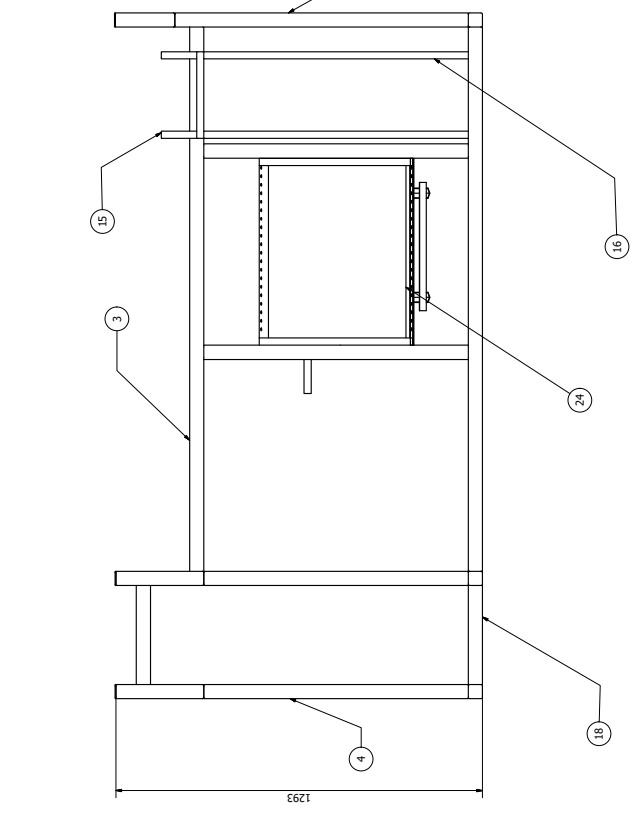
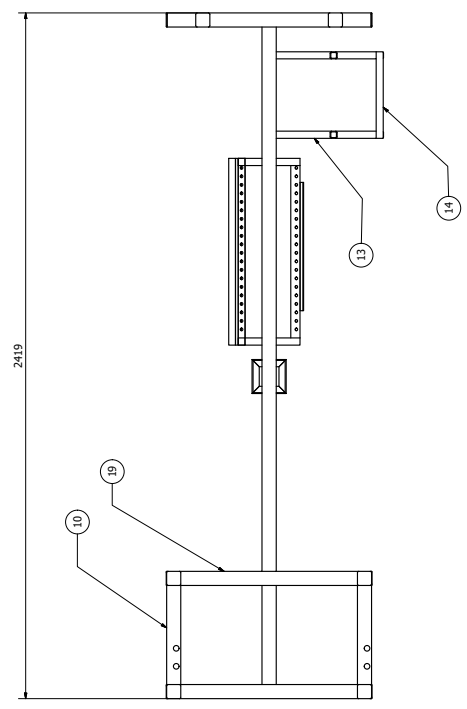
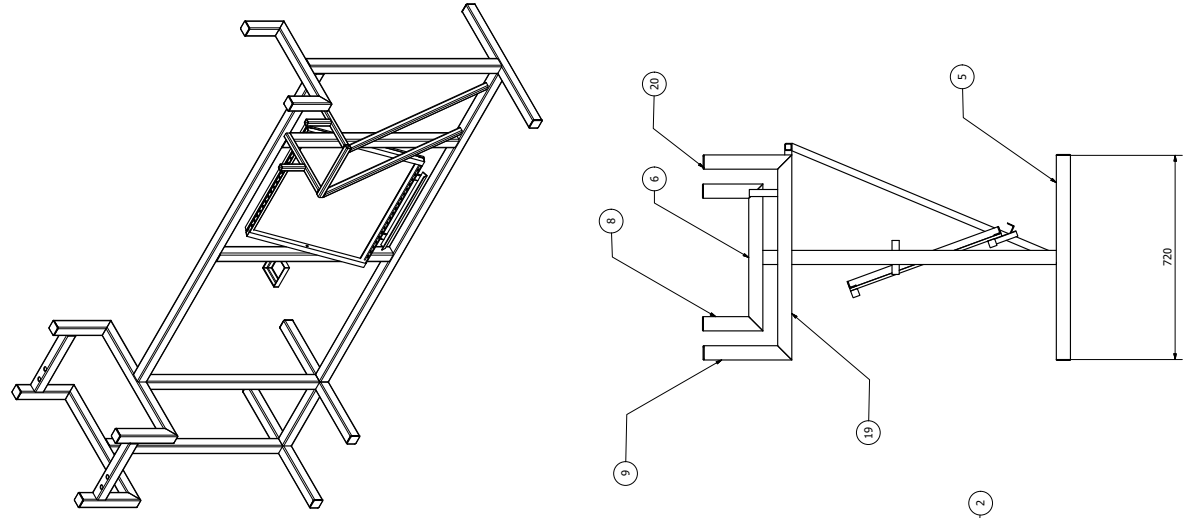
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		TÍTULO	APOYO METAL	DISEÑÓ	JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO
		PROYECTO	TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO TV-CA-SP-UNB-01		
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		FECHA	ENSAYABLE		
		TAMAÑO	ESCALA	SECCIÓN POTENCIA	
		A4	1:1	Nº	TV-CA-SP-UNB-01-SP-14



ELEMENTO	CTIDAD	PARTS LIST		DESCRIPCIÓN
		No DE PIEZA		
1	1	1440,000	mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
2	1	2412,800	mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
3	1	810,000	mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
4	1	968,000	mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
5	1	650,000	mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
6	1	1040,000	mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
7	1	508,000	mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
8	1	654,000	mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
9	1	8	mm	tapas
10	1			


UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
 TÍTULO: ESTRUCTURA 01
 AUTORA: JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO
 PROYECTO: TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO TV-CA-SP-UNB-01
 FECHA: 2023
 ESCALA: A2
 HOJA: 1:10
 TÍTULO: ESTRUCTURA
 PROYECTO: TV-CA-SP-UNB-01-ESTRUCTURA-00
 HOJA: 00

ELEMENTO	CANTIDAD	PARTE LISTA	DESCRIPCIÓN
20	12	tapete	
19	1446.000	ISO 4019 - 50x50x2.5 - mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
18	399.450	ISO 4019 - 50x50x2.5 - mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
16	2043.600	ISO 4019 - 25x25x2.5 - mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
15	290.000	ISO 4019 - 25x25x2.5 - mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
14	305.000	ISO 4019 - 25x25x2.5 - mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
13	705.000	ISO 4019 - 25x25x2.5 - mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
10	698.900	ISO 4019 - 50x50x2.5 - mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
9	1240.000	ISO 4019 - 50x50x2.5 - mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
8	420.000	ISO 4019 - 50x50x2.5 - mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
6	518.000	ISO 4019 - 50x50x2.5 - mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
5	2160.000	ISO 4019 - 50x50x2.5 - mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
4	1866.260	ISO 4019 - 50x50x2.5 - mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
3	3840.000	ISO 4019 - 50x50x2.5 - mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
2	1035.000	ISO 4019 - 50x50x2.5 - mm	Acero para construcciones - Secciones huecas estructurales soldadas modeladas en frío
1	1	Estructura difusor	
21	1866.260	4019 - 25 x 25 x 1/8 - mm	Tube
22	480.000	ATSC - L 1 x 1 x 1/8 - mm	Angle Steel
23	1	Estructura Manometro	
24	1	Multimanómetro de diferencial de presión	



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

ESTRUCTURA 02 | JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO

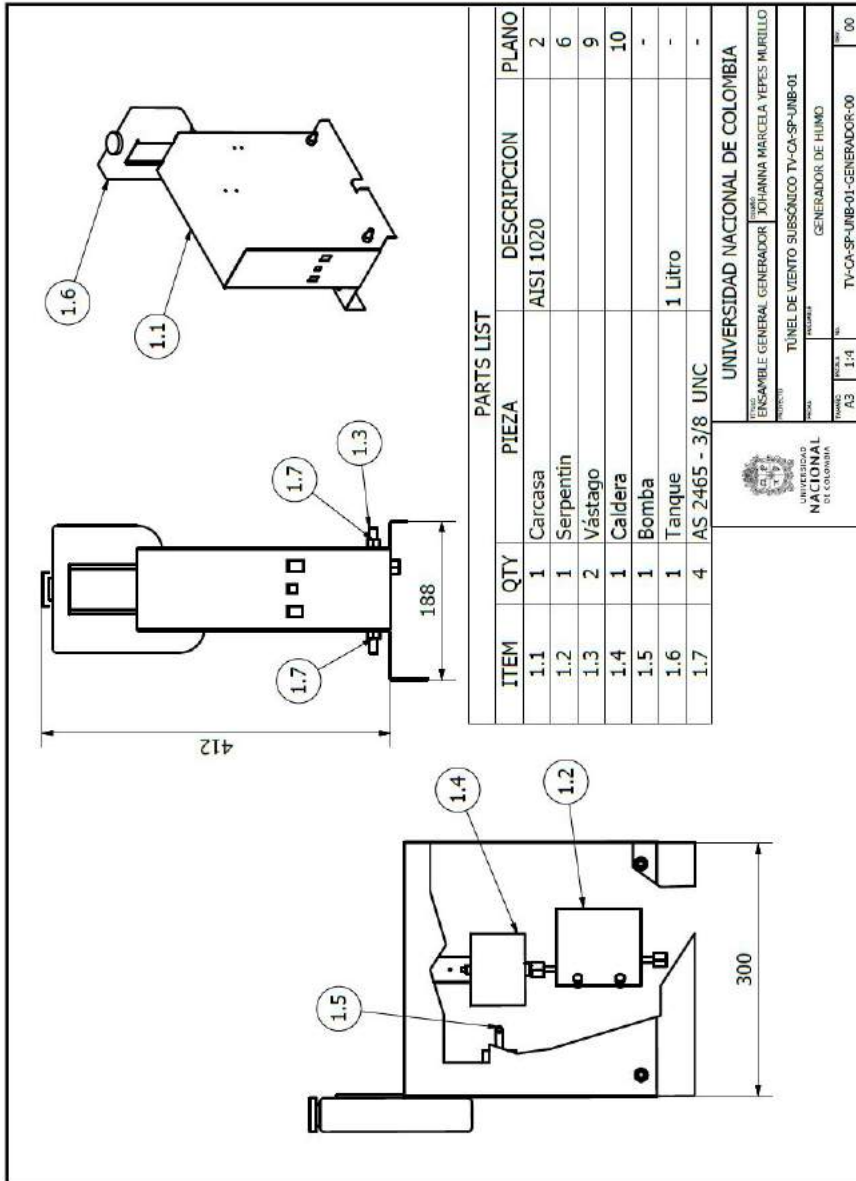
TÚNEL DE VIENTO SUBSÓICO TV-CA-SP-UNB-01

ESTRUCTURA

1:8

TV-CA-SP-UNB-01-ESTRUCTURA-01

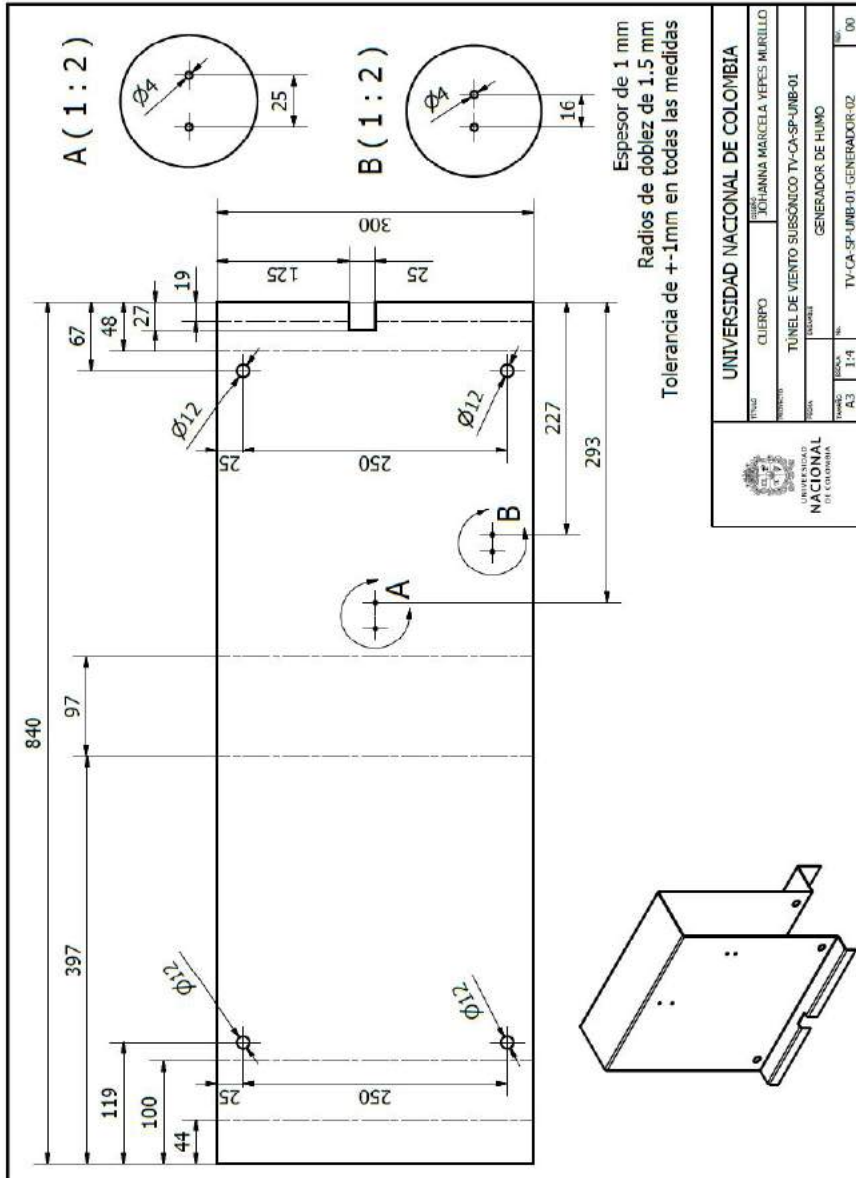
00



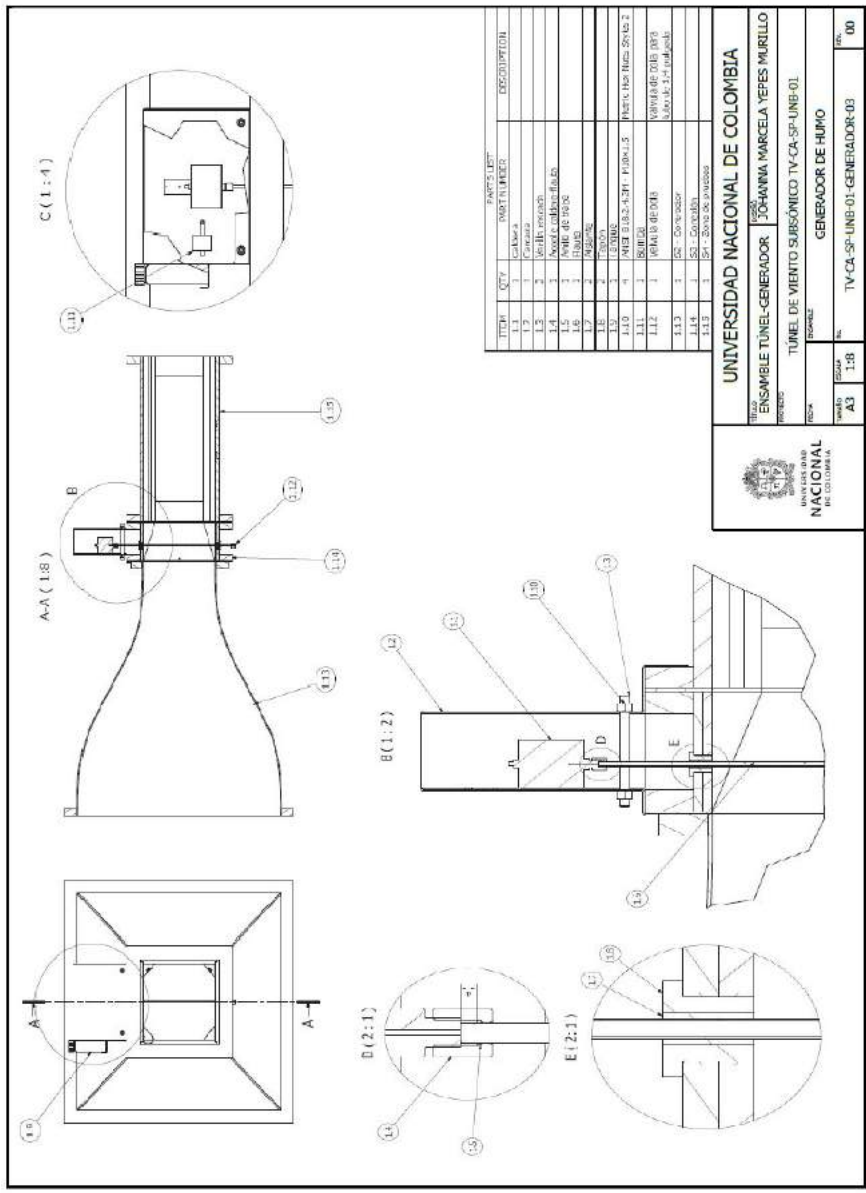
PARTS LIST

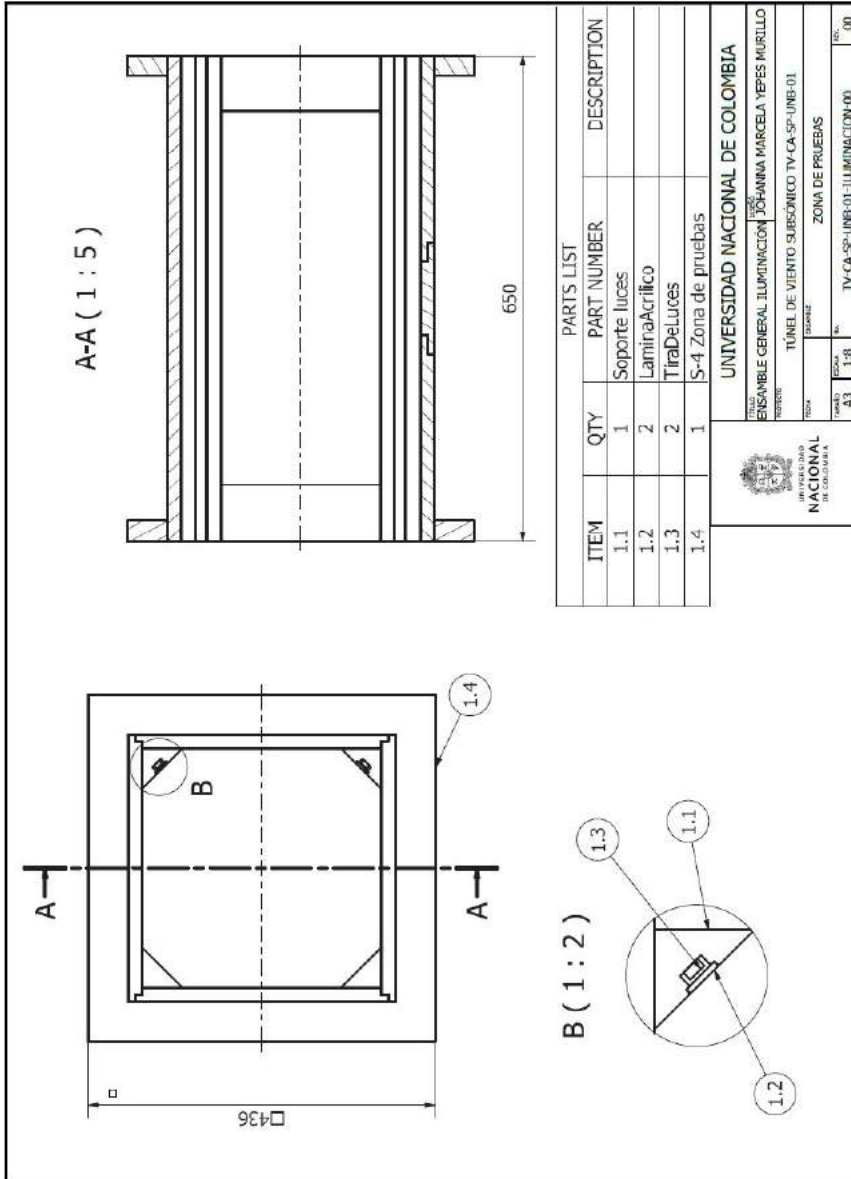
ITEM	QTY	PIEZA	DESCRIPCION	PLAN
1.1.1	1	Tapa Frontal	AISI 1020	3
1.1.2	1	Tapa Posterior	AISI 1020	4
1.1.3	1	Cuerpo	AISI 1020	5

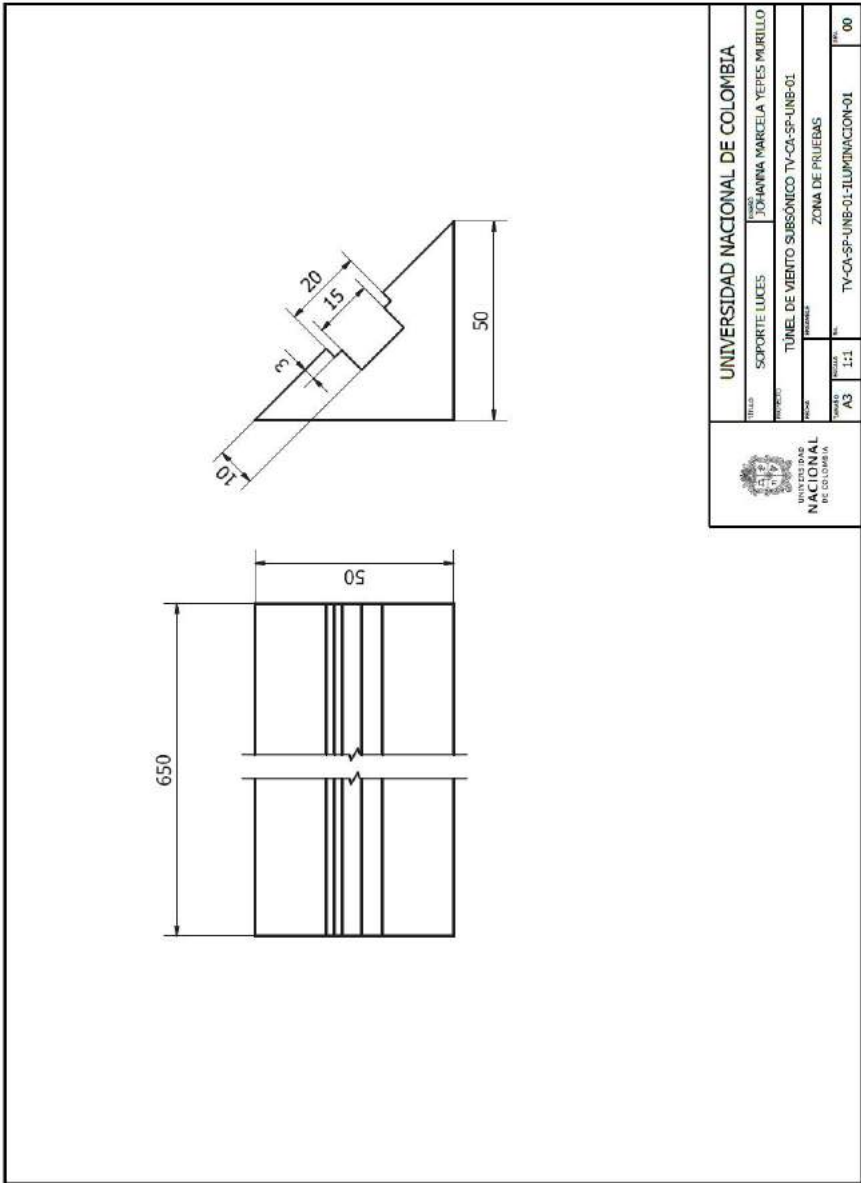
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
TITULO	CARGASA
PROFESOR	JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO
PROYECTO	TUNEL DE VIENTO SUBSONICO TV-CA-SF-UMB-01
FECHA	202202
ESCALA	1:4
HOJA	23
TOTAL	TV-CA-SF-UMB-01-GENERADOR-01
REV.	00



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
TIPO	CUERPO
PERSONA	JOHANNA MARCELA VEFES MURILLO
PROYECTO	TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO TV-CA-SP-UMB-01
DISCIPLINA	INGENIERÍA
PROFESOR	GENERADOR DE HUMO
ESCALA	1:1
FECHA	TV-CA-SP-UMB-01-GENERADOR-02
NO. HOJA	00

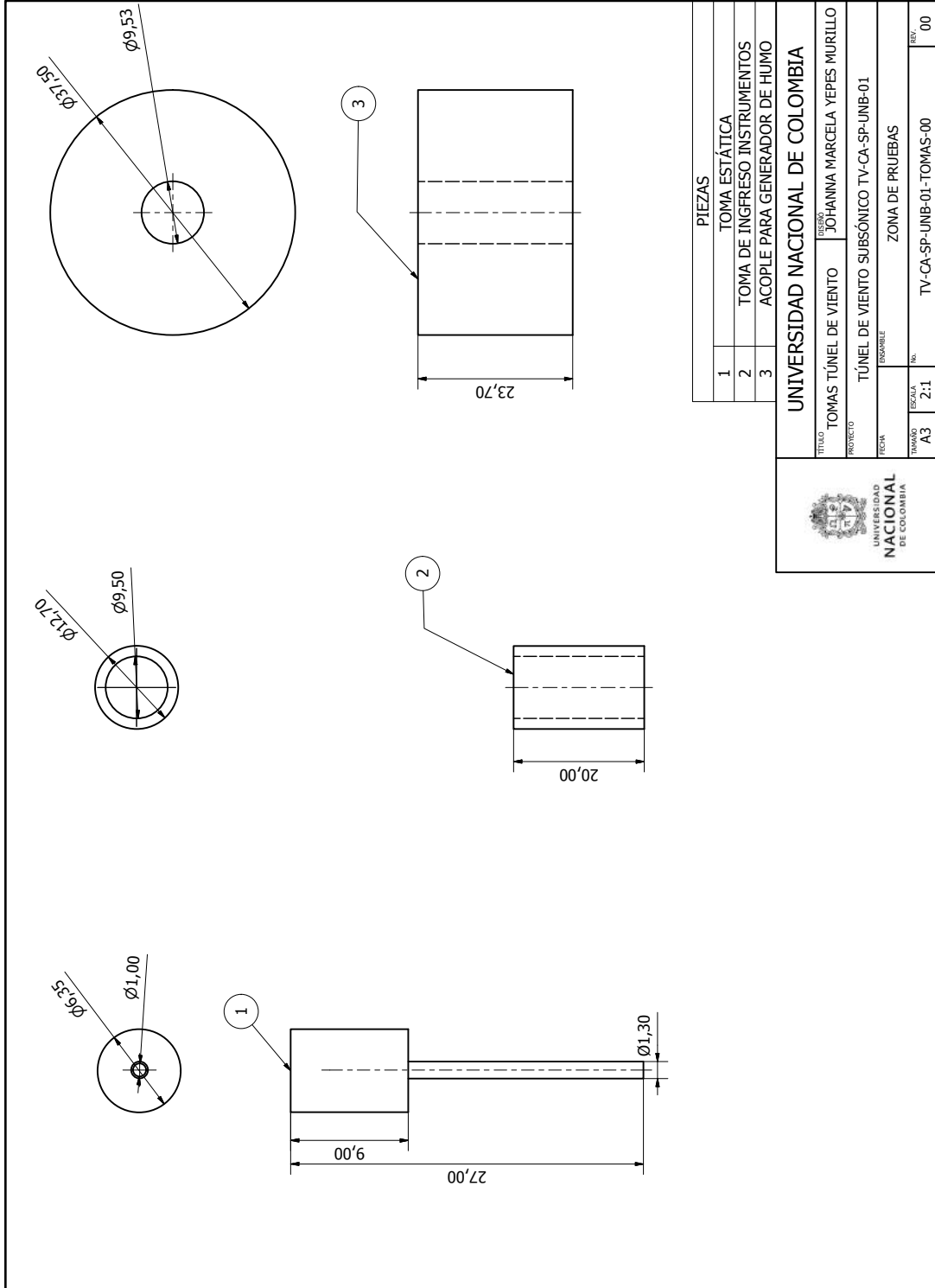


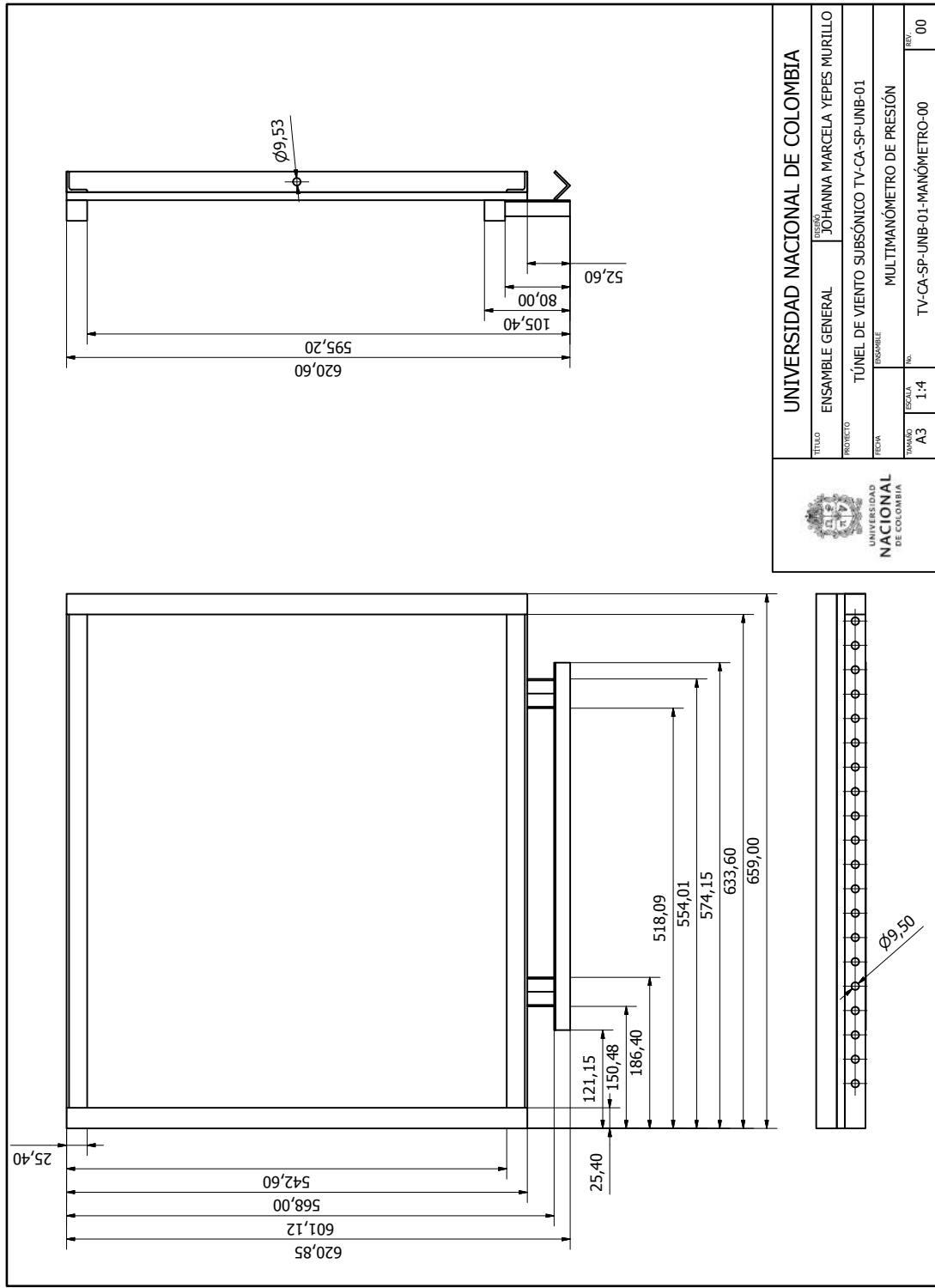




UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
TÍTULO	SOPORTE LUCES
PROFESOR	JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO
PROYECTO	TUNEL DE VIENTO SUBSÓNICO TV-CA-SP-UNB-01
PROFESOR	ZONA DE PRUEBAS
ESCALA	1:1
FECHA	TV-CA-SP-UNB-01-ILUMINACION-01
NO.	00







UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
TÍTULO	ENSAMBLE GENERAL
DESIGNADO	JOHANNA MARCELA YEPES MURILLO
PROYECTO	TUNEL DE VIENTO SUBSÓNICO TV-CA-SP-UNB-01
FECHA	ENSAMBLE
TAMANO	ESCALA
A3	1:4
	Nº
	TV-CA-SP-UNB-01-MANÓMETRO-00
	REV.
	00

Bibliografía

- [1] *Heavy Duty Pitot Tube Anemometer and Differential Pressure Manometer User Guide*
- [2] *WIKA-Handbook*
- [3] ALHAJRAF, S.: Computational fluid dynamic modeling of drifting particles at porous fences. En: *Environmental Modelling and Software* (2004)
- [4] ANDERSON, Jr.: *A History of Aerodynamics: And Its Impact on Flying Machines*. Cambridge, UK : Academic Press, 1997
- [5] ANDERSON, Jr.: *Fundamentals of Aerodynamics*. New York : McGraw-Hill, 2001
- [6] DE LOS ANDES COLOMBIA, Universidad. *Laboratorios*. Accessed 18 de Julio 2016
- [7] AUTODESK. *Inventor*. Accessed 19 de Julio 2016
- [8] AUTODESK. *Autodesk CFD*. Accessed 28 de Noviembre 2016
- [9] DE AVIACIÓN MARCO FIDEL SUAREZ, Escuela M. *Escuela Militar de Aviación Marco Fidel Suarez*. Accessed 18 de Julio 2016
- [10] BAALS, William R.: *Wind Tunnels of NASA*. Washington D.C. : NASA publications, 1981
- [11] BARLOW, Rae William H Jr. & Pope A.: *Low-Speed Wind Tunnel Testing*. New York : John Wiley & Sons, 1999
- [12] BOLIVARIANA, Universidad P. *Laboratorio de fluidos (aire)*. Accessed 18 de Julio 2016
- [13] DE COLOMBIA, Universidad N. *La investigación en la Universidad*. Accessed 18 de Julio 2016
- [14] DE COLOMBIA, Universidad N. *Sede Medellin*. Accessed 18 de Julio 2016
- [15] COLOMBIANA, Aeronautica C. *Laboratorios Aero Civil*. Accessed 18 de Julio 2016
- [16] DAHL, Sindre M. *Unsteady RANS Simulation of Flow around Rectangular Cylinders with different Aspect Ratios at High Reynolds Number*. 2014

- [17] DWOYER, Kutler P. & Povinelli L. A.: Retooling CFD for hypersonic aircraft. En: *Aerosp. Am.* (1987)
- [18] EXTECH INSTRUMENTS BRAND, under FLIR Commercial S. *EXTECH By Flir*. Accessed 08 de Mayo 2017
- [19] GARTMANN ANDRES, Wolfgang Schwanghart & Müller Mathias D.: CFD modelling and validation of measured wind field data in a portable wind tunnel. En: *Aeolian Research* (2011)
- [20] GIRALDO., F.X.: *Time-Integrators..* – Notas de Lectura
- [21] GREELEY, Blumberg D.G.& Williams S.: Field measurements of the flux and speed of wind-blown sand. En: *Sedimentology* (1996)
- [22] H., Goethert B.: *Transonic Wind Tunnel Testing*. London : Pergamon Press, 1961
- [23] HIRSCHEL, Prem Horst & Madelung G.: *Aeronautical Research in Germany: From Lilienthal Until Today*. Germany : Springer, 2001
- [24] I.I., Gorlin S.M & S.: *Wind tunnels and their instrumentation*. Washington D.C : The U.S. National Aeronautics and space administration and the science foundation., 1996
- [25] DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA. FACULTAD DE INGENIERÍA. SEDE BOGOTÁ., Departamento. *Laboratorios-Hidráulica*. Accessed 18 de Julio 2016
- [26] K., Shimada: Application of a modified $k - \varepsilon$ model to the prediction of aerodynamic characteristics of rectangular cross-section cylinders. En: *Journal of Fluids and Structures* (2002)
- [27] KÁRMÁN, Theodore V.: *Aerodynamics: Selected Topics in the Light of Their Historical Development*. Ithaca. Mineola, NewYork : Dover Publications, Inc., 2004
- [28] LIBERTADORES, Fundación Universitaria L. *Fundación Universitaria Los Libertadores*. Accessed 18 de Julio 2016
- [29] LTD., OpenFOAM. *OpenFOAM User Guide*. Accessed 28 de Junio 2016
- [30] LTD., OpenFOAM. *OpenFOAM Boundaries*. Accessed 29 de Junio 2016
- [31] LUCA BRUNO, Nicolas Coste & Arianna B.: 3D flow around a rectangular cylinder: A computational study. En: *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* (2010)
- [32] LYSENKO, Ertesvag Ivar S. & Rian Kjell E.: Modeling of turbulent separated flows using OpenFOAM. En: *Computers and Fluids* (2013)

- [33] MARCELA, Arango Duque Alejandro & Yepes Murillo J. *Diseño, construcción y puesta en funcionamiento del Túnel de Viento subsónico de circuito abierto de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá con implementación de sistemas de toma de datos de aire y visualización de flujo*. 2014
- [34] MILOVAN., Ferziger Joel H. & P.: *Computational Methods for Fluid Dynamics*. New York : Springer., 2002
- [35] MOTT, Robert L.: *Mecánica de Fluidos*. Mexico : Pearson EDUCACION, 2006
- [36] MURAKAMI, Ooka R. Mochida A. Yoshida S. & Kim S.: Cfd analysis of wind climate from human scale to urban scale. En: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* (1999)
- [37] NASA-ROCKETRY. *Konstantin E. Tsiolkovsky*. Accessed 21 de Junio 2016
- [38] NEUMANN, J. R.: Introduction to aerodynamic heating analysis of supersonic missiles. En: *Prog. Astronaut. Aeronaut.* (1986)
- [39] PARSONS, Wiggs G.F.S. Walker I.J. Ferguson R.I. & Garvey B.: Numerical modelling of airflow over an idealised transverse dune. Modelling of Wind Erosion and Aeolian Processes. En: *Environmental Modelling and Software* (2004)
- [40] DE PEREIRA, Universidad T. *Universidad Tecnológica de Pereira*. Accessed 18 de Julio 2016
- [41] RODI, Gerhard Bosch & W.: Simulation of vortex shedding past a square cylinder near a wall. En: *Int. J. Heat and Fluid Flow* (1995)
- [42] RODI, R. Frankel & W.: Calculation of Vortex Shedding Past a Square Cylinder with Various Turbulence Models. En: *Turbulent Shear Flows* (1993)
- [43] DE SANTANDER, Universidad I. *Universidad Industrial de Santander*. Accessed 18 de Julio 2016
- [44] S.L., PCE I. *Termohigrómetro y Barómetro Registrador de Datos PCE-THB 40*. Accessed 09 de Mayo de 2017
- [45] SMITS, Alexander J.: *A Physical Introduction to Fluid Mechanics*. New York : John Wiley, 2000, 2017
- [46] T., Shimada K. & I.: Predictability of unsteady two-dimensional $k - \varepsilon$ model on the aerodynamic instabilities of some rectangular prisms. En: *Journal of Fluids and Structures* (2012)

-
- [47] VERSTEEG, H. K. & Malalasekera W.: *An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The finite volume method*. Pearson Education Limited, 2007
- [48] WAKES, Maegli T. Dickinson K.J.& Hilton M.: Numerical modelling of wind flow over a complex topography. En: *Environmental Modelling and Software* (2010)