

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL Y COMPUTACIONAL
MEDIANTE CFD ANSYS DEL FLUJO DE AIRE A TRAVES DE
TECHOS DE EDIFICACIONES USANDO UN TUNEL DE
VIENTO”**

Tesis previa a la obtención del título
de Ingeniero Mecánico.

AUTORES:

JOSÉ ANDRÉS CEDILLO SARMIENTO

JUAN PABLO MARÍN LAZO

DIRECTOR:

ING. PAÚL BOLÍVAR TORRES JARA MSc.

CUENCA, Marzo 2015

Breve Reseña de los autores e información de contacto

José Andrés Cedillo Sarmiento

Estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica.

Universidad Politécnica Salesiana

jcedillos@est.ups.edu.ec

Juan Pablo Marín Lazo

Estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica.

Universidad Politécnica Salesiana

jmarinl@est.ups.edu.ec

Todos los derechos reservados

Queda prohibida, salvo la excepción prevista por la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la debida autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constituida de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2015 Universidad Politécnica Salesiana

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

La declaración realizada bajo juramento expresa que el presente estudio y temas del mismo son de exclusiva responsabilidad de los autores, y previamente no han sido presentados en otros estudios; y que cada idea y/o concepto desarrollados presentan su debida referencia bibliográfica que se incluyen en el presente documento.

La Universidad Politécnica Salesiana, se permite el uso de los derechos correspondientes al presente trabajo de tesis, conforme lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, para fines educativos.

Cuenca, Marzo del 2015



José Andrés Cedillo Sarmiento

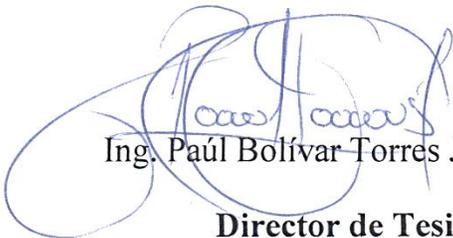


Juan Pablo Marín Lazo

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores JOSÉ ANDRÉS CEDILLO SARMIENTO y JUAN PABLO MARIN LAZO, bajo mi supervisión.

Cuenca, Marzo del 2015



Ing. Paúl Bolívar Torres Jara MSc

Director de Tesis

DEDICATORIA

De manera especial dedico este trabajo a mis amados padres José y Rosa, que me han enseñado el ejemplo de la lucha constante, que siempre han sido el pilar fundamental, durante mi carrera Universitaria, siempre apoyándome para salir adelante.

A mi hermano Pedro, que siempre me ha estado apoyando con sus palabras de ánimo, que han servido como impulso para que pueda cumplir mis metas personales.

A todos mis amigos, con los cuales compartí tiempo en las aulas de clases y fuera de ellas, que hicieron que este camino sea más fácil.

A mi familia, que siempre ha estado pendiente de mí, y de mi carrera universitaria.

JOSÉ ANDRÉS

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios, por haberme dado la vida y la salud, por haberme acompañado y guiado como estudiante y por darme la fuerza y la paciencia para afrontar los problemas que se me presentaron en el camino.

A mis Padres y mi hermano por estar conmigo y brindarme su apoyo incondicional en todo momento.

A mi familia de manera especial a mis tíos, que ayudaron para la consecución de esta meta personal tan anhelada.

Al Ingeniero Paul Torres, que fue un apoyo fundamental en la culminación de esta tesis, siempre presto a ayudar desde el primer momento.

Finalmente a todos mis amigos, que siempre estuvieron prestos para ayudar y apoyar en lo que fuese necesario, a todos muchas gracias por esa amistad sincera que siempre supimos tener.

JOSÉ ANDRÉS

DEDICATORIA

Dedico este trabajo especialmente a mis papas,
Soraida y Román, por ese apoyo incondicional
que siempre me han dado y por brindar en mi
esa confianza que yo tanto necesitaba,
así como también la enseñanza que día a día
me van dejando con su ejemplo de esfuerzo
y dedicación para jamás rendirme y poder
cumplir todas esas metas planteadas.

A mis hermanos por ser un complemento
junto a mis padres desde que empecé el
desafío universitario y por su comprensión
les estaré siempre agradecidos.

A toda mi familia y amigos, porque de
una u otra manera han puesto su granito de arena
para la realización de este trabajo de tesis.

JUAN PABLO

AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco a Dios, por darme la vida y mantenerme con salud para afrontar con fortaleza los obstáculos que se pongan en mi vida, como también por guiarme por buen camino y bendecirme por estar con la gente que quiero.

Agradezco infinitamente a mis papás y hermanos por ese apoyo incondicional y estar conmigo en las buenas y las malas en todo momento.

De igual manera se agradece de manera muy cordial al ingeniero Paúl Torres, por su amable apoyo acompañado de paciencia y comprensión para la realización de este trabajo final.

A mis amigos y compañeros de la Universidad con los que con trabajo en equipo, solidaridad y entusiasmo supimos llevar adelante cualquier adversidad presentada a lo largo de nuestra carrera.

JUAN PABLO

RESUMEN

En este proyecto de tesis se muestra el análisis numérico y experimental del flujo de viento a través de perfiles de techos de edificaciones con diferentes geometrías, el análisis experimental se realiza mediante el uso de un túnel de viento Marca Armfield C15 que se encuentra instalado en el laboratorio de Mecánica de Fluidos en el Área de Ingeniería Mecánica, en cuanto al análisis computacional se utiliza la dinámica de fluidos computacional (CFD) mediante el software ANSYS Fluent, la finalidad de estos análisis es la de comparar los resultados obtenidos en los ensayos experimentales y la simulación numérica, y constatar cuan confiable es el software utilizado como complemento para el análisis de flujo de viento sobre techos de edificaciones considerando la velocidad que se genera sobre los techos, para así no depender necesariamente de un túnel de viento como herramienta difícil de obtener ya sea por tamaño y costo para este tipo de análisis, y el uso necesario solo de un software computacional pese a que este también necesita de un coste alto inicial y un ordenador sofisticado.

Las geometrías usadas se encuentran en la vida diaria, siendo estas de perfil triangular, tipo H y con techo colgante, para el caso de las dimensiones nos impusimos guiándonos en dimensiones reales de una estructura promedio de un edificio o casa; las maquetas usadas en el ensayo experimental se hicieron de madera considerando la escala de reducción para la cuestión computacional.

Para la toma de datos en el túnel de viento se ubicaron puntos estratégicos donde la capa límite afecta en mayor proporción el flujo de viento y por ende a la velocidad del mismo siendo este el factor a analizar y comparar, los sensores fueron colocados en base a la norma AMCA 203-90; el registro de datos se realizó cada 0,2 seg. Durante un lapso de tiempo necesario hasta la estabilización del flujo, en un tiempo de ensayo establecido, en base a la aplicación de análisis dimensional y similitud.

Para la simulación computacional se usó el módulo Fluent Proporcionado por Ansys, en el cual se recrearon los modelos físicos y los efectos que afectan a los mismos.

Se realizaron dos tipos de mallado diferentes, un primer mallado creado por defecto en Ansys que está conformado por elementos de malla cuadrada, y una segunda malla conformada por elementos triangulares de menor tamaño, con un refinamiento de la malla en torno al perfil del modelo, el cual permitirá obtener un mejor resultado en la separación de la capa límite del viento en torno al perfil.

Finalmente los resultados de velocidades que se obtienen muestran ciertas variaciones entre los valores experimentales y computacionales, de manera más amplia con respecto a los valores computacionales de mallado por defecto, en cambio respecto a los valores computacionales de mallado refinado la diferencia es muy reducida, tal es así que el valor general del error se mantiene dentro del rango de error permisible encontrado en un apartado bibliográfico, demostrando así la confiabilidad del software ANSYS Fluent como complemento para el análisis del flujo de viento sobre techos de edificaciones.

El contenido de este trabajo de tesis está dividido en 4 capítulos. El primero encargado en una parte introductoria acerca del viento, túnel de viento, de Software ANSYS Fluent CFD, el capítulo dos está encomendado en describir la situación física y los modelos matemáticos a utilizar en la simulación numérica, para el capítulo tres se comparte los datos que se obtienen en el ensayo experimental y computacional, culminando con el capítulo cuatro que se encarga en el análisis y comparación de los datos obtenidos en el capítulo previo.

Palabras Clave: Análisis Numérico, Computacional, Túnel de Viento, Dinámica de Fluidos Computacional, ANSYS Fluent, Velocidad, Capa Límite, Techos de Edificaciones, Sensores.

ABSTRACT

In this thesis project shown numerical and experimental analysis of wind flow through profiles ceilings of buildings with different geometries, the experimental analysis is performed using a wind tunnel Brand Armfield C15 that is installed in the Fluid Mechanics Laboratory in the Department of Mechanical Engineering, in terms of computational analysis computational fluid dynamics (CFD) is used by ANSYS Fluent software, the purpose of this analysis is to compare the results obtained in experimental trials and numerical simulation and observe how reliable is the software used in addition to the analysis of wind flow on roofs of buildings considering speed generate on ceilings to not necessarily rely on a wind tunnel as tool difficult to obtain you get either by size and cost for this type of analysis, and the necessary use only computer software although this also needs a high initial cost and a sophisticated computer.

Geometries are used in daily life, this being triangular shaped, H type and suspended ceiling, in case the dimensions we set ourselves guided in actual dimensions of an average structure of a building or home; the models used in the experimental test were made of wood considering the scale of reduction in computational issue.

For data collection in the wind tunnel strategic points were located where the boundary layer disproportionately affects the wind flow and hence its speed being the factor analysis and comparison, the sensors were placed based on AMCA Standard 203-90; data recording was performed every 0.2 sec. For a period of time necessary to stabilize the flow, a test set time, based on applying dimensional analysis and similarity.

For the computational simulation is used module Fluent Provided by Ansys, in which physical models the effects that affect them recreated.

Two different types of mesh, created by a first meshing defect Ansys, comprising square elements of mesh and a second mesh formed by smaller triangular elements with a mesh refinement around profile model were performed, the which will get a better result in the separation of the layer wind boundary around profile.

Finally results of speeds obtained show some variation between experimental and computational values, more about more widely in the computational values of default

meshing, regarding computational mesh refined values the difference is very small, such
Thus, the overall value of the error remains within the range of allowable error found in a
bibliography section, demonstrating the reliability of ANSYS Fluent software in addition to
the analysis of wind flow on roofs of buildings.

The content of this thesis is divided into 4 chapters. The first manager in an introductory
part about wind, wind tunnel, ANSYS Fluent CFD Software, chapter two is assigned to
describe the physical situation and mathematical models used in the numerical simulation
for chapter three shared data obtained in the experimental and computational testing,
culminating in chapter four which is responsible for the analysis and comparison of data
obtained in the previous chapter.

Keywords: Numerical Analysis, Computational, Wind Tunnel, Computational Fluids
Dynamics, ANSYS Fluent, Speed, Boundary Layer, Roofs of Buildings, Sensors.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. CAPÍTULO I	1
GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.1.1 El Viento.	1
1.1.1.1 Origen del Viento.	1
1.1.1.2 Capas atmosféricas.	2
1.1.1.3 Movimiento del viento.	4
1.1.1.3.1 Brisas marinas.	4
1.1.1.3.2 Vientos en valles y montañas.	5
1.1.1.3.3 Isla de calor.	5
1.1.1.3.4 Efecto colina.....	6
1.1.1.4 Turbulencias atmosféricas.....	7
1.1.1.4.1 Por forma de Perfil.	7
1.1.1.5 Cargas de Viento.	9
1.1.1.6 Barlovento y Sotavento.	10
1.1.1.6.1 Barlovento.	10
1.1.1.6.2 Sotavento.....	10
1.1.2 Túnel de Viento.....	10
1.1.2.1 Partes de un Túnel de Viento.	11
1.1.2.2 Clasificación Túnel de viento.....	14
1.1.2.2.1 Rango De Velocidades De Operación.....	14
Número de Mach.....	14
1.1.2.2.2 Topología Física.....	18
1.1.2.2.2.1 Según Tipo de Retorno.....	18
1.1.2.2.2.2 Según configuración de la cámara de ensayo.....	20
1.1.3 ANSYS Fluent.....	21
1.1.3.1 ANSYS Fluent CFD.....	22
1.1.3.2 Parametrización de ANSYS Fluent.....	23
1.1.3.2.1 Geometría.....	23
1.1.3.2.2 Mallado.....	23
1.1.3.2.3 CFD Pre-Procesamiento.....	24

1.1.3.2.4	CFD Solver.....	24
1.1.3.2.5	Modelos interoperables	24
1.1.3.2.6	CFD Post-Procesamiento	25
1.1.3.2.7	Paralelización	25
1.1.4	Datos Técnicos Ciudad de Estudio.....	25
1.2	APLICACIÓN DE TÚNEL DE VIENTO.....	27
1.2.1	Inicios de Aplicación.....	27
1.2.2	Túnel de Viento en Ingeniería Aeronáutica.....	29
1.2.3	Túnel de Viento en Ingeniería Automotriz [10].....	30
1.2.4	Túnel de Viento en Ingeniería Civil.....	32
1.2.5	Túnel de Viento en Arquitectura.....	34
1.2.6	Túnel de Viento en Energías Renovables.....	35
1.2.7	Túnel de Viento en Entrenamiento Deportivo.....	36
1.3	APLICACIÓN DE ANSYS FLUENT	37
1.3.1	Antecedentes.	37
1.3.2	Aplicaciones.	38
1.4	ESTUDIOS DE TÚNELES DE VIENTO EN TECHOS DE EDIFICACIONES. ...	42
1.4.1	Funcionamiento de un Túnel de Viento.	42
1.4.2	Información que se puede obtener.....	43
1.4.2.1	Velocidad	44
1.4.2.2	Presión.....	46
1.4.2.3	Fuerzas y Momentos	47
1.4.3	Túnel de Viento Armfield C15 (Laboratorio UPS).....	47
1.4.3.1	Especificaciones	47
1.4.3.2	Partes	48
1.4.3.3	Accesorios	48
1.4.3.4	Software (Túnel de Viento C15 – Lab UPS).....	49
1.4.4	Estudios Realizados con Túnel de viento y Softwares.....	49
1.4.4.1	Efecto del Viento en Cubiertas Curvas.	50
1.4.4.2	Estudios en túnel de viento sobre las características del campo y de dispersión de flujo en cañones urbanos en la Universidad de Karlsruhe.	53
1.4.4.3	Estudio de prueba de túnel de viento en el coeficiente de presión del viento de revestimientos de edificios de gran altura.	55
2.	CAPITULO II.....	57

SITUACIÓN FÍSICA Y MODELOS MATEMÁTICOS	57
INTRODUCCION.....	57
2.1 MODELOS FÍSICOS	57
2.1.1 Modelo físico Helipuerto	58
2.1.2 Modelo físico de Coliseo.....	59
2.1.3 Modelo físico de Techo Colgante	60
2.2 LEYES DE SIMILITUD EN MODELOS FÍSICOS.....	62
2.2.1 Semejanza Geométrica.....	62
2.2.2 Semejanza Cinemática	63
2.2.3 Semejanza Dinámica	64
2.3 MODELOS MATEMÁTICOS DE FLUJO DE FLUIDOS.....	65
2.3.1 Consideraciones de flujo para estudio en túneles de viento	65
2.3.2 Modelos matemáticos usados en modelos.....	66
2.3.2.1 Caso 1: Perfil H.....	66
2.3.2.2 Caso 2: Coliseo (Perfil Triangular)	66
2.3.2.3 Caso 3 : Techo colgante	66
2.3.3 Ecuaciones de gobierno de modelo matemático (Mecánica de fluidos)	67
2.3.3.1 Ecuación de continuidad en flujos incompresibles	67
2.3.3.2 Momento lineal en x.....	67
2.3.3.3 Momento lineal en y.....	67
2.3.3.4 Conservación de la energía.....	67
2.4 MODELO DE TURBULENCIA.....	67
2.4.1 Método de volúmenes finitos.	68
2.4.2 Modelo RANS para flujos incompresibles.....	69
2.4.2.1 Modelo de turbulencia k-épsilon realizable.	69
2.5 ESCALAMIENTO DE MODELOS	72
2.5.1 Escalaamiento de modelo Perfil H.....	72
2.5.2 Escalaamiento de perfil triangular	73
2.5.3 Escalaamiento de techo colgante	74
3. CAPÍTULO III.....	76
DATOS EXPERIMENTALES EN TÚNEL DE VIENTO Y SIMULACIÓN MEDIANTE	
MODELO CFD (ANSYS).....	76
INTRODUCCION.....	76

3.1 RECOLECCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES EN TÚNEL DE VIENTO.....	76
3.1.1 Ubicación de los sensores	79
3.1.1.1 Ubicación de los sensores perfil H.....	80
3.1.1.2 Ubicación de los sensores Perfil Triangular.....	81
3.1.1.3 Ubicación de los sensores en techo colgante.....	83
3.2 DATOS OBTENIDOS EN TÚNEL DE VIENTO	84
3.2.1 Datos de techo perfil H.....	84
3.2.2 Datos de perfil triangular.....	85
3.2.3 Datos de techo colgante.....	85
3.3 SIMULACIÓN MEDIANTE MODELO CFD (ANSYS).	86
3.3.1 Software empleado.....	86
3.3.2 Procedimiento de Simulación.....	86
3.3.2.1 Pre-proceso.....	87
3.3.2.2 Solución.....	87
3.3.2.3 Post-proceso	87
3.3.3 Condiciones de mallado	87
3.3.3.1 Mallado estructurado.....	88
3.3.3.2 Mallado no estructurado.....	88
3.3.4 Condiciones de contorno.....	90
3.3.4.1 Perfil-wall.....	90
3.3.4.2 Wall.....	90
3.3.4.3 Inlet	90
3.3.4.4 Outlet.....	90
3.3.5 Mallado de perfiles.....	91
3.3.5.1 Mallado Perfil H.....	91
3.3.5.1.1 Mallado estructurado (Defecto de Fluent).....	92
3.3.5.1.2 Mallado no estructurado (Refinamiento).....	92
3.3.5.2 Mallado Perfil Triangular.....	94
3.3.5.2.1 Mallado estructurado (defecto de Fluent).....	94
3.3.5.2.2 Mallado no estructurado (Refinamiento).....	95
3.3.5.3 Mallado Techo Colgante	96
3.3.5.3.1 Mallado Estructurado (Defecto de Fluent).....	97

3.3.5.3.2	Mallado no Estructurado (Refinamiento).....	97
3.4	RESULTADOS SIMULACIÓN CFD FLUENT	99
3.4.1	Resultados perfil en H.....	99
3.4.1.1	Posición 1 (Modelo Centrado)	100
3.4.1.2	Posición 2 (Modelo Desplazado-Izquierda).....	101
3.4.2	Resultados de perfil triangular (Coliseo).....	101
3.4.2.1	Posición 1 (Modelo Centrado)	102
3.4.2.2	Posición 2 (modelo desplazado hacia la derecha).....	103
3.4.2.3	Posición 3 (modelo desplazado hacia la izquierda).....	104
3.4.3	Resultados perfil con techo colgante.....	105
3.4.3.1	Posición 1 (modelo centrado).....	106
3.4.3.2	Posición 2 (modelo desplazado-izquierda).....	106
4.	CAPÍTULO IV	109
	COMPARACION Y ANALISIS DE RESULTADOS ENTRE MODELO CFD Y MODELO EXPERIMENTAL.	109
	INTRODUCCIÓN	109
4.1	ANÁLISIS DE DATOS OBTENIDOS EN TÚNEL DE VIENTO Y LA SIMULACIÓN COMPUTACIONAL.	109
4.1.1	Edificación con Techo Perfil H.....	110
4.1.2	Edificación Techo Perfil Triangular.....	115
4.1.3	Techo Colgante	120
4.2	COMPARACIÓN DE DATOS SIMULADOS Y REALES	124
4.2.1	Techo Perfil H.....	125
4.2.2	Techo Perfil Triangular	126
4.2.3	Techo Colgante	126
	CONCLUSIONES DEL PROYECTO	129
	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS UTILIZADAS	131

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. 1 Capas atmosféricas.	3
Figura 1. 2 Brisa marina en el día (izquierda) y en la noche (derecha).....	5
Figura 1. 3 Vientos en valles y montañas en el día (izquierda) y noche (derecha).	5
Figura 1. 4 Flujos de aire en ciudades.	6
Figura 1. 5 Perturbación del perfil de velocidad sobre una colina.	6
Figura 1. 6 Comportamiento de viento según forma de perfil.	7
Figura 1. 7 Aceleración del viento sobre una montaña.	8
Figura 1. 8 Posible acción del viento hacia una estructura.	9
Figura 1. 9 Barlovento y Sotavento.....	10
Figura 1. 10 Partes Túnel de Viento.....	11
Figura 1. 11 Túnel de viento cámara abierta.	12
Figura 1. 12 Túnel de viento cámara cerrada.	13
Figura 1. 13 Regímenes Numero de Mach.....	15
Figura 1. 14 Frentes de onda se extenderían esféricamente si el objeto está estático.	16
Figura 1. 15 Patrón Cónico.	17
Figura 1. 16 Circuito abierto con cámara de ensayos cerrada (Tipo NPL).	20
Figura 1. 17 Circuito abierto con sección de ensayos abierta (Tipo Eiffel).	21
Figura 1. 18 Circuito cerrado con sección de ensayos cerrada (Tipo Göttingen).	21
Figura 1. 19 Circuito cerrado con sección de ensayos abierta (Tipo Prandtl).....	21
Figura 1. 20 Ensayo de Avión Completo.	30
Figura 1. 21 Clara ruptura de Flujo Laminar.....	32
Figura 1. 22 Puente en Túnel de viento.....	33
Figura 1. 23 Modelo de la Hospedería del Errante en Túnel de Viento.	34
Figura 1. 24 Emplazamiento Eólico en Túnel de Viento.	36
Figura 1. 25 Pruebas de Ciclismo en Túnel de viento.....	37
Figura 1. 26 Resultados de simulación CFD a un nadador (Presiones).	38
Figura 1. 27 Vientos convectivos sobre el Valle de Aburrá.....	39
Figura 1. 28 Motor de combustión interna modelado utilizando ANSYS FLUENT.....	41
Figura 1. 29 Tubo de Venturi.	42
Figura 1. 30 Tubo de Pitot.....	44
Figura 1. 31 Manómetro Electrónico Digital.	45
Figura 1. 32 Principio de Funcionamiento Manómetro Diferencial.....	46
Figura 1. 33 Partes de Túnel de Viento Marca Armfield C15 (Laboratorio UPS).....	48
Figura 1. 34 Cubierta Redonda.	51
Figura 1. 35 Velocidad en el Plano de Simetría Longitudinal, cubierta sola.	51
Figura 1. 36 Velocidad en el Plano de Simetría Longitudinal, cubierta con obstrucción.	51

Figura 1. 37 Velocidad en el Plano de Simetría Longitudinal, cubierta con obstrucción.	52
Figura 1. 38 Velocidad en el Plano de Simetría Longitudinal, cubierta con obstrucción.	52
Figura 1. 39 Viento modelo de túnel de un corredor urbano idealizado montado en el túnel de viento de capa límite atmosférica en la Universidad de Karlsruhe.	53
Figura 1. 40 Perfil de Velocidades del Túnel de Viento.	54
Figura 1. 41 Localización de los Puntos de Medición entre las edificaciones con techo plano (Izquierda) y con techo de perfil triangular.	54
Figura 1. 42 Disposiciones de medida y direcciones del viento.	55

CAPÍTULO II

Figura 2. 1: Modelo físico de perfil H.	58
Figura 2. 2 Perfil de Helipuerto Medidas Reales y Modelo para uso en Túnel de Viento.	59
Figura 2. 3: Modelo físico de perfil triangular (Arriba hacia Abajo).	60
Figura 2. 4 Perfil de Coliseo con Medidas Reales y Modelo para uso en Túnel de Viento.	60
Figura 2. 5: Modelo físico de techo colgante (Arriba hacia Abajo).	61
Figura 2. 6 Perfil de Techo Colgante con Medidas Reales y Modelo para uso en Túnel de Viento.	61
Figura 2. 7: Semejanzas entre prototipo y modelo.	64
Figura 2. 8: Discretización de dominio usando volúmenes finitos.	68

CAPÍTULO III

Figura 3. 1 Manómetro de tubos inclinados.	77
Figura 3. 2: Menú principal software Armfield.	77
Figura 3. 3: Ventana principal de ensayo seleccionado.	78
Figura 3. 4: Menú de configuración de datos.	79
Figura 3. 5: Menú de adquisición de datos.	79
Figura 3. 6: Ejes coordenados del túnel de viento.	79
Figura 3. 7: Ubicación de sensores perfil H (Centrado).	80
Figura 3. 8: Ubicación de sensores perfil H (Desplazado-Izquierda).	80
Figura 3. 9: Ubicación de sensores perfil triangular (Centrado).	81
Figura 3. 10: Ubicación de sensores perfil triangular (Desplazado-Derecha).	82
Figura 3. 11: Ubicación de sensores perfil triangular (Desplazado-Izquierda).	82
Figura 3. 12: Ubicación de sensores techo colgante (Centrado).	83
Figura 3. 13: Ubicación de sensores techo colgante (Desplazado- Izquierda).	83
Figura 3. 14: Características de MALLA 1.	88
Figura 3. 15: Componentes de MALLA 2.	89
Figura 3. 16: Características de MALLA 2.	89

Figura 3. 17: Condiciones de contorno usadas en modelos.....	91
Figura 3. 18. Detalle de perfil H.....	92
Figura 3. 19: Modelo de perfil H con MALLA 1.....	92
Figura 3. 20: Modelo de perfil H con MALLA 2 en dos posiciones.....	93
Figura 3. 21: Detalle de refinamiento sobre perfil H.	93
Figura 3. 22: Detalle constructivo de perfil triangular.	94
Figura 3. 23: Mallado de perfil triangular con MALLA 1.	94
Figura 3. 24: Mallado de perfil triangular con MALLA 2.	95
Figura 3. 25: Detalle de refinamiento en perfil triangular.....	96
Figura 3. 26: Detalle de perfil de techo colgante.	96
Figura 3. 27: Mallado de perfil de techo colgante con MALLA 1.....	97
Figura 3. 28: Mallado de perfil de techo colgante MALLA 2.....	98
Figura 3. 29: Detalle de refinamiento en perfil de techo colgante.	98
Figura 3. 30 Línea de Flujo de Viento t = 0, 2, 4, 6 y 8 s. de arriba hacia abajo.....	99
Figura 3. 31: Líneas de corriente en perfil H (Centrado).	100
Figura 3. 32 Línea de Flujo de Viento t = 0–2–4–6–8 s. de arriba hacia abajo.....	100
Figura 3. 33: Líneas de corriente en Perfil H (Desplazado- Izquierda).....	101
Figura 3. 34 Línea de Flujo de Viento t = 6, 12, 18 y 24 s. de arriba hacia abajo.....	102
Figura 3. 35: Líneas de corriente perfil triangular (Centrado).	102
Figura 3. 36 Línea de Flujo de Viento t = 6, 12, 18 y 24 s. de arriba hacia abajo.....	103
Figura 3. 37: Líneas de corriente perfil triangular (Desplazado-Derecha).....	103
Figura 3. 38 Línea de Flujo de Viento t = 6, 12, 18 y 24 s. de arriba hacia abajo.....	104
Figura 3. 39: Líneas de corriente perfil triangular (Desplazado-Izquierda).	104
Figura 3. 40 Línea de Flujo de Viento t = 4, 8 y 13 s. de arriba hacia abajo.....	106
Figura 3. 41: Líneas de corriente techo colgante (Centrado).	106
Figura 3. 42 Línea de Flujo de Viento t = 4, 8 y 13 s. de arriba hacia abajo.....	107
Figura 3. 43: Líneas de corriente de techo colgante (Desplazado-Izquierda).	107

CAPÍTULO IV

Figura 4. 1 Edificación Techo Perfil H.	110
Figura 4. 2 Alturas de análisis de velocidad perfil H Centrado.	113
Figura 4. 3 Edificación Techo Perfil Triangular.	115
Figura 4. 4 Alturas de análisis de velocidad perfil Triangular Centrado.....	118
Figura 4. 5 Edificación Techo Colgante.....	120
Figura 4. 6 Alturas de análisis de velocidad perfil Techo Colgante Centrado.	123

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

Tabla 1. 1 Rango de Velocidades de Operación de Túnel de Viento.....	18
Tabla 1. 2 Tipo de túnel de viento según su topología física.	20
Tabla 1. 3 Parámetros Climáticos de Cuenca-Ecuador.	26
Tabla 1. 4 Promedio Anual Velocidad del Viento en Cuenca.....	27

CAPÍTULO II

Tabla 2. 1 Valores usados en el modelo k-épsilon realizable.....	71
--	----

CAPÍTULO III

Tabla 3. 1: Coordenadas de sensores en perfil H.	81
Tabla 3. 2: Coordenadas de sensores en perfil triangular.....	82
Tabla 3. 3: Coordenadas de sensores en techo colgante.....	83
Tabla 3. 4: Resultados de velocidades en perfil H.	84
Tabla 3. 5 Resultados de velocidades en perfil triangular.....	85
Tabla 3. 6: Resultados obtenidos en techo colgante.....	86
Tabla 3. 7: Características de malla de perfil H.	94
Tabla 3. 8: Características de malla de perfil triangular.....	96
Tabla 3. 9: Características de malla de en techo colgante.....	98
Tabla 3. 10: Resultados de simulaciones en perfil H.	101
Tabla 3. 11: Resultados obtenidos en simulación de perfil triangular.	105
Tabla 3. 12: Resultados obtenidos en simulación de techo colgante.	107

CAPÍTULO IV

Tabla 4. 1 Velocidades en Puntos Estratégicos Edificación Techo Perfil H.....	111
Tabla 4. 2 Valores de la Velocidad Perfil H en X.....	114
Tabla 4. 3 Velocidades en Puntos Estratégicos Edificación Techo Perfil Triangular.	115
Tabla 4. 4 Valores de la Velocidad Perfil Triangular en X.....	119

Tabla 4. 5 Velocidades en Puntos Estratégicos Edificación Techo Colgante.	120
Tabla 4. 6 Valores de la Velocidad Perfil Techo Voladizo en X.	123
Tabla 4. 7 Comparación de los Datos Experimentales y Computacionales en el Perfil Tipo H.	125
Tabla 4. 8 Comparación de los Datos Experimentales y Computacionales en el Perfil Triangular.	126
Tabla 4. 9 Comparación de los Datos Experimentales y Computacionales en el Perfil Techo Colgante.	126

1. CAPÍTULO I

GENERALIDADES

El propósito general de un túnel de viento es el de dotar de datos informativos acerca del comportamiento de flujos alrededor de sólidos, disponiendo de información sobre velocidades, presiones y cargas las cuales el viento produce sobre estos elementos, conjuntamente con la ayuda de softwares de simulación cada vez más sofisticados y precisos, aunque esto proponga para el usuario un gasto importante ya que los propios programas y la alta capacidad computacional que se va a utilizar prevé de una gran inversión inicial.

A continuación en capítulos posteriores daremos a conocer la metodología usada para poder obtener la velocidad en ciertos puntos que consideremos estratégicos, en tres tipos de perfil de techos, escalado de modelos reales y considerando las condiciones ambientales de la ciudad, y cuyos datos usarlos también en el programa computacional ANSYS Fluent y poder verificar mediante comparación si esta herramienta es confiable y si se encuentran en el rango permisible de error, con respecto a las velocidades en los puntos anteriormente mencionados.

Pero antes se tratara de manera clara y concisa los conceptos necesarios para entender de manera nítida el tema de túneles de viento, así como el programa ANSYS Fluent, como de aplicaciones que se dan de manera general, y de la cual trata nuestro tema de Tesis.

1.1 INTRODUCCIÓN.

1.1.1 El Viento.

1.1.1.1 Origen del Viento.

Las corrientes de aire tienen su origen en el sol, esto sucede ya que la atmósfera retiene la radiación solar, originando que el aire caliente con densidad más baja y que se aglomera en bolsas a presiones bajas ascienda, en cambio el aire frío con densidad mayor y que se aglomera en presiones altas descienda, ocupando el espacio dejado por el aire caliente, existiendo con esto las diferencias de presiones entre zonas altas y bajas provocando así el movimiento de las masas de aire, habitualmente conocidas como viento.

Debido a la desigualdad de calentamiento de la superficie terrestre, una pequeña cantidad de la energía solar (entre el 1 y 2%) da origen al viento, de igual manera es importante conocer las variaciones diurnas, nocturnas y estacionales de los vientos, la variación de la velocidad del viento con la altura sobre el suelo.

En este capítulo se observará la caracterización que tiene el viento debido al entorno en que vivimos, conjuntamente se mostrará la variación de dirección y velocidad del viento que se dan en diferentes zonas, tomando en cuenta la influencia de los obstáculos como casas, árboles, montañas, valles, etc., que producen una amortiguación de la velocidad del viento y la aparición de turbulencias ambientales [1] [2].

1.1.1.2 Capas atmosféricas.

La atmósfera es una capa de gas que cubre la superficie terrestre y debido a la fuerza de gravedad que existe, es atraída y se encuentra estratificada. En la atmósfera se diferencian varias capas, en las que las propiedades físicas de cada una son distintas y esto se debe a que existen diferentes composiciones y diferentes densidades.

Las capas atmosféricas son las siguientes:

- **Tropósfera:** Esta es la capa que se encuentra en contacto con la superficie terrestre y es en esta capa donde se producen los fenómenos meteorológicos, ésta capa tiene un espesor promedio de 11 km y posee el 75% de la masa total de la atmósfera.

- **Estratósfera:** Está situada a continuación de la troposfera y en ella se encuentra el ozono (O₃) que absorbe la radiación ultravioleta, esta capa posee un espesor promedio de 50 km y existen vientos horizontales que alcanzan el orden de los 200km/h.
- **Mesosfera:** Esta continua a la estratosfera, la temperatura de esta capa disminuye con respecto a la altura, tiene una altura de 50 a 80 km aproximadamente y contiene el 0,1% de la masa total de la atmósfera aproximadamente.
- **Termosfera:** Se encuentra situada a continuación de la mesosfera teniendo una altura promedio de 80 a 500 km medida desde el suelo terrestre, la temperatura en esta zona es muy elevada debido que aquí se concentran los rayos gamma y rayos X provenientes del sol, logrando una temperatura de hasta 1500 °C y las partículas sólidas que quieran ingresar a la tierra son desintegradas dando lugar a las conocidas estrellas fugaces, es en esta capa donde también se forman las auroras boreales.
- **Exosfera:** Esta es la última capa de la atmosfera, su altura no se encuentra muy definida pero se estima que tiene alrededor de 500 hasta 1000 km aproximadamente [2].

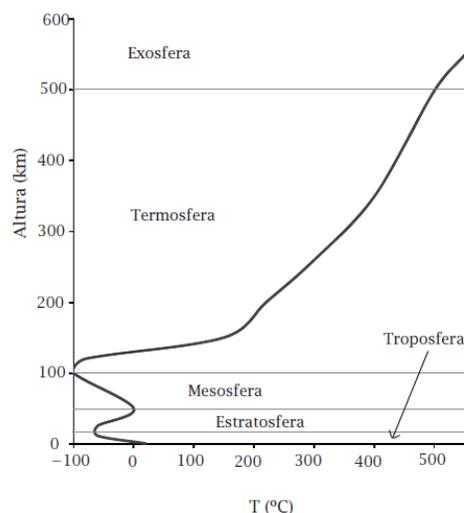


Figura 1. 1 Capas atmosféricas. Fuente [3]

1.1.1.3 Movimiento del viento.

Los vientos se consideran por tener movimientos tanto espacial como temporal.

El movimiento a grandes escalas se da debido a las diferentes regiones de la tierra es decir están ubicadas a latitudes que determinaría la cantidad de radiación solar que recibirían ciertas zonas, pero a escalas menores el movimiento del viento está delimitado por accidentes geográficos es decir cadenas de montañas, costas, vegetación, ciudades, etc.

El movimiento del aire se da en diferentes sentidos tanto en el día como en la noche haciendo que se genere el viento, pero el movimiento es diferente para colinas, valles y playas, como se sabe el aire frío por tener una densidad más pesada que el aire caliente hace que este al nivel de la superficie terrestre atrapando el calor y ascendiendo dejando lugar para que otro grupo de aire frío repita el ciclo.

1.1.1.3.1 Brisas marinas.

Ese ciclo del movimiento del aire es diferente tanto en el día como en la noche y para zonas montañosas como en zonas costeras, en el caso de la playa la radiación que llega a la Tierra generada por el Sol y calienta tanto la superficie terrestre y el agua marina, como se sabe el agua tiene mayor capacidad calorífica que la tierra y aumenta la temperatura más lento durante el día, el aire que está en contacto con la superficie terrestre se calienta por conducción ascendiendo produciendo una diferencia de presión haciendo que las masas de aire más frío, que se encuentra en el mar, ocupe el lugar dejado por el aire ya caliente en la superficie terrestre, formándose así una corriente cerrada.

En la noche se genera un fenómeno parecido debido también a que el agua marina se enfría más lento que la superficie terrestre haciendo que la brisa que se genera sea en sentido contrario a la brisa generada en el día.



Figura 1. 2 Brisa marina en el día (izquierda) y en la noche (derecha). Fuente [3]

1.1.1.3.2 Vientos en valles y montañas.

En el caso de valles y montañas es diferente al que se genera en las costas y esto se debe a que en el día las laderas de la zona montañosa absorben la radiación generada por el Sol aumentando su temperatura y calentando el aire que tienen a su alrededor, lo que hace que el aire genere un flujo que asciende por la ladera desde el nivel más bajo del valle. El panorama es distinto en la noche haciendo que las laderas se enfríen haciendo que el aire que está en su alrededor se enfríen haciendo que estas desciendan hasta el valle, formando así corrientes de viento en un circuito cerrado durante el día y la noche respectivamente [1] [2].

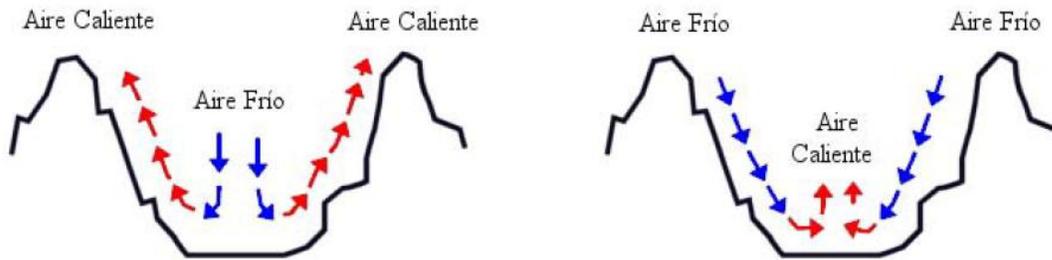


Figura 1. 3 Vientos en valles y montañas en el día (izquierda) y noche (derecha). Fuente [3]

1.1.1.3.3 Isla de calor.

Se da en las grandes ciudades, por el desprendimiento de calor acumulado durante el día, en los edificios, el asfalto y hormigón durante el transcurso de la noche, calentando y haciendo

ascender el aire desde el exterior hacia el interior. De esta forma, desde las afueras hacia el centro urbano se crea una corriente de aire más frío que tiende a reemplazar el aire que ha ascendido.

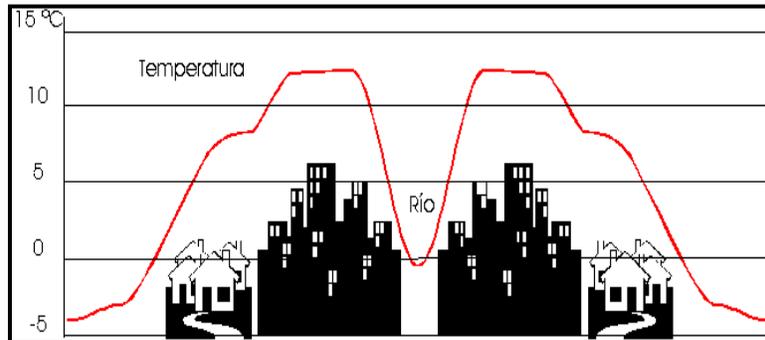


Figura 1. 4 Flujos de aire en ciudades. Fuente [4]

1.1.1.3.4 Efecto colina.

Efecto que produce variaciones en el perfil vertical del viento, y por ende variaciones en la velocidad del flujo de aire, también se ocasionan remolinos y turbulencias que dependen de la topografía de la zona [1].

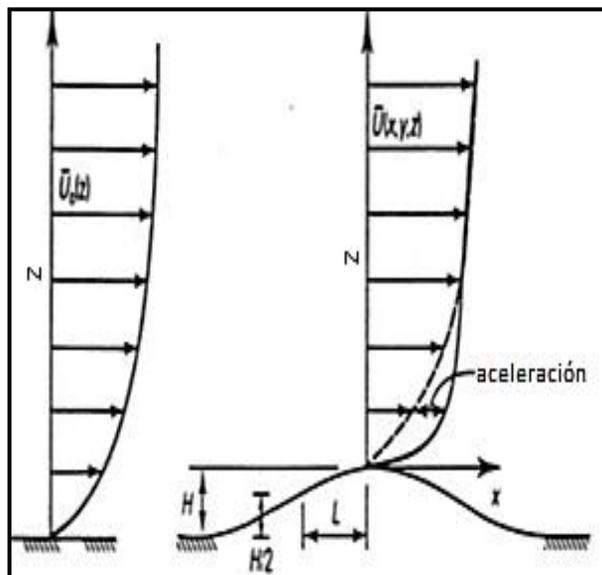


Figura 1. 5 Perturbación del perfil de velocidad sobre una colina. Fuente [5]

1.1.1.4 Turbulencias atmosféricas.

Las fluctuaciones de turbulencia son irregulares, es decir, siempre varían y no se conoce su comportamiento, lo más adecuado para averiguar el comportamiento de estas oscilaciones es realizar un tratamiento estadístico. Una turbulencia se define como una incorporación de todas las oscilaciones de frecuencias más altas que la variación de la velocidad media [2].

Una turbulencia se considera a la desviación de la velocidad instantánea con respecto a la velocidad media, es decir:

$$U(t) = U(t) - \bar{U} \quad (1.1)$$

1.1.1.4.1 Por forma de Perfil.

Esta variable, hace referencia al tipo de perfil en estudio, puesto que la forma de este, como estructuras o terreno suaves, como colinas o valles considerando terrenos y con formas redondeadas que influyen positivamente en la aceleración local del viento. Por ejemplo, en una pendiente suave (figura 1.6 Izquierda), el viento se acelera a lo largo de su pendiente dándose la máxima velocidad en la cima. En cambio, un perfil abrupto disipa la energía del viento debido a las turbulencias generadas. Un acantilado (Figura 1.6 Derecha) no es conveniente para instalar un aerogenerador.

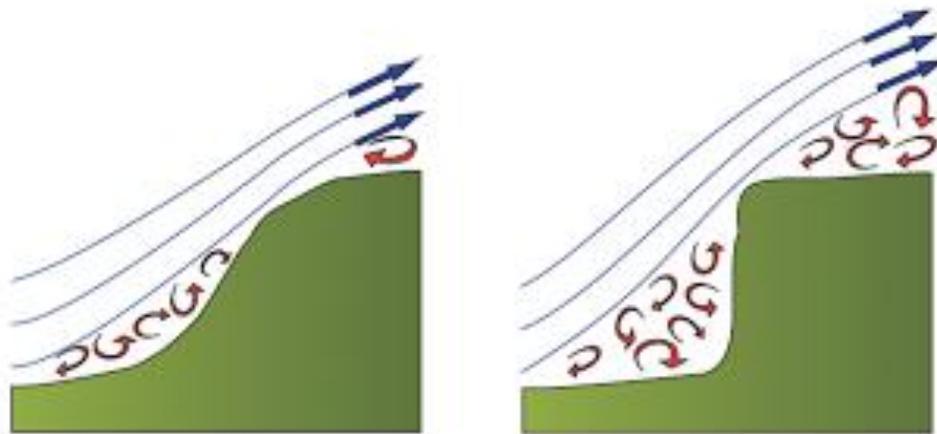


Figura 1. 6 Comportamiento de viento según forma de perfil. Fuente [6]

Para estimar la influencia del perfil sobre la dinámica del viento se utilizan distintos métodos como:

- a) Modelos experimentales (generalmente con simulación en túnel aerodinámico).
- b) Modelos numéricos (CFD, Linealizados): son los más usados, sin embargo presentan diversos grados de complejidad.
 - CFD. Resuelven ecuaciones completas regidas en el movimiento del fluido, incluyendo modelos de turbulencia. Suelen requerir ordenadores de gran tamaño y mucho tiempo de cálculo.
 - Los linealizados. Son fáciles de maniobrar matemáticamente pero su rango de validez es limitado y dan información insuficiente o hasta errónea en terrenos complejos.

La turbulencia influye en los cambios de velocidad y trayectoria, debido a la incidencia del viento sobre diferentes superficies.

Cuando el viento incide sobre perfiles, se sabe que se alcanzan altas velocidades en la cima debido al efecto de viento cortante, y la cima del perfil actúa como una especie de concentrador de viento de la corriente de aire, causando que el viento se acelere (Figura 1.41).

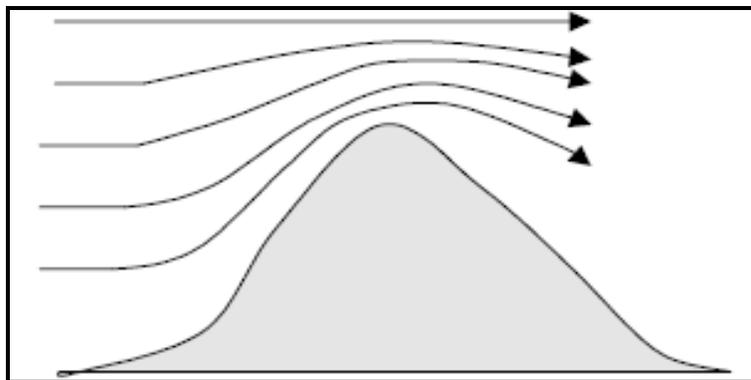


Figura 1. 7 Aceleración del viento sobre una montaña. Fuente [7]

Las fluctuaciones turbulentas son fundamentalmente irregulares, es por esto que lo más conveniente es realizar un tratamiento estadístico de estas variaciones [1]. Entonces se puede definir a la turbulencia como; la desviación de la *velocidad instantánea* $U(t)$ con respecto a la *velocidad media* (u):

$$U(t) - u \quad (1.2)$$

1.1.1.5 Cargas de Viento.

Se define como carga de viento aquella carga de naturaleza variable producida por la actuación directa del viento sobre la estructura resistente o sobre elementos no estructurales que incidan sobre ella, independientemente de que se considere su actuación directamente para el cálculo estructural o como acción exterior para la determinación de otras cargas variables o accidentales.

La incidencia de la acción del viento en la valoración de dichas cargas variables o accidentales y las condiciones de actuación aplicables se analiza una por una, para luego mediante la ayuda de softwares de resolución llegar a la validación de cálculos.

[9] Las cargas de viento en sí son las fuerzas ejercidas por la energía cinética de una masa de aire en movimiento, suponiendo que provenga de cualquier dirección horizontal.

Por tal razón la estructura, los componentes y el revestimiento de un edificio, casa o local deben diseñarse para resistir el deslizamiento, el levantamiento o el vuelco inducidos por el viento (figura 1.8) [8].

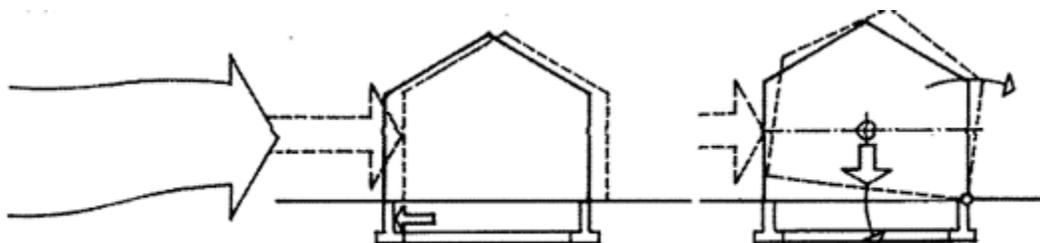


Figura 1. 8 Posible acción del viento hacia una estructura. Fuente [9]

1.1.1.6 Barlovento y Sotavento.

1.1.1.6.1 Barlovento.

Barlovento es conocido cuando el viento ejerce una presión positiva en sentido horizontal sobre las superficies verticales de un edificio que estén recibiendo directamente la energía cinética del viento y en sentido normal a las superficies de los techos que reciben la acción del viento directamente y que tengan una inclinación mayor que los 30 grados (figura 1.9).

1.1.1.6.2 Sotavento.

Sotavento es conocido cuando el viento ejerce una presión negativa o succión en lados y en las superficies que se encuentran detrás de las superficies donde incide directamente el viento y en dirección normal a las superficies del techo que reciben la acción del viento directamente que tengan una inclinación menor que 30 grados (figura 1.9) [9].

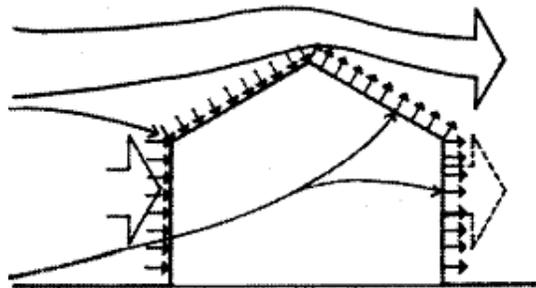


Figura 1. 9 Barlovento y Sotavento. Fuente [9]

1.1.2 Túnel de Viento.

El túnel de viento o túnel aerodinámico, es una herramienta que permite estudiar el comportamiento del aire cuando ponemos un objeto dentro del flujo y decimos objeto ya que su trabajo no solo se centra en el diseño de vehículos sino también de elementos tan distintos como puede ser una casa, un puente, una torre, o el casco de un ciclista o incluso el mismo ciclista, en fin, todo lo que sea necesario estudiar de un elemento que sea

susceptible de poder comportarse de una forma o de otra, dependiendo de si le incide el viento o no.

Lo que se hace es incidir sobre el objeto, normalmente una maqueta a escala del objeto, un flujo continuo de aire generado por unos ventiladores que serán más o menos grandes dependiendo de la escala de la maqueta, a menos escala, menores ventiladores, menos coste, menos instalaciones, pero como consecuencia se producen peores resultados. El problema es que realizar pruebas con objeto reales demasiado grande encarece mucho la prueba ya que las turbinas que generen el flujo deben de ser muy grandes y en consecuencia muy difíciles de calibrar ya que deben de estar perfectamente diseñadas para que no generen turbulencia y flujos parásitos pero tiene una contraprestación, cuanto más grande sea la maqueta y más parecida a la realidad, mejores serán los resultados del ensayo. Por tanto, tenemos un tubo que por un extremo está abierto, una zona central donde hacen las mediciones y se coloca el elemento a analizar y en el otro extremo una o más turbinas que extraen o introducen aire al interior del circuito para genera el flujo [10].

1.1.2.1 Partes de un Túnel de Viento.

Un túnel de viento es realmente un dispositivo bastante simple. La mayoría de los diseños tienen la misma característica, están formados por los cinco componentes (Ver figura 1.10). El diseño origina una circulación de aire de alta velocidad y baja-turbulencia a través de la sección de la prueba.



Figura 1. 10 Partes Túnel de Viento. Fuente [10]

- **Cámara de acomodación o de establecimiento:** Su objetivo es enderezar y uniformizar el flujo de aire. Tiene una estructura en forma de panel, esto lo que hace es “romper” el aire en múltiples flujos independientes que se vuelven a unificar en el cono. Esto es muy eficaz en la reducción de posibles remolinos de aire en circulación por el túnel.
- **Cono de contracción o de aceleración:** El cono de contracción toma un volumen grande de aire de baja velocidad y lo reduce a un volumen pequeño de aire de alta velocidad sin crear turbulencia. Su función es acelerar la velocidad del flujo manteniéndolo ordenado y uniforme para posteriormente llegar a la cámara de ensayos.
- **Sección de prueba o cámara de ensayo:** Es la parte más importante del túnel. Es dónde vamos a colocar el objeto que queremos estudiar y también dónde haremos las mediciones. Es muy importante que el flujo que la atreviese sea lo más uniforme posible ya que tener turbulencias en esa zona falsearía los datos obtenidos y el viento no se comportaría como debería hacerlo sobre el objeto [10].

Las secciones de ensayos pueden ser de dos tipos:

- **Sección abierta:** La cámara de ensayo comunica por alguno de sus límites o por todos ellos con el exterior. (Figura 1.11).

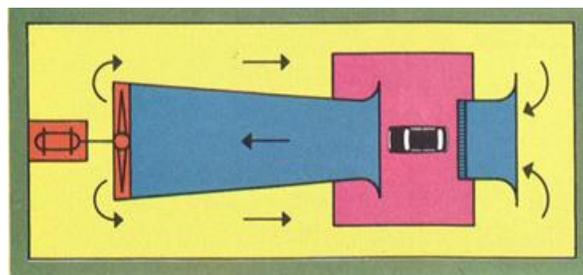


Figura 1. 11 Túnel de viento cámara abierta. Fuente [12]

- **Sección cerrada:** La sección de test posee paredes sólidas que la aíslan al flujo fluido del exterior durante el ensayo. (Figura 1.12).

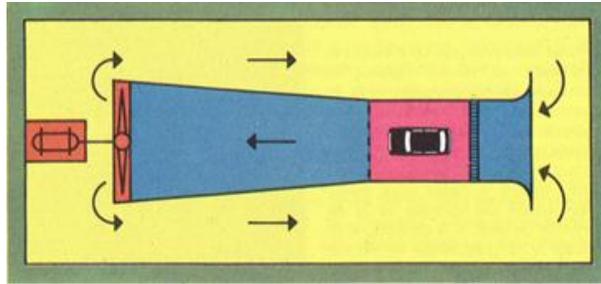


Figura 1. 12 Túnel de viento cámara cerrada. Fuente [12]

La sección cerrada es la configuración de cámara de ensayo más común. Sin embargo, en los últimos diseños se contempla la posibilidad de dotar a los túneles de viento de infraestructuras que permitan ambas configuraciones, consiguiendo así mayor polivalencia de cara al desarrollo de diferentes clases de test [11].

- **Suelo:** Es un elemento importantísimo del túnel si lo vamos a usar para ensayar vehículos con ruedas o elementos estáticos. Los existentes son rodantes y estáticos. Los rodantes serán mucho más precisos ya que se parecen más a la realidad dependiendo si son para analizar la aerodinámica de vehículos.
- **Difusor:** Una vez el aire ya ha salido de la cámara de ensayos, el difusor reduce la velocidad del flujo mediante su perfil divergente. Nos interesa que el aire salga a la menor velocidad posible ya que la velocidad de salida irá relacionada con las pérdidas energéticas del túnel. A menor velocidad, menores son las pérdidas.
- **Sección del mecanismo impulsor o ventilador:** La sección del mecanismo impulsor proporciona la fuerza que hace al aire moverse a través del túnel de viento. Normalmente llevan aparatos electrónicos para poder variar la velocidad y así realizar ensayos bajo las condiciones deseadas por los ingenieros. Los mecanismos de generación del flujo pueden ser tanto soplados como aspirado dependiendo de la disposición de los ventiladores dentro del túnel. Un túnel de

soplado es el que tiene el grupo de ventiladores antes de la cámara de ensayos y el aspirado lo tiene situado después de la cámara de ensayos. Las dos configuraciones tienen ventajas e inconvenientes, una vez más dependerá del uso que queramos darle. El túnel soplado proporciona más velocidad que el aspirado pero produce menos uniformidad en el flujo. Normalmente, los más utilizados son los de aspiración por ser el flujo más regular y uniforme y produce mejores resultados en los ensayos [9].

1.1.2.2 Clasificación Túnel de viento.

Los túneles de viento pueden ser clasificados de diferentes modos, según múltiples criterios, teniendo en cuenta sus diversas características. Sin embargo hay dos parámetros que definen este tipo de instalaciones por encima de los demás: rango de velocidades de operación y topología física [11].

1.1.2.2.1 Rango De Velocidades De Operación

Para la clasificación de según el rango de velocidades debemos entender primeramente los términos de velocidad según la velocidad del sonido, a continuación una breve reseña acerca del tema que estamos hablando.

Número de Mach.

Uno de los parámetros más importantes de los flujos unidimensionales que se presentan en el análisis de flujo compresible, es el número de Mach, M , el cual es la relación de la velocidad local del flujo a la velocidad local del sonido dentro del fluido, o sea $M = V/c$, donde V es la velocidad local, y c la velocidad del sonido. El número de Mach es una de las medidas de la importancia que tienen en un flujo determinado, los efectos de la compresibilidad. En el sentido de fuerzas, el número de Mach es la relación existente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas originadas por la

compresibilidad del fluido. El número de Mach es un término constantemente utilizado por los ingenieros aerodinámicos, para tratar el movimiento de los fluidos sobre los objetos.

El número de Mach recibió ese nombre en honor a Ernst Mach (1838 -1916), quien condujo los primeros experimentos significativos relacionados con el vuelo supersónico en la universidad de Praga, Alemania.

Regímenes de flujo según Mach:

Teniendo como base el número de Mach se definen generalmente cinco regímenes de flujo, en la siguiente forma:

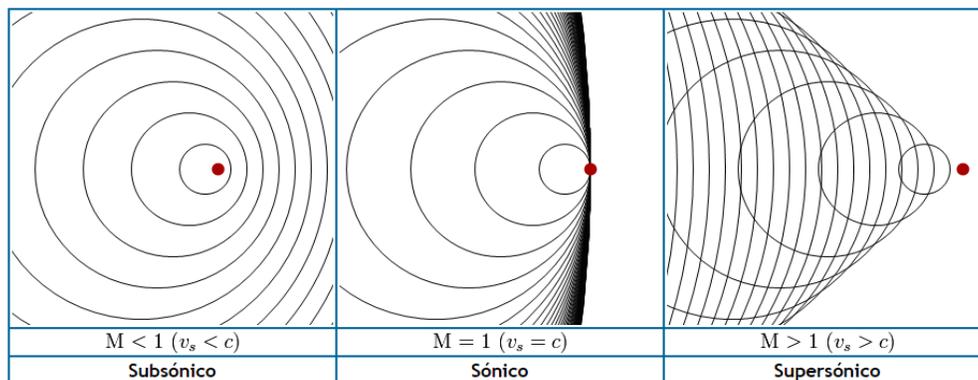


Figura 1. 13 Regímenes Numero de Mach. Fuente [15]

- **Régimen incompresible:** El número de Mach es pequeño en comparación con la unidad (aproximadamente 0.2 en un gas perfecto). En esta clasificación, los efectos de compresibilidad se consideran, generalmente insignificantes.
- **Régimen subsónico:** El número de Mach es inferior a la unidad, pero tiene una magnitud suficiente para quedar fuera de la clasificación del régimen de un flujo incompresible (Figura 1.13 Izquierda).

- **Régimen transónico:** El número de Mach es muy cercano a uno, es decir varía de valores ligeramente menores a la unidad y escasamente superiores a ella.
- **Régimen sónico:** El número de Mach es uno (Figura 1.13 Centro).
- **Régimen supersónico:** Es donde el número de Mach es superior a la unidad (Figura 1.13 Derecha).
- **Régimen hipersónico:** Es cuando el número de Mach es muy superior a la unidad.

Sin embargo, un avión que viaja con una velocidad de entre Mach 0.75 y Mach 1.20 tiene áreas en su superficie que experimentan ambos tipos de flujo: subsónico y supersónico; los ingenieros aerodinámicos se refieren a este régimen de vuelo (o escala de velocidades) con el nombre de régimen transónico. Los cálculos del flujo del aire en esta área deben hacerse muy cuidadosamente.

Como se mide Mach:

Sea un objeto diminuto se desplaza en el aire a una velocidad $V < c$; el movimiento del objeto crea perturbaciones de presión, las cuales se propagan esféricamente hacia el exterior a partir del objeto, con una velocidad del sonido c . Si el objeto no estuviera en movimiento, los frentes de onda se extenderían esféricamente, y tendría las posiciones que se ilustran a continuación, en intervalos sucesivos de tiempo.

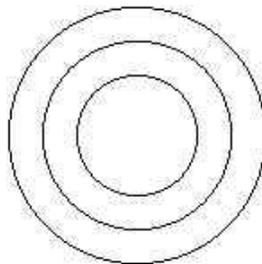


Figura 1. 14 Frentes de onda se extenderían esféricamente si el objeto está estático. Fuente [13]

Los frentes de onda emergen para formar un frente plano y el fluido que está delante de este frente no recibe ningún efecto del movimiento de la partícula. Si por algún motivo la velocidad local es mayor que la velocidad del sonido, las pulsaciones individuales se combinan para formar un patrón cónico, como se ilustra a continuación:

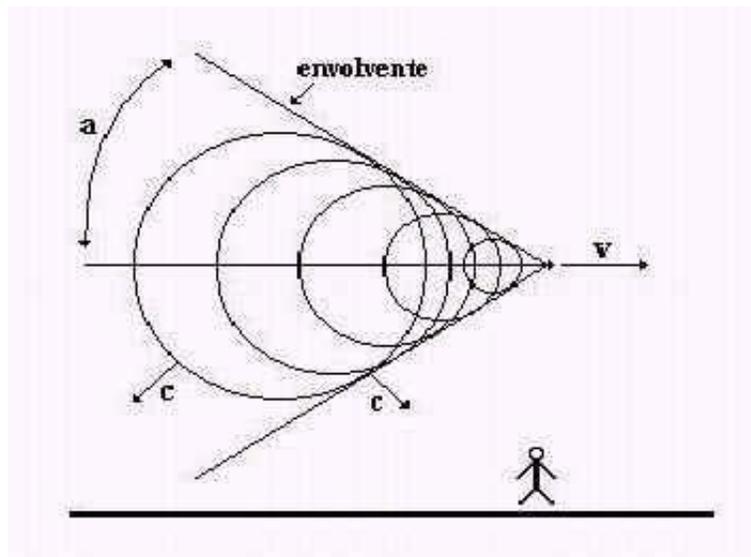


Figura 1. 15 Patrón Cónico. Fuente [13]

A este patrón se le conoce con el nombre de cono de Mach. El fluido que está por delante del cono, no tiene ninguna perturbación, pero repentinamente sufre cambios de presión, temperatura y densidad, conforme atraviesa el cono de Mach. Cuando un flujo atraviesa cambios repentinos al atravesar una onda, a esta última se le denomina onda de choque. Se ha logrado hacer visibles los gradientes de densidad en un flujo, utilizando un sistema óptico fotográfico, conocido con el nombre de aparato de Schlieren. Para esto el modelo se debe montar en un túnel de viento o aerodinámico, para que las ondas de choque sean claramente visibles [13] [14].

Donde el número de Mach se calcula como $M = V/c$

Teniendo en cuenta ya lo que es Número de Mach entonces la velocidad del flujo a su paso por la sección de test, los túneles de viento pueden clasificarse como:

Tabla 1. 1 Rango de Velocidades de Operación de Túnel de Viento. Fuente [16]

TIPO	VELOCIDAD ÓPTIMA
De baja velocidad	$M < 0.6$
Subsónicos	$0.6 < M < 0.85$
Transónicos	$0.85 < M < 1.2$
Supersónicos	$1.2 < M < 5$
Hipersónicos	$5 < M$

Según [16], alcanzando regímenes mayores a 0.85 Mach, las ondas de choque perturban considerablemente el flujo, volviéndose mucho más complicado el estudio aerodinámico en túneles de viento y la obtención de resultados significativos. Las características de diseño de la infraestructura quedan también afectadas por esa misma causa, resultando mucho más complejas que para instalaciones subsónicas o de baja velocidad.

1.1.2.2.2 Topología Física.

Dos parámetros son considerados en la clasificación de túneles de viento por su topología física, según [17]: tipo de retorno y configuración de la cámara de ensayo.

1.1.2.2.2.1 Según Tipo de Retorno

Circuito abierto: El flujo de aire que circula por su interior describe una trayectoria recta; penetra en el circuito desde el exterior a través de la sección de entrada, que suele albergar la zona de acondicionamiento de flujo. Llega al cono de contracción donde pierde presión y gana velocidad, entrando posteriormente en la cámara de ensayo. A continuación, circula a través del difusor y la sección del propulsor, para regresar finalmente al exterior por medio de la sección de salida.

Sus principales ventajas son:

- Costes de construcción menores que instalaciones de circuito cerrado.

- Posibilidad de utilizar técnicas de visualización de flujo con humo, sin inconvenientes, debido al origen y destino externo del aire.

Sus mayores desventajas radican en:

- Necesidad de mayor acondicionamiento de flujo. Dicho flujo está fuertemente influido por el entorno en el que está instalada la infraestructura.
- Mayor consumo de energía para tasas de operaciones elevadas.
- Fuente importante de contaminación acústica, lo que puede limitar las horas de operación del túnel o conllevar costosos procesos de insonorización.

Circuito cerrado: El flujo fluido describe en su movimiento una trayectoria cerrada por el interior del túnel, recirculando de forma continua por el circuito de retorno, con poco o ningún contacto con el exterior.

Las instalaciones de este tipo tienen como ventajas:

- Mayor control de la calidad del flujo en el interior del circuito. Poca o ninguna influencia del entorno de la instalación en el fluido.
- Menor consumo de energía debido al continuo recircular del flujo por su interior. Este factor resulta particularmente beneficioso para tasas de operación elevadas.
- Generación de menor contaminación acústica.

Sus inconvenientes principales son:

- Mayor coste inicial, debido fundamentalmente a la mayor necesidad de infraestructura.
- Complejidad de diseño para posibilitar la utilización de técnicas de visualización determinadas (mediante humo, pintura, etc.) o la operación de motores de combustión interna.

- Necesidad de dispositivos de refrigeración o intercambiadores de calor para instalaciones con tasas de operación elevadas.

1.1.2.2.2 Según configuración de la cámara de ensayo

Sección abierta: La cámara de ensayo comunica por alguno de sus límites o por todos ellos con el exterior.

Sección cerrada: La sección de test posee paredes sólidas que la aíslan al flujo fluido del exterior durante el ensayo.

Según el tipo de retorno y la configuración de sección de test que posea una instalación en concreto, se clasifica los túneles de viento por su topología física como:

Tabla 1. 2 Tipo de túnel de viento según su topología física. Fuente [11]

Config.Secc.Test/Retorno	Circuito Abierto	Circuito Cerrado
Sección abierta	Tipo Eiffel	Tipo Prandtl
Sección cerrada	Tipo NPL	Tipo Göttingen

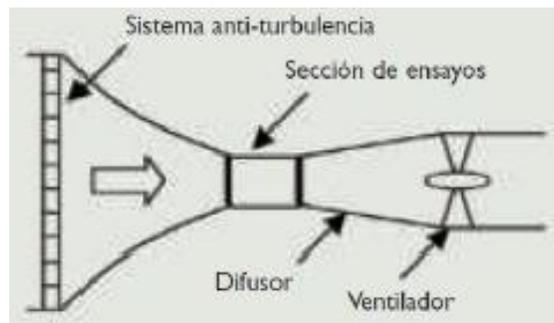


Figura 1. 16 Circuito abierto con cámara de ensayos cerrada (Tipo NPL). Fuente [18]

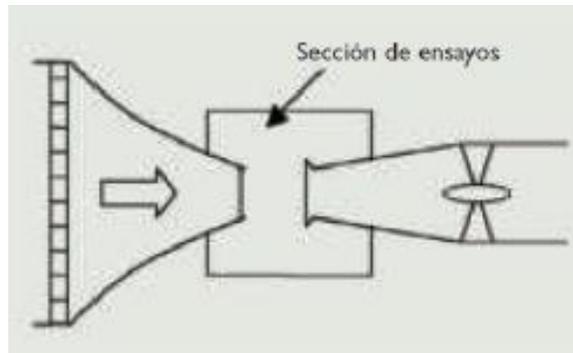


Figura 1. 17 Circuito abierto con sección de ensayos abierta (Tipo Eiffel). Fuente [18]

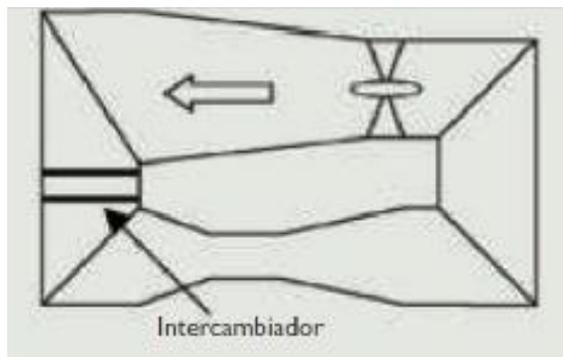


Figura 1. 18 Circuito cerrado con sección de ensayos cerrada (Tipo Göttingen). Fuente [18]

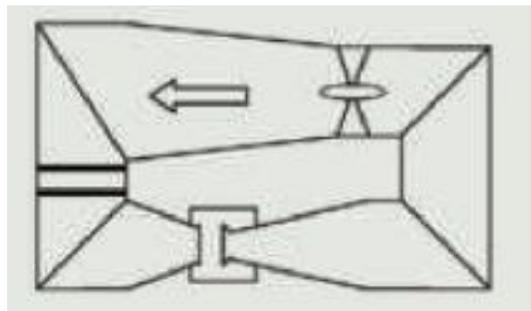


Figura 1. 19 Circuito cerrado con sección de ensayos abierta (Tipo Prandtl). Fuente [18]

1.1.3 ANSYS Fluent

El software ANSYS FLUENT (es un software de simulación ingenieril, desarrollado para funcionar bajo la teoría de elemento finito para estructuras y volúmenes finitos para fluidos [1] [19] [20]) es un software que contiene amplias capacidades de modelado físico

necesario para modelar el flujo, la turbulencia, la transferencia de calor, y las reacciones de las aplicaciones industriales que van desde el flujo de aire sobre el ala de un avión a la combustión en un horno, de columnas de burbujas a las plataformas petroleras, desde el flujo sanguíneo a los semiconductores, fabricación y diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Hay modelos especiales que le dan al software la capacidad de modelar en el cilindro de combustión, aeroacústica, turbomaquinaria y sistemas multifásicos que han servido para ampliar su alcance.

1.1.3.1 ANSYS Fluent CFD.

Entender el movimiento de líquidos y gases es crucial en muchas ramas de la ingeniería. Hasta hace poco, los estudios de fluidos en movimiento fueron confinados al laboratorio, pero con el rápido crecimiento de la capacidad de procesamiento de la computadora personal, aplicaciones de software ahora traen análisis y soluciones de problemas de flujo en el escritorio numérico. Además, el uso de interfaces comunes y procesos de flujo de trabajo hacen la dinámica de fluidos accesible a los diseñadores, así como los analistas.

Dinámica de Fluidos Computacional

(CFD) se ha convertido en una parte integral del entorno de diseño de ingeniería y análisis de las muchas empresas que requieren la capacidad de predecir el comportamiento de los nuevos diseños o procesos antes de que sean fabricados o implementados. Soluciones de ANSYS CFD, Inc. se basan en la tecnología probada de software ANSYS CFX.

La dinámica de fluidos se utiliza en industrias como la aeroespacial, automotriz, procesos químicos, la generación de electricidad, calefacción, ventilación, aire acondicionado, biomédica, petróleo y gas, marinos y muchos otros. Desde la comodidad de ventilación en grandes edificios a la escala más pequeña en micro-bombas y la nanotecnología, una amplia gama de problemas puede ser abordada debido a la naturaleza escalable de dinámica de fluidos. Experiencia en la asistencia a las empresas a aumentar el rendimiento a través del diseño de simulación impulsada por bombas, ventiladores, turbinas, compresores y otra

maquinaria de rotación se ha incorporado en todos los elementos del software ANSYS CFX, por lo que es un líder en este campo exigente. Modelos especializados para la combustión, que reaccionan los flujos y la radiación, entre otros, ayudan a proporcionar el conocimiento de los equipos y procesos necesarios para aumentar la producción, mejorar la longevidad y disminuir los residuos [21].

1.1.3.2 Parametrización de ANSYS Fluent

La creación de geometría, mallado, definición física, solución y post-procesamiento para CFD son los aspectos a describir a continuación.

1.1.3.2.1 Geometría

ANSYS Fluent tiene a DesignModeler que es una herramienta de geometría diseñada específicamente para la creación y modificación de la geometría para el análisis. El uso de un sistema avanzado de interfaces, el software DesignModeler proporciona un vínculo directo y bidireccional con los modelos geométricos creados en una amplia variedad de paquetes de CAD existentes y es en sí misma una herramienta de CAD fácil de usar, totalmente paramétrico. A medida que el portal de la geometría para todos los productos de ANSYS, el software DesignModeler proporciona una única fuente geometría para una gama completa de herramientas de simulación de ingeniería. El software DesignModeler ayudará a crear la geometría detallada necesaria para la simulación de ingeniería, minimizar las revisiones geometría y simplificar los análisis interdisciplinarios.

1.1.3.2.2 Mallado

Para proporcionar resultados precisos CFD requiere tecnología de mallado bajo, medio y superior, para eso existen dos opciones para los requisitos de mallado CFD dentro de la solución, los productos MeshTM y ICEM, el tamaño de mallado es importante para obtener un buen resultado, por tal razón se necesita que el refinado de la malla sea el idóneo en el área de estudio dependiendo de la precisión y la capacidad computacional del computador.

1.1.3.2.3 CFD Pre-Procesamiento

El módulo PreTM es una interfaz moderna, coherente e intuitiva para la definición de la compleja física a veces necesario para un análisis CFD. Además, esta herramienta lee uno o más mallas de una variedad de fuentes y proporciona al usuario con opciones para la asignación de dominios, [1] así como las condiciones de contorno deben ser las precisas y considerar todo aspecto que influirá en los resultados, las condiciones de contorno pueden ser considerados como las entradas, salidas, perfiles y diferentes tipos de aristas.

1.1.3.2.4 CFD Solver

El corazón de avanzada CFD en la interfaz de ANSYS Workbench es el solucionador multigrad algebraica CFX acoplado. En pocas palabras, se logra la convergencia fiable y rápido resolviendo así las ecuaciones. El solucionador es totalmente escalable alcanzar de aumento lineal en el tiempo de la CPU con el tamaño del problema, es fácil de configurar en ambos encontronazos modos serie y paralelo y es representativa de la física verdadera. El Solver ManagerTM proporciona información sobre el progreso de convergencia, permite la visualización dinámica de muchos criterios y, cuando sea necesario, los parámetros se pueden ajustar sin detener el solucionador de modo convergencia se puede acelerar. El solucionador ANSYS® CFX® se ejecuta en el modo de alta precisión por defecto, lograr predicciones precisas del flujo robusta y fiable.

1.1.3.2.5 Modelos interoperables

La fidelidad y capacidad de la simulación está vinculado directamente a la elección de los modelos físicos disponibles. El software ANSYS CFX contiene un gran número de modelos físicos para proporcionar una simulación precisa para una amplia variedad de aplicaciones industriales. Debido a que casi todos los modelos físicos interoperar entre sí y en relación con todos los tipos de elementos, a través de todos los tipos de conexión de interfaz de la red, utilizando el solucionador de multigrad acoplada, en paralelo, con los

valores numéricos precisos, la capacidad de obtener una solución precisa es mucho mayor. Exclusivo de CFX es la capacidad de utilizar el esquema numérico exacto segundo orden por defecto, para ofrecer soluciones más precisas en una malla dada para cada simulación.

1.1.3.2.6 CFD Post-Procesamiento

CFD-Post, la poderosa herramienta de post-procesamiento de CFD, utiliza una interfaz de usuario intuitiva para representar resultados tanto gráficos como cuantitativos. Las potentes capacidades de visualización de CFD-Post pueden proporcionar rápidamente información sobre el comportamiento del campo de flujo con características como isosuperficies, rebanadas, vectores, parcelas de superficie, animaciones y líneas de corriente. La capacidad cuantitativa permite al usuario extraer fácilmente los valores de interés para el diseñador y analista que se puede utilizar para aumentar el rendimiento y obtener una mejor comprensión.

1.1.3.2.7 Paralelización

Al combinar los recursos de memoria y CPU de múltiples procesadores, paralelización permite al usuario reducir el tiempo de cálculo y realizar simulaciones más grandes. Todos los modelos físicos, características, modos y opciones de trabajo ANSYS CFD en paralelo, sin excepciones [21].

1.1.4 Datos Técnicos Ciudad de Estudio

Para la posterior realización de los ensayos en el túnel de viento y las debidas simulaciones en el programa de ANSYS Fluent debemos considerar las características de un entorno real en el que suponemos se encontrarían expuestas al flujo del viento los perfiles de techos, para esto consideramos hacerlo en la ciudad de Cuenca, el motivo se debe a que somos habitantes de la misma y estar ya relacionados al clima y condiciones de la ciudad.

Por tal razón en los ensayos prácticos y de simulación necesitamos datos de entrada que se asemejen a los datos en la vida real, a continuación se detallará de manera breve las características generales y climáticas de la ciudad de Cuenca.

También conocida como Santa Ana de los Ríos de Cuenca [42] está ubicada en un valle interandino de la sierra sur ecuatoriana, (441km al sur de Quito) a una altitud de 2535m sobre el nivel del mar. Goza de un clima típicamente templado, con una temperatura promedio de 17°C. Su población es de aproximadamente 400.000 habitantes y su superficie es de 15.730 hectáreas.

Los datos tomados como medida media son los siguientes, siendo estos temperatura, humedad, etc., para la ciudad de Cuenca.

Tabla 1. 3 Parámetros Climáticos de Cuenca-Ecuador. Fuente [43] [44]

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura máxima absoluta (°C)	26.7	26.1	27.2	24.4	25.0	25.0	22.8	25.6	25.0	27.2	27.2	27.2	27.2
Temperatura máxima media (°C)	20.6	21.1	20.6	20.6	19.4	18.9	18.3	18.9	20.6	21.1	21.7	21.7	20.3
Temperatura media (°C)	15.3	15.8	15.6	15.3	14.4	13.6	13.3	13.3	14.7	15.3	14.7	15.6	14.7
Temperatura mínima media (°C)	10.0	10.6	10.6	10.0	9.4	8.3	8.3	7.8	8.9	9.4	7.8	9.4	9.2
Temperatura mínima absoluta (°C)	3.3	2.8	3.9	1.1	0.0	-0.6	-1.7	-1.1	2.2	-0.6	-0.6	1.1	-1.7
Lluvias (mm)	67	85	107	109	77	68	53	47	56	73	69	67	878
Días de lluvias (≥ 0.1 mm)	20	21	22	19	15	11	10	10	12	16	13	10	179
Horas de sol	155	113	124	120	155	150	186	186	150	155	150	155	1799

Para las temperaturas consideramos las que son altas y por las tardes en las que el sol se encuentra radiando casi directamente ya que es cuando el viento en la ciudad tiene un mayor efecto al ser en estas horas donde su velocidad se nota a simple vista, por tal razón las temperaturas que se pueden usar se encuentran entre los rangos de 18°C a 22°C.

[45] La humedad relativa promedio en la ciudad oscila entre 41% y 83% anuales, percibiendo una humedad máxima en el mes de Abril y una mínima en el mes de Junio, resultando una humedad relativa media de 62% y una amplitud de 42%, por año.

Los vientos en la ciudad de Cuenca se observan que siguen la dirección sur – este y sur – oeste, durante todo el año, aspectos que son de gran importancia al momento de tomar decisiones de diseño para impacto del viento y bioclimatismo.

Tabla 1. 4 Promedio Anual Velocidad del Viento en Cuenca. Fuente [46]

		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
P. ANUAL	DIRECCIÓN %	5.33	8.92	0.17	17.67	14.00	16.17	0.17	5.00
	VELOCIDAD M/S	3.93	3.86	0.33	4.16	4.11	4.13	0.50	3.36

Como se ve los vientos predominantes van de dirección sureste y suroeste con una media de 4,16 m/s, pero para una condición mucho más extrema consideraremos velocidades máximas como las encontradas en la página web Meteocast [46]. Que registra velocidades máximas de entre 14-18 km/h equivalentes a 3.9-5 m/s, para esto sacamos una media entre estos rangos teniendo una velocidad máxima promedio de **4,5 m/s**, la que usaremos como modelo y mediante relaciones de escalamiento aplicar a los ensayos y simulaciones.

1.2 APLICACIÓN DE TÚNEL DE VIENTO

1.2.1 Inicios de Aplicación.

Como se dijo ya el Túnel de Viento es una instalación en la que se obtiene un flujo de aire rectilíneo y uniforme a una velocidad determinada en la cámara de ensayos. Para usos aeronáuticos ese flujo ha de tener una calidad que viene determinada por su uniformidad y nivel de turbulencia. En la cámara de ensayos del Túnel de viento, se sitúan objetos reales o maquetas de los mismos para observar el efecto real que el viento ejerce sobre ellos, de manera que puedan evaluarse o diseñarse soluciones que puedan ser necesarias.

A comienzos del siglo XX el hombre sintió la necesidad de experimentar, como un objeto sumergido en un fluido, puede estar sometido a diferentes presiones. Es el caso del ala de un avión que por tener una forma curva por arriba y casi plana por debajo, al ir aumentando

el movimiento de esta, la presión se va disminuyendo en la parte superior del ala, mientras que en la parte inferior va aumentando, lo cual hace que el avión se eleve.

Pero para analizar el comportamiento del flujo al rededor del avión, se podía tener en cuenta como los cálculos se realizan desde el marco inercial del aeroplano, siendo el aire el que se mueve (no el avión), teniendo presente que es para un caso en el cual el avión vuela en línea recta y velocidad constante.

De ahí que para observar el comportamiento del ala en vuelo basta con montar el ala en un laboratorio y soplar sobre ella una corriente de aire. De aquí salió el principio del Túnel de Viento, el cual es una caja con un ventilador que sopla aire hacia adentro (o mejor dicho, lo aspira hacia afuera, lo que produce un flujo más suave) dentro de esta caja se prueban las secciones alares.

Para el caso nuestro, el túnel de viento en si se utilizará para varios tipos de perfil referidos a techos de edificaciones siendo estos de diferentes geometrías, cuyo caso es el de obtener los resultados experimentales realizados en dicho túnel de viento y así poderlos comparar con los resultados a obtener en la modelación, utilizando los mismos datos de entrada para constatar las diferencias existentes en ambos casos y la confiabilidad de los métodos utilizados [22].

El túnel de viento en la actualidad es utilizado para una gran variedad de aplicaciones, como por ejemplo:

- Ensayos Aeronáuticos
- Ingeniería Automotriz
- Ingeniería Civil.
- Arquitectura.
- Energías Renovables.
- Entrenamiento Deportivo.

1.2.2 Túnel de Viento en Ingeniería Aeronáutica.

Las mejoras en la calidad del flujo en los túneles de viento, conseguidas gracias a la colocación de una rejilla de uniformización en la cámara de remanso, permiten la realización de ensayos aeronáuticos.

La denominada calidad aeronáutica se consigue gracias a la calidad del flujo y a la del sistema de medida de fuerzas. El tipo de balanza diseñado y la técnica de medida desarrollada, permiten asegurar una sensibilidad del sistema de 0,01 N, lo que permite, para un tamaño normal de maqueta, medir la resistencia aerodinámica de un modelo típico con un error menor de un cuánto.

Se han desarrollado soportes y técnicas de ensayos que permiten ensayar modelos bidimensionales, para ensayos de perfiles aerodinámicos, así como modelos de avión completo y medio modelo (Figura 1.20). Por tanto, se pueden hacer ensayos a escala 1:1 de los perfiles aeronáuticos a emplear, por ejemplo, y hacer ensayos sobre este tipo de aviones a escalas entre 1:1 y 1:3, dependiendo de que se emplee modelo de avión completo o medio avión [23].

En aeronáutica hay un concepto que es el de capa límite, que es la zona donde el movimiento del aire es perturbado por la presencia de un sólido en movimiento. En la superficie de este sólido se forma esta capa límite que puede fluir en régimen laminar o turbulento. La diferencia fundamental entre el régimen laminar y el turbulento estriba en que en el primero el flujo es estable y forma laminas delgadas y su movimiento es predecible. En régimen turbulento el movimiento es tridimensional, caótico e impredecible [24].

Se han tenido experiencia en ensayos de visualización para estudio de la capa límite, mediante técnica de pinturas. La técnica se ha puesto a punto durante los ensayos de evaluación del perfil aerodinámico del ala del proyecto PRONTAS (PROtotipo No Tripulado de Avión Solar).

La instrumentación disponible permite también medir la distribución de presiones, tanto en modelos bidimensionales como tridimensionales, así como medidas de caracterización de la estela. También se pueden realizar ensayos sobre modelos motorizados, tanto para la determinación de las características del propulsor, como la interferencia de éste sobre el modelo [23].



Figura 1. 20 Ensayo de Avión Completo. Fuente [25]

1.2.3 Túnel de Viento en Ingeniería Automotriz [10]

En el mundo de la automoción, a igualdad de potencia de motor, las mejoras aerodinámicas ayudan a correr más y ahorrar combustible. A la hora de reducir el consumo, una carrocería que penetre bien el aire influye un 50% más que el peso del vehículo y ese dato mejora hasta el 80% si las velocidades son altas. Por eso todas las marcas invierten mucho tiempo y más dinero en probar su tecnología en los túneles de viento.

Las mediciones de los distintos parámetros como velocidad, presiones y fuerzas que producen una gran cantidad de datos que tienen que interpretar los ingenieros, el inconveniente es que dichas medidas son puntuales y su representación a nivel global se hace muy compleja. La capacidad de cálculo de las computadoras actuales hace algo más sencilla la interpretación de los resultados pero no hay que fiarse de la computación y eso

es mucho hablar. Por tanto los ensayos y la comprobación de que esos datos coinciden con lo diseñado son muy necesarios.

Pero ¿cómo? Bien, realmente todos los datos de presión, fuerzas, etc. son producidos por la interacción de los flujos de aire en su tránsito por el vehículo. El estudio del movimiento de los fluidos, en general es un problema muy complejo. Las moléculas de un fluido, además de ejercer entre si acciones mutuas de gran importancia, pueden tener diferentes velocidades y estar sujetas a distintas aceleraciones. Por esta razón es necesario tener en cuenta conceptos adicionales al aplicar las leyes de la dinámica a los fluidos en movimiento y uno de ellos es su interacción con la superficie del vehículo y para poder ver ese tránsito son necesarias unas técnicas que ayudan a poder interpretarlos, son las conocidas líneas de corriente.

El aire debe tener unas características, las llamadas variables físicas (temperatura, presión, densidad) que hay que tener en cuenta a la hora de hacer los ensayos, por ejemplo, no es lo mismo el aire a nivel del mar donde su presión, densidad son mayores que por ejemplo a 800 msnm donde esas medidas son menores ya que la atmósfera es menos densa por la acción de la altura. Por tanto es importante tener en cuenta esas variables físicas a la hora de hacer los ensayos.

Centrándose en el aspecto aerodinámico se ve que en el aire hay moléculas que están en movimiento y que irán más o menos rápidas dependiendo de la velocidad del vehículo. Si se pudiera ver esas moléculas se vería que cada una llevan una trayectoria definida y esas trayectorias es a lo que se le llama “líneas de corriente”. Por tanto una línea de corriente es una línea continua trazada a través de un fluido e indica la dirección que lleva el fluido en movimiento en cada punto del fluido.

Para observar los flujos y determinar las líneas de corriente hay varios métodos para hacer visible el aire aunque los más utilizados son el humo (Figura 1.21), las partículas en suspensión, colocar hilos en la superficie del modelo, este último método visto en las pruebas de los coches en pista. A veces, hay comportamientos del aire como los vórtices

que son difíciles de apreciar por el ojo del ser humano o simplemente no tenemos tiempo suficiente para fijarnos en todo. Por esta razón normalmente se graba o fotografía el ensayo en alta calidad para a posteriori poder estudiarlo las veces que sea necesario.

Para ver de forma básica su interpretación. Cuando un coche acelera subiendo y bajando una colina y frena para tomar una curva complicada, el flujo de aire alrededor del mismo no se mantiene estable y se desvincula del vehículo. Esta separación aerodinámica crea un arrastre adicional que frena el coche y fuerza al motor a trabajar más. El mismo fenómeno afecta a aeronaves, botes, submarinos e incluso pelotas de golf. Para reducir los arrastres nos interesa ver por donde circulan los flujos, que caminos trazan y de qué forma. Además, a través de ellas se puede determinar si el flujo es laminar o es turbulento y también si está adherido a la superficie o no (capa límite) [24].



Figura 1. 21 Clara ruptura de Flujo Laminar. Fuente [10]

1.2.4 Túnel de Viento en Ingeniería Civil.

Los ensayos que pueden ser desarrollados en el campo de la Ingeniería Civil son muy variados, por lo que se limitara a citar los más relevantes. Entre ellos cabe destacar la importancia que tiene la determinación de cargas estáticas y dinámicas del viento sobre puentes (Figura 1.22) y otras estructuras civiles singulares. Estas cargas pueden ser muy importantes a la hora de dimensionar su estructura, ya que las cargas que se deducen de las

normas pueden no ser válidas, por exceso o por defecto, cuando se quiere hacer un diseño muy ajustado.

Otro tipo de estudios abarcados en este campo es la determinación de cargas del viento sobre vehículos terrestres y el estudio de dispositivos en las infraestructuras para reducirlos. Ambos tipos de estudios son muy importantes para mejorar la seguridad en las infraestructuras terrestres, ya que es bien conocido que el efecto del viento sobre los vehículos por ejemplo en los puentes o sobre barrancos después de una cortada son es la causa de muchos accidentes de tráfico.

Un caso similar al anterior es el estudio del efecto del viento dentro de muelles, aeropuertos, etc., dónde pueden llegar a producirse ráfagas perjudiciales. Esto es perfectamente evitable ensayando previamente los diseños en un túnel aerodinámico, asegurando de este modo que los proyectos son viables y adecuados, y evitando una posterior remodelación de los mismos con el considerable incremento de presupuesto que esto supondría.

Por último, y aunque existen más aplicaciones dentro de la Ingeniería Civil, se encuentran los estudios de dispersión de contaminantes sólidos o gaseosos. En este caso, la experimentación con modelos a escala puede ser de gran ayuda para estudios de impacto ambiental [23].



Figura 1. 22 Puente en Túnel de viento. Fuente [26]

1.2.5 Túnel de Viento en Arquitectura

En Arquitectura, los ensayos que se pueden realizar en un túnel de viento pueden ser enfocados de dos formas diferentes. Por una parte encaminados al cálculo de las cargas ejercidas por el viento, y por otro a la investigación de modelos bioclimáticos (Figura 1.23).

Debido a la ligereza de las estructuras arquitectónicas modernas, cada día se demanda más un conocimiento exhaustivo de las cargas, con lo que la medida de las cargas de viento sobre edificios y otros elementos arquitectónicos (cubiertas, vallas, esculturas, etc.) en el túnel, ayudaría de una forma importante a minimizar la estructura necesaria.

También es importante la determinación de los efectos locales del viento sobre edificios concretos y el estudio de posibles soluciones cuando estos generen problemas, ya sean de cargas o acústicos. Los edificios que se encuentran situados en zonas ventosas pueden presentar problemas locales de cargas de viento, que pueden provocar por una parte la caída de recubrimientos, o por otro lado silbidos o corrientes excesivas, perjudiciales para la confortabilidad de las viviendas.

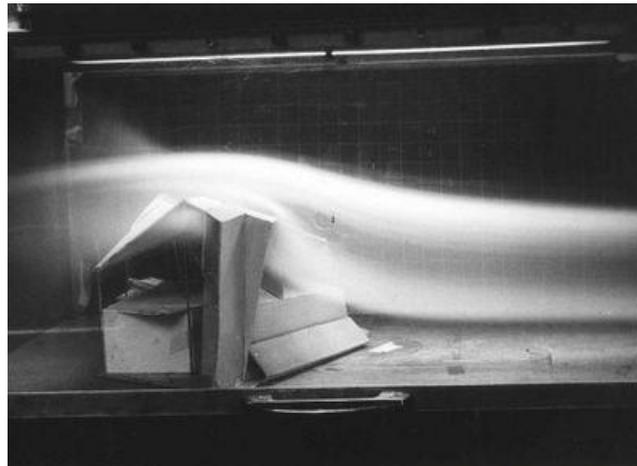


Figura 1. 23 Modelo de la Hospedería del Errante en Túnel de Viento. Fuente [27]

Además, es fundamental la determinación de los efectos del viento en zonas abiertas, entradas de edificios, etc. y la evaluación del efecto de barreras cortavientos para resolver problemas locales; en este caso se trata de estudiar la mejor orientación de los edificios para

minimizar el efecto del viento en su entrada y zonas de recreo o, en su defecto, ayudar al diseño de barreras cortavientos, naturales o artificiales, que minimicen su efecto en áreas determinadas.

Por último y en lo que se refiere al bioclimatismo, se pueden hacer estudios y evaluaciones de sistemas de ventilación natural, siendo este un aspecto muy importante para reducir costes de mantenimiento en viviendas, por el ahorro energético que supone [23].

1.2.6 Túnel de Viento en Energías Renovables.

En lo que respecta a las Energías Renovables, un túnel puede ser utilizado para el desarrollo de componentes de aerogeneradores, así como para el estudio de cargas sobre los mismos y la calibración de anemómetros. También es importante para el estudio de sombras en parques eólicos y poder conocer cuál es la posición óptima de las turbinas en función de los vientos dominantes en la zona (Figura 1.24) o la orografía del terreno, de manera que pueda aprovecharse de la mejor forma el suelo disponible. Este es un aspecto de suma importancia ya que normalmente el espacio del que se dispone para la instalación de parques eólicos suele estar bastante limitado, a pesar de que esta actividad es perfectamente compatible con otro tipo de actividades como agricultura, ganadería o industria, en los mismos terrenos.

Por otra parte, la investigación en el campo de la Energía Fotovoltaica está especialmente dirigida al abaratamiento de costes mediante los sistemas de concentración. La estructura de seguimiento del concentrador fotovoltaico parabólico presenta características muy distintas a las de panel plano. En los sistemas de concentración, las estructuras no sólo deben soportar cargas máximas sin sufrir daño (rotura o deformación permanente) sino que deben asegurar que bajo las cargas corrientes la estructura sufre niveles de deformación compatibles con el alineamiento de los elementos ópticos y los receptores. Todo esto hace que actualmente estas estructuras de concentración sean de considerables dimensiones, en parte por el peso que tienen que soportar, pero principalmente porque deben resistir las cargas de viento a las que se ven sometidas, lo cual incide directamente en el coste de las mismas.

Se hace por tanto necesaria la realización de ensayos en túnel aerodinámico con el fin de diseñar y estudiar una alternativa para la estructura de seguimiento de manera que los esfuerzos a los que se vea sometida por efecto del viento sean menores, consiguiéndose estructuras más ligeras y que conlleven por tanto un menor coste de producción [23].



Figura 1. 24 Emplazamiento Eólico en Túnel de Viento. Fuente [28]

1.2.7 Túnel de Viento en Entrenamiento Deportivo.

La mejora del rendimiento deportivo depende en gran manera de la capacidad para minimizar la resistencia aerodinámica. Este aspecto es muy importante en diferentes deportes, ya sean estos de pelota o distintas especialidades de atletismo, el ciclismo, esquí, etc.

La mejor técnica para conseguir conocer y minimizar dicha resistencia son los ensayos en túnel de viento. Estos ensayos permiten la simulación prácticamente total de todas las variables que influyen en la práctica del deporte, con lo que se convierte en un instrumento sumamente eficaz para la mejora de la técnica [23].



Figura 1. 25 Pruebas de Ciclismo en Túnel de viento. Fuente [29]

1.3 APLICACIÓN DE ANSYS FLUENT

1.3.1 Antecedentes.

Al observar nuestro alrededor es posible contemplar multitud de fenómenos asociados a los fluidos y a las leyes que los rigen. Van desde el vuelo de un ave hasta el agua que fluye por una tubería, desde la aerodinámica de un carro de fórmula uno hasta la fricción del traje de baño de un nadador, desde las emisiones de contaminantes por parte de industrias hasta el comportamiento atmosférico del aire. A partir de la curiosidad y necesidad de comprender el trasfondo del comportamiento de los fluidos, los científicos plantearon formulaciones para su estudio utilizando las matemáticas.

La dinámica de fluidos computacional proporciona información cualitativa y cuantitativa de la predicción del flujo de fluido por medio de la solución de las ecuaciones fundamentales usando métodos numéricos.

La CFD permite a los científicos e ingenieros desarrollar “experimentos numéricos” (simulaciones computacionales) en un “laboratorio virtual” (computador). Estos experimentos permiten predecir comportamientos y conocer datos de las variables involucradas en el proceso. Por ejemplo, un diseñador requiere conocer el comportamiento

aerodinámico del ala de un avión (datos de velocidades, presiones y fuerzas alrededor del ala). Con la herramienta CFD se puede “montar” un experimento virtual que permita conocer en detalle el valor y comportamiento de las variables necesarias en un determinado escenario. La información generada es importante y clave para comprobar el diseño y mejorar la eficiencia y comportamiento del ala [30].

1.3.2 Aplicaciones.

En la actualidad son múltiples los campos a los que se aplican la dinámica de fluidos computacional.

La industria del automóvil es uno de estos campos, donde, por ejemplo, se puede simular el comportamiento aerodinámico del coche, de hecho las escuderías de fórmula 1 uno emplean este tipo de software para mejorar el rendimiento de sus coches. También en el ámbito deportivo cabe destacar el uso en estudios aerodinámicos en el ciclismo (Figura 1.26), de diseño de embarcaciones e incluso en diseño de ropa de baño de alta competición [30].

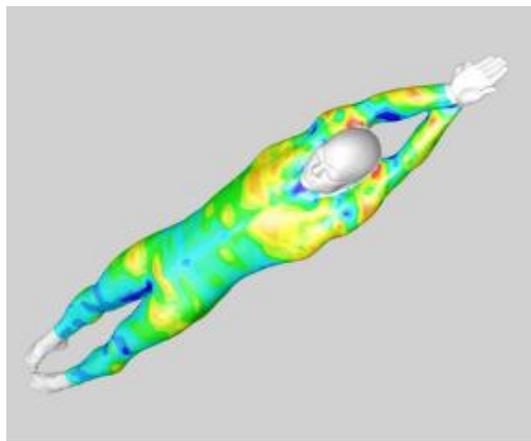


Figura 1. 26 Resultados de simulación CFD a un nadador (Presiones). Fuente [19]

Otro campo de actuación es la ingeniería medioambiental. Los problemas que aborda en este ámbito son la dispersión de contaminantes en diferentes entornos: ciudades, dentro de

calles, en complejos industriales. Para ello también calculan los campos de viento y otras variables atmosféricas que caracterizan las distintas situaciones. Incluso se han empleado en situaciones biomédicas donde se ha simulado el flujo sanguíneo por las arterias. Otros problemas a los que son aplicables son a procesos donde se produzcan reacciones químicas como puede ser la combustión en un horno o situaciones de intercambio de masa y calor. Y así se podría seguir enumerando el amplio espectro de campos en los que los software de CFD son de gran utilidad. La figura 1.27 muestra el comportamiento de las corriente de viento convectivo que se forman en el Valle de Aburra (Medellín, Colombia) [30].

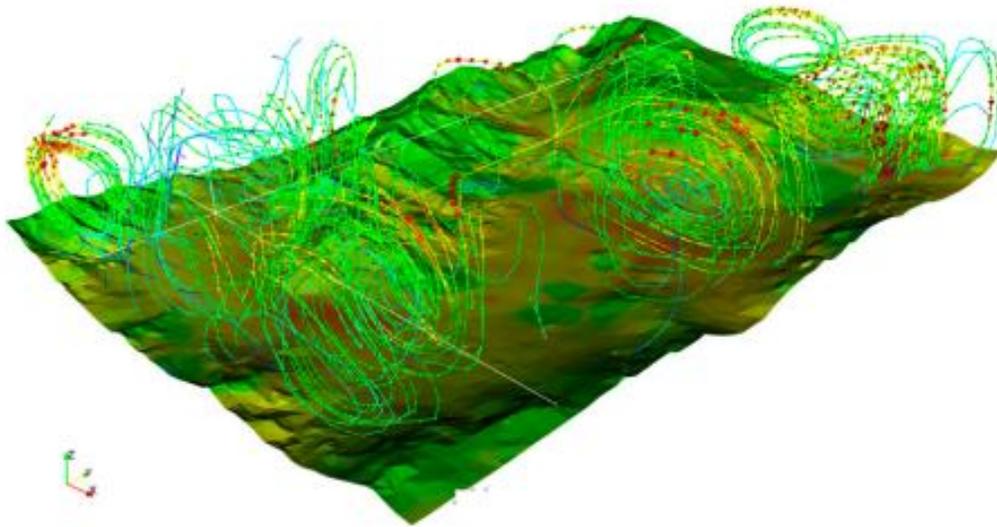


Figura 1. 27 Vientos convectivos sobre el Valle de Aburrá. Fuente [31]

Usando los modelos CFD es posible construir un modelo computacional que represente un sistema o equipo que se quiera estudiar. Después se especifican las condiciones físicas y químicas del fluido al prototipo virtual y el software entregará la predicción de la dinámica del fluido. Por lo tanto, CFD es una técnica de diseño y análisis implementada en el computador. La herramienta CFD ofrece la capacidad de simular flujos de gases, líquidos, transferencia de masa y calor, cuerpos en movimiento, física multi-fases, reacciones químicas, interacción fluido-estructura y acústica a través de la modelación en el computador [30].

Con las herramientas propias de ANSYS describiremos propiamente la simulación en los siguientes aspectos:

- **Multifase:** Permite la simulación de múltiples corrientes de fluido, burbujas, gotas y los flujos de superficie libre. El modelo de transporte de partículas permite que la solución de una o más fases de partículas discretas dentro de una fase continua. Rastreo de partículas transitoria permite la simulación de extinción de incendios, la sedimentación de partículas y deposición por pulverización. La fragmentación de partícula secundario ruptura modelos de captura de gotitas bajo la acción de fuerzas externas.
- **Turbulencia:** La mayoría de los flujos industriales son turbulentos. Una variedad de modelos bien establecidos están disponibles como se mejora k- ϵ y SST que incluye el modelo de función de pared escalable que asegura precisión de la solución con el refinamiento de la malla.
- **Transferencia de Calor:** Optimización de la transferencia de calor entre fluidos y sólidos es fundamental en muchos tipos de equipos industriales, incluyendo la transferencia de calor conjugada para el cálculo de la conducción térmica a través de materiales sólidos.
- **Radiación:** Una amplia clase de modelos transferencia de calor radiante, de transparente a participar medios no grises, están disponibles e incluyen aplicaciones tales como la combustión, calefacción y ventilación y la radiación a través de materiales sólidos, entre otros.
- **Mesh móvil:** Cuando simulaciones de fluidos implican cambios en la geometría (por ejemplo, dispositivos tales como compresores de tornillo, bombas de engranajes, bombas de sangre y motores de combustión interna), se pueden requerir de malla en movimiento. Malla estrategias de movimiento cubren casi todas las necesidades de movimiento de malla concebible [21].

- **Combustión:** Todas las especies se resuelven como un solo sistema acoplado, aceleración de la convergencia especialmente para mecanismos de reacción complejas.

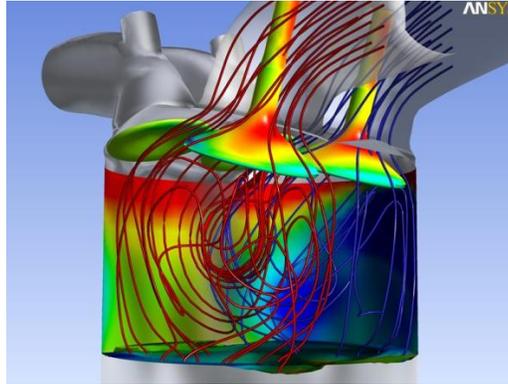


Figura 1. 28 Motor de combustión interna modelado utilizando ANSYS FLUENT. Fuente [21]

Aunque las posibilidades de aplicación de la CFD a distintos procesos son enormes. Algunos ejemplos son:

- Sistemas de calefacción, ventilación, climatización y refrigeración
- Aeroespacial/Defensa: perfiles de alas, misiles y estudios de aerodinámica externa
- Industria agroalimentaria: procesado y envasado de alimentos, diseño de equipos
- Industria automoción: aerodinámica, combustión en motores, componentes
- Energía: petróleo, gas, nuclear, generación eléctrica, turbomaquinaria, células de combustible
- Industria química: combustión, filtración, mezcla, separadores, reactores
- Industria electrónica: semiconductores, enfriamiento de elementos
- Industria biomédica.
- Industria naval.
- Industrias del metal.
- Industria deportiva: automovilismo, vela, estadios.
- Medio ambiente.
- Control de polvos [30].

1.4 ESTUDIOS DE TÚNELES DE VIENTO EN TECHOS DE EDIFICACIONES.

Previamente a profundizar en el tema netamente de estudios de túneles de viento realizados sobre techos de edificaciones, vale aclarar como es el funcionamiento de manera general de un túnel de viento, de igual manera la información que se puede obtener gracias a los accesorios que estos poseen, así como también las especificaciones técnicas y generales del túnel de viento a usarse para desarrollar el tema que se encuentran en los laboratorios de Ingeniería Mecánica.

1.4.1 Funcionamiento de un Túnel de Viento.

Antes de llegar a la cámara de ensayos siempre se instalan sistemas para uniformar el flujo y asegurar una buena calidad en la sección de ensayos. Una vez tamizado el aire todos conducían el flujo a un cono de aceleración cuya función era reducir costes al utilizar ventiladores de menor potencia y conseguir velocidades altas. Por tanto todos los túneles se basan en el principio de un tubo de Venturi, pero que es un tubo de Venturi, a continuación daremos una pequeña reseña.



Figura 1. 29 Tubo de Venturi. Fuente [10]

Se ve que el diámetro del tubo va disminuyendo hasta llegar a la sección intermedia (Figura 1.29), lo que sería la cámara de ensayos y se la aumenta después de ella. Bien, si se crea un flujo de aire con los ventiladores de por ejemplo 100Km/h que circula por la zona ancha del tubo cuando llega a la zona estrecha todo ese volumen de aire se comprime porque sigue llegando más aire por detrás que lo empuja, pero para evacuar la misma cantidad de volumen en una zona más estrecha solo se puede hacer de una manera, aumentando la

velocidad del tránsito, por tanto con solo disminuir el diámetro se puede llegar a conseguir velocidades del flujo de 300Km/h que luego volverán a disminuir a 100Km/h cuando salgan de la cámara de ensayo, la cantidad de energía que se ahorra es considerable.

Un ejemplo práctico ¿cuándo se tapa parcialmente la salida de una manguera de agua con el grifo abierto? Seguro que todos, pues lo mismo que hace al agua salir más rápido y llegar más lejos, sucede lo mismo con el aire. Este aumento de velocidad en el estrechamiento trae consigo una consecuencia, las moléculas de aire van tan rápido que dejan de ejercer parte de la presión en las paredes del tubo, esa es la causa de que una tubería de agua con diámetros grandes tiene que estar más reforzadas sus paredes que un tubo pequeño ya que al ir el agua más despacio aumenta la presión sobre las paredes del fluido y las roturas son más frecuentes. Este aspecto es importante para las mediciones de la velocidad y presión.

Conociendo ya de manera concreta el principio de tubo de Venturi debemos considerar que debido a la viscosidad del aire, la sección de los túneles suele ser circular porque estos proporcionan un flujo más uniforme y laminado. La razón es que en las esquinas de una sección rectangular se produce una concentración del flujo y aparecen pequeños vórtices (remolinos). A veces esto no es posible o es complicado de implementar cuando también se quiere suelo rodante. Además de esto, los acabados interiores también son muy importantes, deben ser muy lisos con el objetivo de reducir la fricción al máximo posible [10].

1.4.2 Información que se puede obtener.

Las magnitudes más importantes que se quieren conocer cuando se trabaja en un túnel de viento serán la velocidad, la presión, las fuerzas y los momentos. Los cuatro elementos están estrechamente relacionados y a veces se superponen ya que si la velocidad aumenta otros factores como la presión y las fuerzas también lo pueden hacer pero para conseguir mediciones exactas será necesario tener controladas todas las variables termodinámicas: temperatura, presión, volumen y densidad. El nivel de control de estas variables depende de la calidad del túnel y evidentemente influirá en los resultados.

1.4.2.1 Velocidad

Es sin duda una de las magnitudes más importantes que se debe conocer y su precisión es fundamental, el menor de los errores de medición en una maqueta a escala se puede convertir en errores más grandes. Una de las maneras más utilizadas para medir la velocidad es usar un tubo Pitot y su lectura se realiza en un banco de manómetros inclinados. A continuación daremos a conocer el funcionamiento de un Tubo de Pitot.

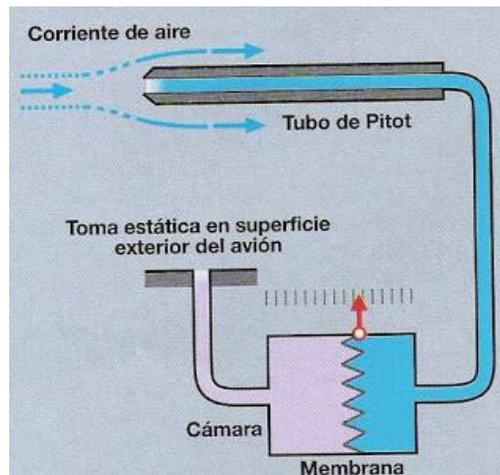


Figura 1. 30 Tubo de Pitot. Fuente [10]

El funcionamiento es el siguiente (Figura 1.30). El sistema consta básicamente de un tubo y en el otro extremo del aparato, una cámara equipada con una membrana flexible. Por la apertura del tubo Pitot entra la corriente de aire derivado del movimiento del aire. Como el sistema es estanco, cuanto más rápido vaya el aire, mayor será la presión dentro del tubo y por tanto mayor será el desplazamiento de la membrana. Por tanto esta membrana se moverá inducida por las presiones a las que es sometida. La ventaja de la sonda Pitot frente a otros métodos de medición es que es muy puntual, quiere decir esto que si se quiere, se puede hacer una medición precisa y rápida de la velocidad en un único punto del modelo frente a otros aparatos que hacen mediciones más genéricas. Además, podrá utilizarlos a altas temperaturas y a velocidades de flujo muy elevadas. Esta capacidad puntual de medición de la de velocidades es muy útil para hacer perfiles completos en todos los puntos de una pieza aunque también se podrá medir la velocidad utilizando anemómetros de hilo

caliente o tecnología láser. Para hacer ensayos de calibración se suelen usar peines de tomas de presión total [10].

De igual manera mediante un manómetro electrónico diferencial se puede obtener la diferencia de presiones necesaria para el cálculo de velocidades, la descripción de este instrumento se la dará a continuación.

Manómetro Diferencial: Un manómetro diferencial es un dispositivo que mide la diferencia de presión entre dos lugares. Los manómetros diferenciales pueden variar desde los más simples que pueden construirse en casa hasta un equipo digital complejo.



Figura 1. 31 Manómetro Electrónico Digital. Fuente [33]

Los manómetros estándar se utilizan para medir la presión en un recipiente por comparación con la presión atmosférica normal. Estos dispositivos también se utilizan para comparar la presión de dos recipientes diferentes. Revelan cuál recipiente tiene una mayor presión y qué tan grande es la diferencia entre los dos.

Su uso es muy frecuente en filtros en línea. De esta forma se puede observar fácilmente lo obturado que se encuentra el filtro midiendo la diferencia de presión entre la entrada y la salida del filtro [32].

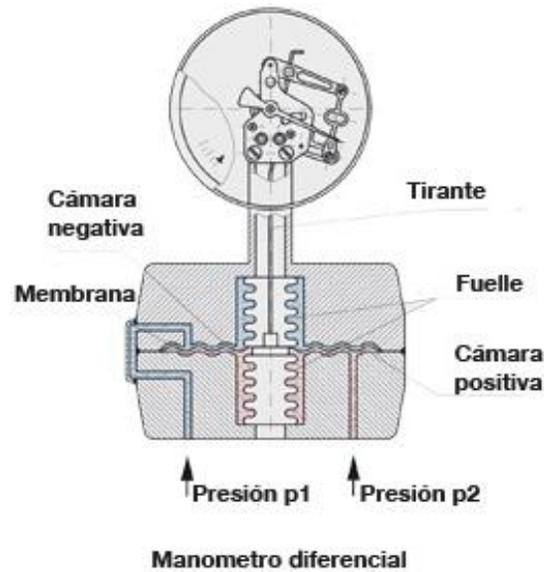


Figura 1. 32 Principio de Funcionamiento Manómetro Diferencial. Fuente [34]

La figura 1.32 muestra el principio de un manómetro diferencial de membrana. La presión p_1 somete la membrana a presión desde el lado superior empujando la membrana hacia abajo, mientras la presión p_2 empuja la membrana en dirección contraria. La diferencia entre cámara menos y más provoca el desplazamiento del elemento sensible traspassando el movimiento mediante un tirante hacia el mecanismo de indicación.

El mecanismo transforma el movimiento unidireccional del tirante en un movimiento giratorio de la aguja. Los fuelles metálicos aíslan las cámaras contra la atmósfera y los asientos de membrana protegen el instrumento contra sobrecargas [34].

1.4.2.2 Presión

La presión es una magnitud estrechamente relacionada con la velocidad y con la fuerza. Hay dos tipos de presiones que nos van a interesar, la estática y la dinámica (producida por la velocidad). Se puede medir de diversas formas. Una de ellas es agujereando el modelo y poniendo diversas tomas de presión en la superficie dónde nos interesa conocer la presión y su distribución. Más recientemente se ha evolucionado y se usan pinturas que cambian de color según la fuerza que se les aplique (en nuestro caso la fuerza la aplica el aire). Las medidas de presión son muy eficaces para medir y evitar o no deformidades en las

estructuras. Se tiende a evitar que determinadas zonas del modelo puedan cambiar de forma por la presión ejercida por el viento en su estructura ya que pueden inducir pérdidas de eficacia en el tránsito de los flujos, etc., buscar los límites sin pasarse llevará muchas jornadas de mediciones y ensayos.

1.4.2.3 Fuerzas y Momentos

Este es el parámetro más complejo de todos ya que aglutina muchos tipos de fuerzas, unas positivas para el ingeniero (la carga) y otras negativas (el rozamiento) y todas dependen de los factores que las producen pero la fuerza más importante de todas, la que interesa conocer y pulir a los ingenieros es el resultante total de todas ellas, la fuerza que ejerce el modelo sobre el suelo y su equilibrio [10].

1.4.3 Túnel de Viento Armfield C15 (Laboratorio UPS)

A continuación daremos las debidas especificaciones del túnel de viento a utilizar y que se encuentra en los Laboratorios de Ingeniería Mecánica Sección Mecánica de Fluidos.

1.4.3.1 Especificaciones

- Caudal de aire controlado por computadora
- Sección de trabajo de 150mm x 150mm (6" x 6" nominal)
- Sección de trabajo transparente
- Amplia gama de modelos para estudios de aerodinámica y flujos de aire
- Bancos de manómetros de agua o electrónicos
- Incorpora una sencilla técnica de visualización de flujo [35].

1.4.3.2 Partes



Figura 1. 33 Partes de Túnel de Viento Marca Armfield C15 (Laboratorio UPS). Fuente [35]

1. Cámara de establecimiento: Endereza y uniformiza el flujo de aire.
2. Cono de aceleración: Acelera la velocidad del flujo manteniéndolo ordenado y uniforme.
3. Cámara de ensayos: Dónde se coloca el objeto que queremos estudiar y también dónde haremos las mediciones.
4. Difusor: El difusor reduce la velocidad del flujo mediante su perfil divergente.
5. Ventilador: Su función es crear un flujo de aire a una velocidad determinada [10].

1.4.3.3 Accesorios

- **Banco de Manómetros Inclinaados**

Un banco de 13 tubos transparentes con una inclinación de 30° para medir pequeñas diferencias de presión (0–160mm H₂O). Incluye un depósito de agua con desplazador accionado por un tornillo que permite ajustar rápidamente el nivel de referencia del manómetro, e incorpora acoplamientos rápidos para su conexión a modelos e instrumentos. Para mayor comodidad y seguridad, se utiliza agua como fluido en el manómetro.

- **Banco de Manómetros Electrónicos**

Una consola electrónica que incorpora 16 sensores de presión diferencial, cada uno con un intervalo de 0-178mm H₂O.

Una toma común permite referenciar todos los sensores a la presión atmosférica o al nivel de referencia estática del túnel, según se desee. Los acoplamientos rápidos (7 de una vía y uno de 10 vías) permiten conectarlo rápidamente a modelos e instrumentos.

Se conecta a la PC de control usando un segundo puerto USB, y para mayor facilidad de uso, las lecturas están totalmente integradas con el software de control del túnel de viento.

1.4.3.4 Software (Túnel de Viento C15 – Lab UPS)

El C15 incluye un software didáctico completo que cubre todos los instrumentos y modelos opcionales disponibles, en sí es un pequeño túnel de viento controlado por computadora para estudios universitarios.

El software se utiliza para controlar el túnel de viento, incluyendo el encendido del ventilador y el control de la velocidad, y para visualizar y registrar todos los datos. Estas funciones están incorporadas en pantallas de control mediante diagramas esquemáticos, que muestran una representación gráfica del aparato con los valores de los sensores electrónicos, valores calculados a partir de éstos (tales como velocidad del viento, sustentación, etc.), y es posible introducir manualmente y registrar los valores provenientes de instrumentos tales como el banco de manómetros de agua.

Se incluyen potentes funciones de registro de datos y trazado de gráficos, junto con calibraciones de sensores y una gran variedad de opciones de visualización y exportación de datos [35].

1.4.4 Estudios Realizados con Túnel de viento y Softwares

Como ya se habló anteriormente los estudios que se realizan en túneles de viento con respecto a la arquitectura se analiza de dos maneras diferentes.

La primera gracias al uso de túneles de viento y softwares de simulación se puede anticipar de manera muy precisa la acción y la dinámica del viento sobre las estructuras y mediante la ayuda de sensores mecánicos, o de dispositivos para diferencial de presión, se obtiene datos como velocidad, presión, fuerza, etc., cuya finalidad es la de calcular las cargas sobre los edificios, cubiertas, vallas u otras estructuras y de esta manera minimizar o aumentar el volumen de la estructura que se necesita según lo observado en los ensayos a escala.

Y lo segundo es para la ventilación natural o bioclimatización para reducir costos de mantenimiento en los hogares, concerniendo la verificación de la dinámica del viento dentro del lugar de estudio, pudiendo ser estos locales deportivos, estacionamientos, etc., se habla de dinámica del viento al movimiento y recirculación del aire con la ayuda de renovación de aire, siendo este un estudio de aire acondicionado.

Siguiendo con el tema de estudios sobre edificaciones a continuación daremos a conocer varios tipos de estos, siendo estos solo de una estructura como es el caso de nuestra Tesis de estudio o de construcciones en conjunto.

1.4.4.1 Efecto del Viento en Cubiertas Curvas.

En este estudio se simula el viento que fluye de manera natural e incide sobre construcciones de perfil curvo sin paredes laterales (Figura 1.34), con obstrucciones que se ubican debajo de esta, en la vida real es muy común.

Para estos casos no se dispone de especificaciones sobre como evaluar las cargas en estos casos en los códigos de diseño, para ello se nota claramente las diferencias de la dinámica de viento con y sin obstrucciones.

Los resultados que se obtienen mediante un túnel de viento virtual gracias a la Dinámica de Fluidos Computacional, tratando la turbulencia a través de un modelo de grandes vórtices “LES, por large eddy simulation”.



Figura 1. 34 Cubierta Redonda. Fuente [36]

Cabe decir que los mismos autores realizan varios estudios acerca de este mismo tipo de perfil, la diferencia recae en la incidencia del viento sobre esta estructura, siendo esta incidencia de manera directa y perpendicular (Figura 1.34) como también oblicuamente. A continuación veremos las simulaciones realizadas en ambos casos, y la notable diferencia que se nota entre los dos.

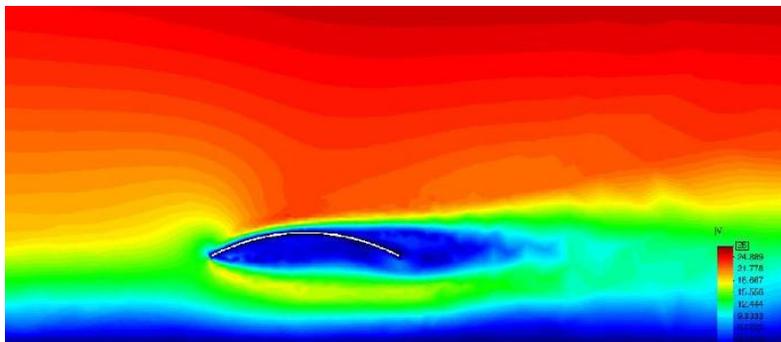


Figura 1. 35 Velocidad en el Plano de Simetría Longitudinal, cubierta sola. Fuente [36]

En la figura 1.35 se encuentra la simulación de la cubierta sin obstrucción y cuyo viento incide directamente y de manera perpendicular sobre el plano de simetría transversal.

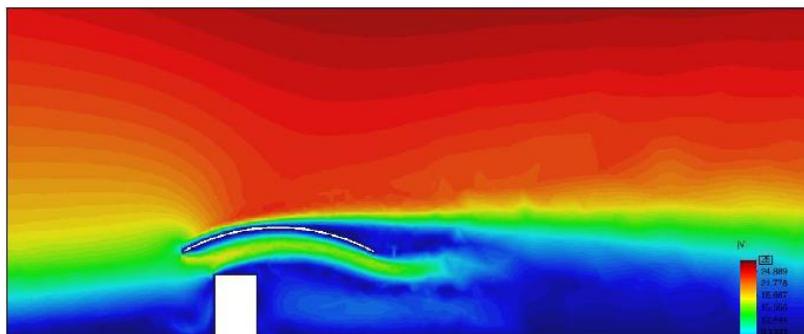


Figura 1. 36 Velocidad en el Plano de Simetría Longitudinal, cubierta con obstrucción. Fuente [36]

En la figura 1.36 se encuentra la simulación de la cubierta con obstrucción y cuyo viento incide directamente y de manera perpendicular sobre el plano de simetría transversal, se nota la diferencia con y sin obstáculo, ya que se ve que en la simulación donde se encuentra con obstrucción el viento fuerza a la cubierta por arriba y por debajo, siendo la que está sin obstáculo un flujo normal del viento.

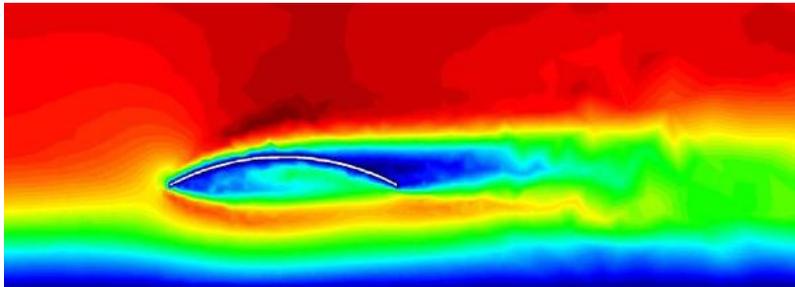


Figura 1. 37 Velocidad en el Plano de Simetría Longitudinal, cubierta con obstrucción. Fuente [37]

La figura 1.37 se simula la misma cubierta pero oblicuamente con una inclinación de 60° con respecto al plano transversal y se nota claramente que la dinámica del viento cambia y se vuelve algo inestable y ya con algo de turbulencia hacia la parte de atrás de la cubierta, y con velocidades algo mayores que el caso anterior.

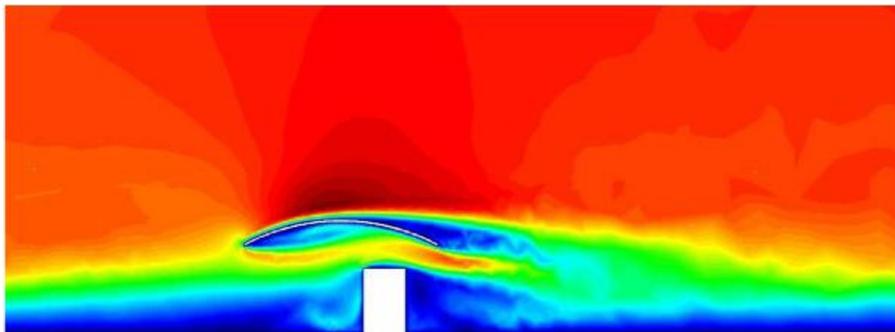


Figura 1. 38 Velocidad en el Plano de Simetría Longitudinal, cubierta con obstrucción. Fuente [37]

Como se ve en la figura 1.38 aunque el objeto que obstruye este más atrás hace que en la sección trasera por debajo el viento ejerza fuerza, generando algo de turbulencia en el

vértice inferior del objeto obstrucción, así como la gran estela de transición de flujo del viento que se encuentra ya detrás de la estructura.

Los datos que este estudio considera son el coeficiente de arrastre y la sustentación que genera sobre la cubierta, teniendo en cuenta el peso relativo de la sustentación frente al arrastre dado se dice que la presencia del objeto bajo la cubierta provoca un notorio incremento de las cargas debidas al viento [36] [37].

1.4.4.2 Estudios en túnel de viento sobre las características del campo y de dispersión de flujo en cañones urbanos en la Universidad de Karlsruhe.

En este estudio las mediciones se realizaron en la atmósfera neutra en el Túnel de Viento del Instituto de Hidromecánica de la Universidad de Karlsruhe. Teniendo como sección de prueba 2 m de ancho y 1 m de altura. Como se ve en la figura 1.39 los edificios están situados en la sección de prueba, en el suelo del túnel de viento. Y son dos filas de edificios montados, rodeados de elementos que causan rugosidad distribuidos de manera homogénea, con una dirección predominante del viento perpendicular a la fila de los edificios cuya altura es de 1,2 m de largo.



Figura 1. 39 Viento modelo de túnel de un corredor urbano idealizado montado en el túnel de viento de capa límite atmosférica en la Universidad de Karlsruhe. Fuente [38]

Las características medias y turbulentas de la capa límite se pueden resumir como, el perfil de velocidad media de la capa límite en el túnel de viento como se ve en la figura 1.40.

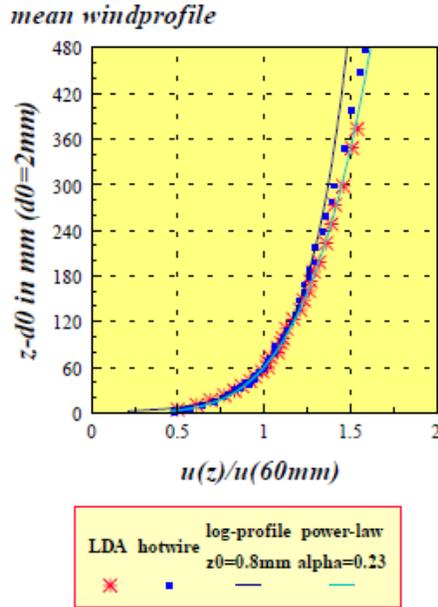


Figura 1. 40 Perfil de Velocidades del Túnel de Viento. Fuente [38]

La relación de la gráfica de la figura 1.40 se da mediante el eje de las ordenadas con la altura del túnel de viento y con respecto al eje de las abscisas correspondiente a la velocidad del viento, y claramente se ve que la curva es similar al perfil de velocidades de diferentes estudios, ya que su comportamiento es exponencial.

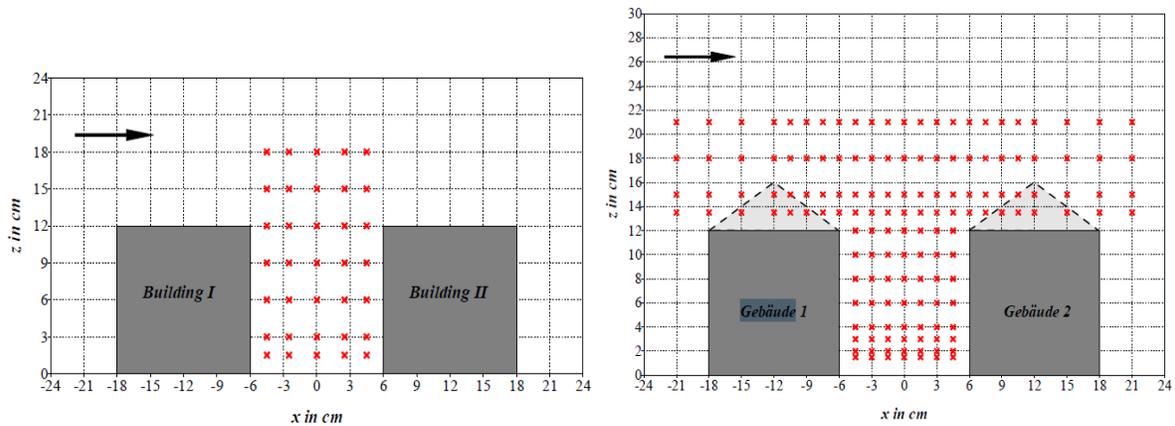


Figura 1. 41 Localización de los Puntos de Medición entre las edificaciones con techo plano (Izquierda) y con techo de perfil triangular. Fuente [38]

Este estudio al igual que el nuestro toma ciertos puntos de referencia para sensar las velocidades, aceleraciones, etc., para ello estos puntos son ubicados de manera estratégica

(Figura 1.41) en zonas donde se crea que haya una mayor aceleración por compresión del flujo, así como generación de vórtices o turbulencias importante [38].

1.4.4.3 Estudio de prueba de túnel de viento en el coeficiente de presión del viento de revestimientos de edificios de gran altura.

A continuación este estudio es realizado para considerar las más desfavorables condiciones y por ende coeficientes de presión del viento que son perjudiciales para la estructura, en áreas promediadas en diversas regiones de superficies de edificios y la influencia de la relación de lado en que inciden de manera directa o no el flujo de viento, las maquetas usadas son de perfil rectangular.

La prueba de túnel de viento se llevó a cabo en los campos de viento simulados de los tipos A, B, C y D [40] en un túnel de viento en la Universidad de Tongji, Shanghai, China. Los resultados simulados de campo de viento B se muestran en la Fig. 1.42. De acuerdo con los datos y la fórmula de adaptación proporcionada por el Instituto de Arquitectura de Japón (AIJ) [41], la escala de longitud de turbulencia fue especialmente simulado (Fig. 1.42 (b)). Las relaciones de escala de longitud, velocidad del viento, y el tiempo en esta prueba fueron 1/250, 1/5 y 1/50, respectivamente.

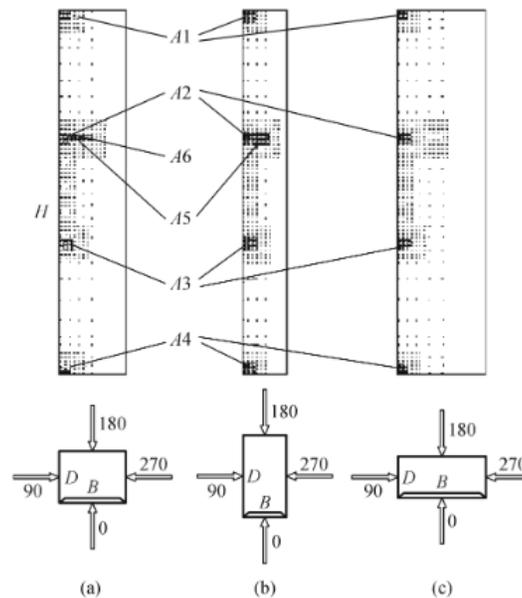


Figura 1. 42 Disposiciones de medida y direcciones del viento. Fuente [39]

La frecuencia de muestreo y muestreo en tiempo de la presión del viento eran 312,5 Hz y 48 s, que corresponde a 6,25 Hz y 240 s en la escala completa, respectivamente. Las alturas de los modelos rígidos eran los 90 cm, lo que corresponde a 225 m en tamaño completo, un valor que es representante de edificios de gran altura.

Con base en los resultados de la medición de presión superficial de varios modelos de edificios de gran altura, se analizan las características de los valores de presiones en áreas promediadas en diferentes regiones, y los siguientes se pueden sacar conclusiones que en las zonas de vértices o donde hay cambios bruscos de geometría el valor de presión negativa es más significativo, en cambio en zonas de altura media la presión tiende a estabilizarse conforme la altura del edificio sea menor, esto variará conforme el terreno donde se asiente los edificios sea suave o abrupto, por lo que se requieren de más estudios para sacar conclusiones más precisas [39].

Resumiendo pocos de los muchos estudios que existen sobre túneles de vientos en edificaciones y techos de edificaciones, se denota que los estudios son realizados para la medición de cargas, velocidades, presiones, fuerzas, etc., tomando en cuenta la condiciones del ambiente expuestas y escalándolas con las debidas normas, para así obtener resultados cercanos a la vida real, siendo el túnel de viento y los software de simulación confiables para prever lo que quizás pueda suceder antes de construir estructuras, evitando grandes costos por estructuras sobre dimensionadas y quizás para evitar algún colapso no deseado.

A continuación en los siguientes capítulos daremos a conocer paso a paso la metodología usada para poder obtener la velocidad en puntos estratégicos, de nuestros perfiles de techos escaladas y considerando las condiciones en la ciudad de Cuenca, y cuyos datos usarlos también en el programa computacional ANSYS Fluent y poder verificar mediante comparación si esta herramienta es confiable y si se encuentran en el rango permisible de error, con respecto a las velocidades en los puntos anteriormente dichos.

2. CAPITULO II

SITUACIÓN FÍSICA Y MODELOS MATEMÁTICOS

INTRODUCCION

En el siguiente capítulo se detallan las diferentes condiciones físicas de los modelos a ser analizados, mostrando dicha situación de manera gráfica para el mejor entendimiento de los modelos físicos analizados.

Además de detallan los tipos de semejanza para el escalamiento de los modelos, y que los resultados obtenidos en estos sean los reales con respecto al prototipo, así se fijan condiciones que serán el punto de partida para el dimensionamiento del modelo, para finalmente realizar el escalamiento de los modelos para el análisis en el túnel de viento, teniendo en cuenta los factores geométricos y cinemáticos que servirán para la comprobación de las velocidades que se escalan a partir del prototipo en el modelo.

2.1 MODELOS FÍSICOS

Una situación física es una reproducción que se realiza a partir del prototipo, con el fin de lograr un estudio detallado del comportamiento de los fenómenos que se producen en el prototipo o parte de él, que se producen por un fluido en movimiento, para ello es necesario pre-establecer las condiciones de flujo, tanto del prototipo como del modelo.

Los modelos físicos nacen de la complejidad de los modelos matemáticos los cuales en ocasiones no son suficientes para la resolución de los fenómenos complejos que se producen en la mecánica de fluidos, esto da paso al uso de técnicas de carácter experimental para la solución de dichos fenómenos, los cuales pueden ser estudiados en modelos físicos que a una escala reducida con las condiciones e estudio bien establecidas.

El uso de una instrumentación adecuada proporciona resultados de buena calidad con respecto a los datos reales en aspectos referentes a la funcionalidad, estabilidad y economía.

En ocasiones la aplicación de modelos físicos se ve limitada en gran manera por la complejidad del modelo a estudiar en sus variables y condiciones de contornos que se vayan a analizar.

En la actualidad el uso de modelos físicos se considera un procedimiento estándar de buena calidad en la solución de problemas de ingeniería aplicada, y son de gran ayuda en la calibración de los modelos matemáticos. [47] [48]

Los modelos físicos a ser estudiados en el túnel de viento se muestran en las figuras, donde se determinan los parámetros que actuarán en la experimentación y en la simulación.

2.1.1 Modelo físico Helipuerto

En las figuras se muestran el estado físico del modelo a estudiar en la sección de pruebas del túnel de viento, en las diferentes ubicaciones del modelo establecidas para el estudio, conjuntamente con el diseño con medidas reales y el modelo usado en el túnel de viento.



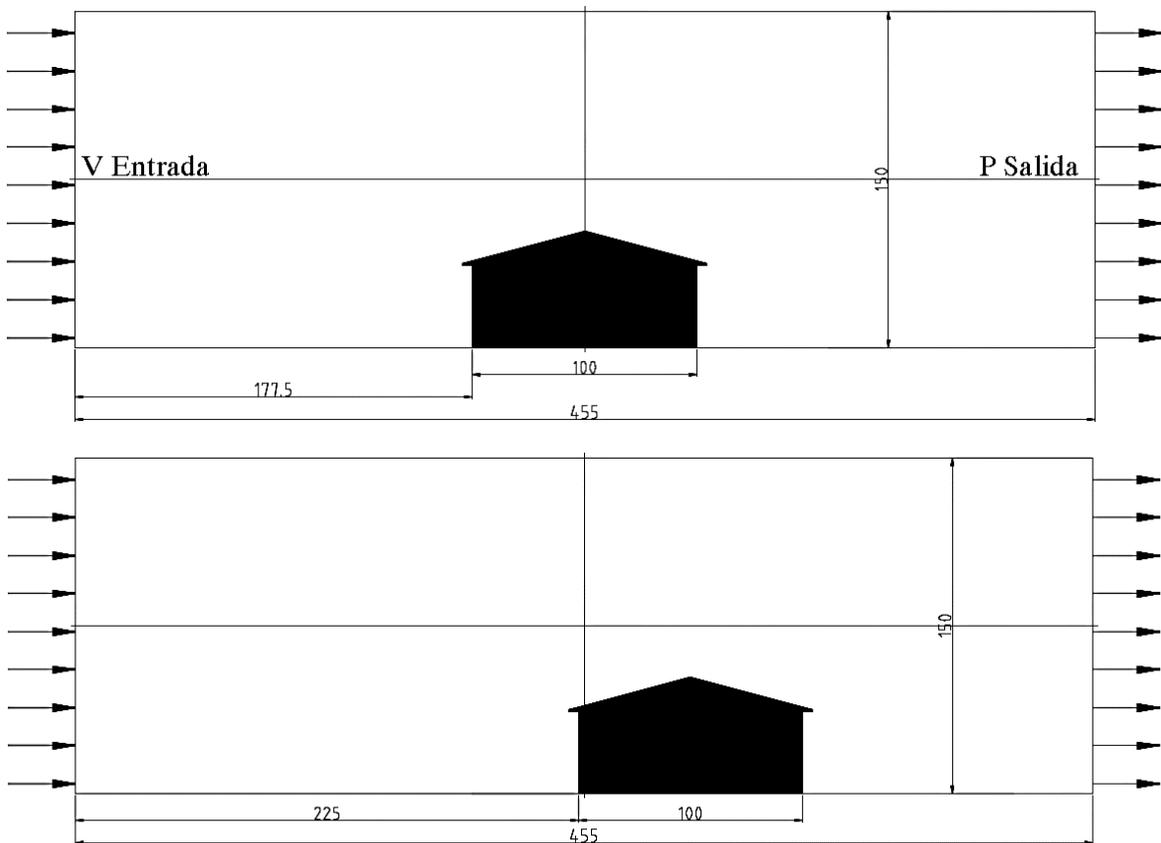
Figura 2. 1: Modelo físico de perfil H. Fuente [Autores]



Figura 2. 2 Perfil de Helipuerto Medidas Reales y Modelo para uso en Túnel de Viento. Fuente [Autores]

2.1.2 Modelo físico de Coliseo

De la misma manera que el techo en H, se colocó el modelo en distintas posiciones en la sección de pruebas del túnel de viento, como se muestra en la figura.2.3.



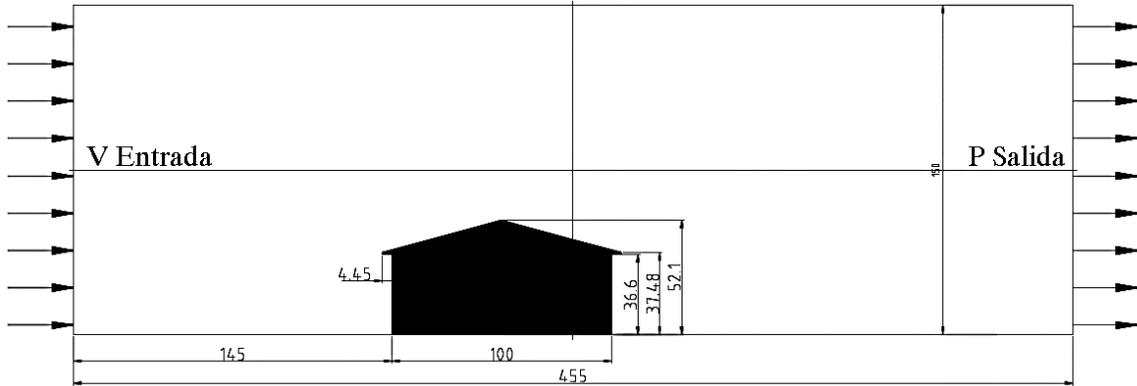


Figura 2. 3: Modelo físico de perfil triangular (Arriba hacia Abajo). Fuente [Autores]

Y en la figura 2.4 se muestra el perfil real del coliseo junto al modelo para usar en el túnel de viento.

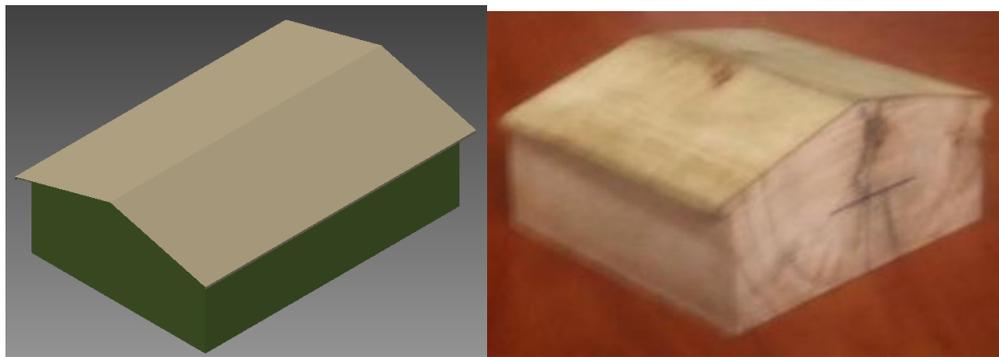
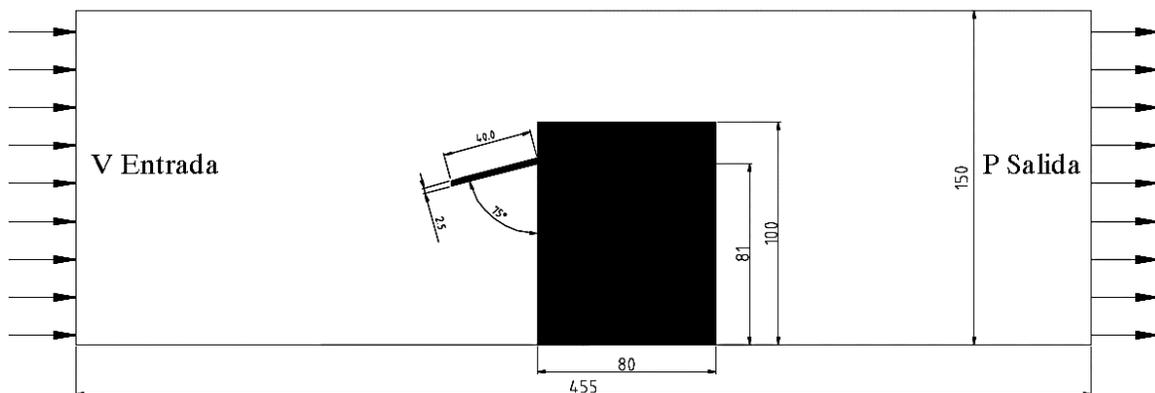


Figura 2. 4 Perfil de Coliseo con Medidas Reales y Modelo para uso en Túnel de Viento. Fuente [Autores]

2.1.3 Modelo físico de Techo Colgante



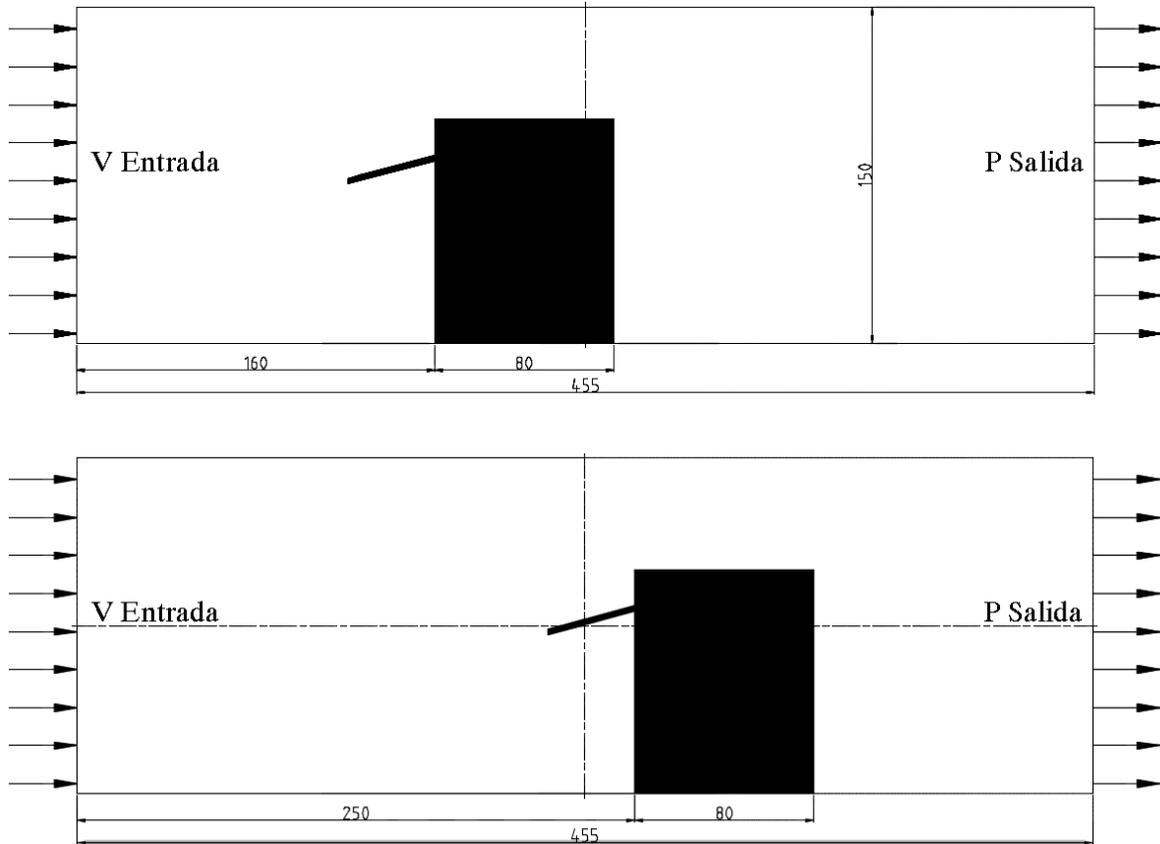


Figura 2. 5: Modelo físico de techo colgante (Arriba hacia Abajo). Fuente [Autores]

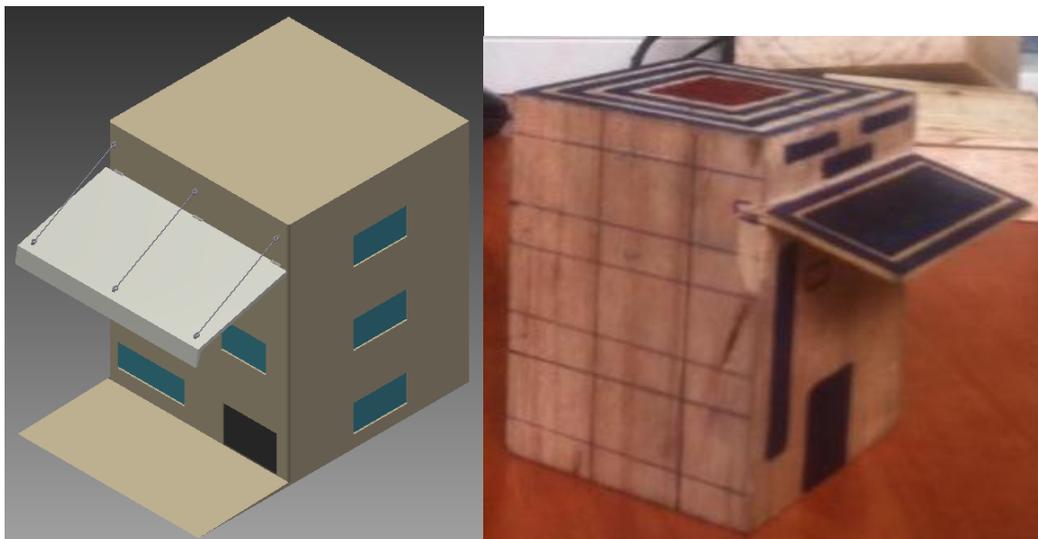


Figura 2. 6 Perfil de Techo Colgante con Medidas Reales y Modelo para uso en Túnel de Viento. Fuente [Autores]

2.2 LEYES DE SIMILITUD EN MODELOS FÍSICOS

Las leyes de similitud sirven para asegurar que el modelo pueda reproducir de la manera más parecida los efectos que se dan en el prototipo, para lo cual es necesario que se cumplan las condiciones de similitud, las cuales se indican a continuación.

2.2.1 Semejanza Geométrica

Esta semejanza determina el cumplimiento estricto de la relación entre las dimensiones del modelo y del prototipo es decir que estas sean iguales, considerando que un modelo y un prototipo son geoméricamente iguales si todas las medidas se relacionan entre sí por un *factor de escalas*, el cual permitirá obtener todas las dimensiones que conforman el modelo, dicho factor se muestra en la ecuación 2.1.

$$L_r = \frac{L_M}{L_P} \quad (2.1)$$

Dónde:

L_p: Longitud característica del prototipo

L_r: Factor de escalas

L_m: Longitud característica del modelo

De esta manera se obtiene las relaciones de área y de volúmenes de la siguiente forma.

$$\text{Relacion de Area} \quad A_r = \left(\frac{L_M}{L_P}\right)^2 = L_r^2 \quad (2.2)$$

$$\text{Relacion de Volúmenes} \quad V_r = \left(\frac{L_M}{L_P}\right)^3 = L_r^3 \quad (2.3)$$

Esta similitud es el requisito más necesario para el estudio de un modelo a escala, pero esta es difícil de obtener adecuadamente, debido a que es necesario recrear de la manera más adecuada las rugosidades, por lo que se pueden tener modelo distorsionado.

La calidad de las rugosidades y del acabado superficial depende en gran manera del problema que se vaya a analizar, y la precisión que se desee obtener en la resolución del problema. [49]

2.2.2 Semejanza Cinemática

La semejanza cinemática implica que la similitud en el movimiento se cumpla, es decir que las partículas equivalentes lleguen a los puntos equivalentes, en tiempos equivalentes, teniendo en cuenta que el factor de escala es un valor fijo.

Así se tiene que la relación de longitudes es L_r y la relación en intervalos de tiempo es T_r , la magnitud de velocidad correspondiente del prototipo en el modelo está dada por:

$$V_r = \frac{L_r}{T_r} \quad (2.4)$$

Esta similitud determina que el modelo y el prototipo tengan una escala de similitud de líneas y de tiempos, lo que permite tener una escala única de velocidades para el modelo en base al prototipo.

$$V_e = \frac{V_p}{V_m} \quad (2.5)$$

$$T_e = \frac{T_p}{T_m} \quad (2.6)$$

Dónde:

V_e : Escala de Velocidades

T_e : Escala de Tiempos

Para que se cumpla esta semejanza es necesario el cumplimiento de la semejanza geométrica, cuando estas dos semejanzas se cumplen se tiene que las líneas de corriente del flujo son similares para modelo y prototipo.

Al conocer los valores de las velocidades, tiempos y aceleraciones en cualquier punto del modelo estudiado, se pueden conocer las velocidades, tiempos y aceleraciones en puntos equivalentes de prototipo, para determinar dichos valores es necesario multiplicar la magnitud que se desea determinar del modelo por su correspondiente escala establecida previamente.

2.2.3 Semejanza Dinámica

Los valores del fluido en puntos equivalentes entre modelo y prototipo se relacionan con una escala de fuerzas, con lo que cumple con la semejanza dinámica, para el cumplimiento de esta es necesario el cumplimiento de la similitud geométrica y cinemática.

Las fuerzas que actúan sobre una partícula de fluido se pueden dar por la gravedad, la presión, la viscosidad y la tensión superficial.

Las tres semejanzas se aprecian en la figura donde el aire que fluye a través del túnel de viento y el aire sobre el prototipo tengan las mismas propiedades geométricas, cinemáticas y dinámicas, en condición de similitud. [49] [50]

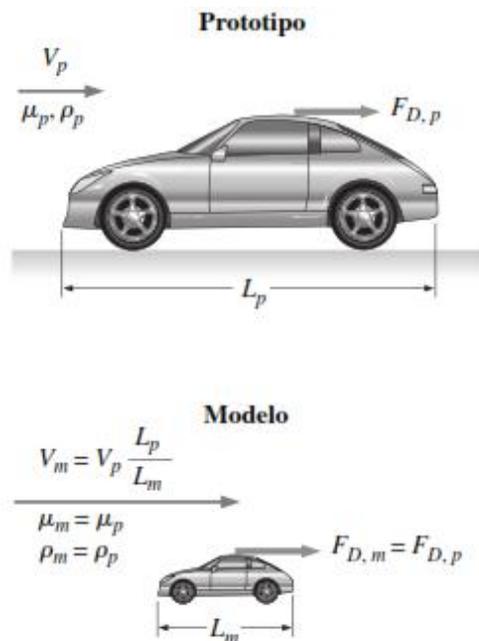


Figura 2. 7: Semejanzas entre prototipo y modelo. Fuente [50]

2.3 MODELOS MATEMÁTICOS DE FLUJO DE FLUIDOS

De una manera general, un modelo matemático es una ecuación o un conjunto de las mismas, las cuales dan la solución a un problema matemático específico, que responde a un modelo físico real planteado para un determinado estudio.

2.3.1 Consideraciones de flujo para estudio en túneles de viento

Para el análisis realizado en modelos, se pueden considerar que el flujo de aire en la sección de pruebas del túnel de viento puede estar determinado por:

- Aire a presión constante (presión atmosférica)
- Los modelos se analizan en régimen estacionario
- Las variaciones de temperaturas se consideran despreciables
- Se considera un flujo incompresible
- Las pérdidas de carga son despreciables

Las pérdidas de carga se pueden despreciar porque el túnel es pequeño, con esto las pérdidas por la fricción en del fluido de viscosidad dinámica baja en las paredes son muy pequeñas, además de esto el túnel está diseñado de tal forma en que no se tengan pérdidas por contracciones bruscas.

De igual forma se considera que la temperatura es despreciable debido a que el aire permanece poco tiempo en el túnel de viento, lo que permite usar las propiedades del aire a la temperatura a la que se vaya a hacer en análisis práctico.

Y finalmente al tener que el flujo es incompresible, el valor de la densidad que varía con la presión y temperatura se puede despreciar en el análisis, debido a que no existe una variación de presión que se pueda considerar significativa. [48] [52]

2.3.2 Modelos matemáticos usados en modelos

2.3.2.1 Caso 1: Perfil H

Para este caso de estudio se debe considerar el flujo alrededor de un cuerpo, para resolver esta ecuación se hace uso de las ecuaciones de mecánica de fluidos, para ello se considera que:

- Estudio bidimensional.
- Estado de flujo transiente.
- Fluido newtoniano.
- Fluido incompresible.
- Propiedades físico-químicas constantes del fluido.
- Flujo turbulento.

2.3.2.2 Caso 2: Coliseo (Perfil Triangular)

- Estudio bidimensional.
- Estado de flujo transiente.
- Fluido newtoniano.
- Fluido incompresible.
- Propiedades físico-químicas constantes del fluido.
- Flujo turbulento.

2.3.2.3 Caso 3: Techo colgante

- Estudio bidimensional.
- Estado de flujo transiente.
- Fluido newtoniano.
- Fluido incompresible.
- Propiedades físico-químicas constantes del fluido.
- Flujo turbulento.

2.3.3 Ecuaciones de gobierno de modelo matemático (Mecánica de fluidos)

Para todos los casos de análisis, únicamente se usaron las ecuaciones que gobiernan la mecánica de fluidos, las cuales se detallan a continuación.

2.3.3.1 Ecuación de continuidad en flujos incompresibles

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.7)$$

2.3.3.2 Momento lineal en x

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_f(T) \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_f(T) \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.8)$$

2.3.3.3 Momento lineal en y

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_f(T) \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_f(T) \frac{\partial v}{\partial y} \right) + g\beta(T)(T - T_f) \quad (2.9)$$

2.3.3.4 Conservación de la energía

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_f(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_f(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2.10)$$

2.4 Modelo de turbulencia

Los modelos de turbulencia son comúnmente usados en la predicción de los efectos causados por la turbulencia en un flujo, sin que sea necesaria la resolución de escalas de fluctuaciones pequeñas.

En la actualidad se han desarrollado varios modelos de turbulencia que proporcionan resultados de calidad en la simulación de turbulencia, estos modelos se han desarrollado en base a las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds (RANS). [53] [54]

2.4.1 Método de volúmenes finitos.

Este método fue usado por Turner et al, en el año de 1956 y tuvo su auge a principio de los años 90, cuando se hizo popular en la resolución de ecuaciones de Euler /Navier Stokes, permite discretizar y resolver de manera numérica las ecuaciones diferenciales. Este es un método alternativo a los modelos de diferencias finitas y elementos finitos, en este cada punto de la malla se convierte en un volumen de control que no permite el traslape de resultados entre puntos vecinos que conforman la malla, así se tiene que el volumen total del fluido es igual a la suma de todos los volúmenes de control considerados en la malla del fluido.

Este método la ecuación diferencial se integra sobre cada volumen de control, lo que proporciona una versión discretizada de la ecuación diferencial, pero para ello es necesario especificar los perfiles de variación entre los puntos que conforman la malla, lo que permite la evaluación de las integrales resultantes.

La principal ventaja de este sistema de ecuaciones discretizadas resultantes, es que la solución proporcionada por esta satisface de una manera exacta las ecuaciones de la conservación que son usadas por este método, esto se da de manera independiente al tamaño de la mala, lo que hace que no sea necesario un tedioso afinamiento y calibración de la misma. [55]

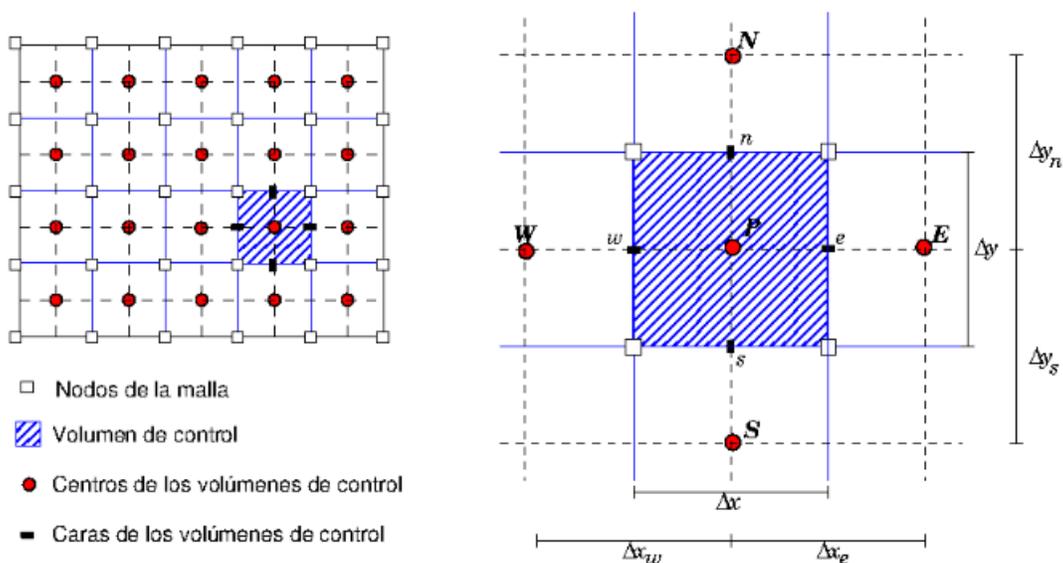


Figura 2. 8: Discretización de dominio usando volúmenes finitos. Fuente [55]

El método de volúmenes finitos a diferencia del método de diferencias finitas presta mayor flexibilidad debido a que este se puede ejecutar con mallas estructuradas y no estructuradas, esto hace del método de volúmenes finitos sea el más usado en la resolución de flujos con geometrías complejas. [50]

En este método es necesario que los dominios del mallado estén constituidos por elementos de forma triangular para un análisis en 2D, y según la precisión que se desee obtener será necesaria la creación de una malla más elaborada, conformada por elementos más o menos pequeños.

2.4.2 Modelo RANS para flujos incompresibles

Las ecuaciones de RANS para fluidos incompresibles, asume que la densidad y la temperatura son constantes, se obtiene.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.11)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.12)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.13)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.14)$$

2.4.2.1 Modelo de turbulencia k-épsilon realizable.

Este modelo tiene su principio en el modelo k-e estándar, este modelo satisface ciertas limitaciones con respecto a los esfuerzos normales que no lo hace el modelo k-e estándar.

Este modelo usa la expresión para la obtención de esfuerzos normales de Reynolds en un flujo incompresible.

$$\overline{u'_i * u'_i} = \frac{2}{3}k - 2v_t \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.15)$$

El modelo k-épsilon realizable se diferencia del modelo k-e normal, ya que este incorpora:

- Una ecuación para la viscosidad turbulenta, e involucra la variable C_u , propuesta por Reynolds.
- Una ecuación para la disipación de la energía cinética turbulenta, que tiene su principio en la ecuación de la raíz que sufre la fluctuación de la vorticidad.

Así se tiene una relación para la viscosidad cinemática turbulenta dada por:

$$v_t = \frac{u_t}{\rho} \quad (2.16)$$

El modelo k-épsilon realizable fue propuesto por Shih et al. En el año de 1995, y nace para eliminar las deficiencias del modelo k-e, ya que este adopta una ecuación que analiza la viscosidad turbulenta e involucra la variable C_u , y una ecuación para la disipación, con estas dos ecuaciones se tiene que:

Energía cinética turbulenta (k):

$$\frac{\partial(\rho uk)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vk)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + P_k + G_k - \rho \varepsilon - Y_M \quad (2.17)$$

Disipación de la energía cinética turbulenta (ε)

$$\frac{\partial(\rho u \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \varepsilon)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \rho C_1 - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + v\varepsilon} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} C_b \quad (2.18)$$

Teniendo en cuenta que C_u no es una constante, la diferencia entre $k-\epsilon$ y el $k-\epsilon$ realizable es

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\epsilon}} \quad (2.19)$$

Donde

$$U^* = \sqrt{S_{ij} * S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}} \quad (2.20)$$

Siendo

$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \epsilon_{ijk} \omega_k \text{ y } \overline{\Omega_{ij}} \quad (2.21)$$

Y Ω_{ij} es el tensor de rotación en referencia a la velocidad angular.

Así se tiene el valor de las constantes

$$A_0 = 4.04$$

$$A_s = 6 \cos \Phi$$

Donde:

$$\Phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W) \quad (2.22)$$

$$W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\tilde{S}} \quad (2.23)$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}} \quad (2.24)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2.25)$$

Así se obtienen los siguientes coeficientes: [50]

Tabla 2. 1 Valores usados en el modelo k-epsilon realizable.

$C_u = 1.44$	$C_{2\epsilon} = 1.9$	$C_{3\epsilon} = \tanh \left \frac{v}{u} \right $	$\sigma_k = 1.0$	$\sigma_\epsilon = 1.2$
--------------	-----------------------	--	------------------	-------------------------

2.5 ESCALAMIENTO DE MODELOS

Los modelos fueron escalados de tal forma que estos cumplan con la similitud geométrica y cinemática, para el cumplimiento de la primera similitud en los tres modelos se realizó un escalado a partir de las dimensiones de un prototipo existente, en función del tamaño de la sección de pruebas del túnel de viento, teniendo en cuenta que no se produzcan efectos de pared en dicha sección.

Para el cumplimiento de la semejanza cinemática, se determinó un factor de escala de tiempo, de aceleración y de velocidad, para escalar la velocidad del prototipo en función a las características de la ciudad de Cuenca, los detalles de escalamiento de los tres modelos se muestran a continuación:

2.5.1 Escalamiento de modelo Perfil H

$$Nv = Na \cdot Nt$$

$$NI = Nv \cdot Nt$$

$Na = 1$ (Aceleración de la gravedad es constante)

Factor de escala de aceleración

$$am := 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$ap := 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$na := \frac{am}{ap} = 1$$

Factor de escala de tiempo

$$tm := 8.1 s$$

$$tp := 30 \text{min} = 1.8 \times 10^3 s$$

$$nt := \frac{tm}{tp} = 4.5 \times 10^{-3}$$

Factor de escala de longitudes

$$n_l := \frac{3}{1250}$$

Factor de escala de velocidades

$$n_l = n_t \cdot n_v$$

$$n_v := \frac{n_l}{n_t} = 0.533$$

Escalando la velocidad del modelo

$$v_{\text{prot}} := 4.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_m := n_v \cdot v_{\text{prot}} = 2.4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{VELOCIDAD DEL TUNEL DE VIENTO}$$

2.5.2 Escalamiento de perfil triangular

$N_a = 1$ (Aceleración de la gravedad es constante)

Factor de escala de aceleración

$$a_m := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$a_p := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$n_a := \frac{a_m}{a_p} = 1$$

Factor de escala de tiempo

$$t_m := 24.12 \text{ s}$$

$$t_p := 30 \text{ min} = 1.8 \times 10^3 \text{ s}$$

$$n_t := \frac{t_m}{t_p} = 0.013$$

Factor de escala de longitudes

$$n_l := \frac{1}{140}$$

Factor de escala de velocidades

$$n_l = n_t^2 n_v$$

$$n_v := \frac{n_l}{n_t} = 0.533$$

Escalando la velocidad del modelo

$$v_{\text{prot}} := 4.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_m := n_v \cdot v_{\text{prot}} = 2.399 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ VELOCIDAD DEL TUNEL DE VIENTO}$$

2.5.3 Escalamiento de techo colgante

$$N_v = N_a \cdot N_t$$

$$N_l = N_v \cdot N_t$$

$N_a = 1$ (Aceleración de la gravedad es constante)

Factor de escala de aceleración

$$a_m := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$a_p := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$n_a := \frac{a_m}{a_p} = 1$$

Factor de escala de tiempo

$$t_m = 13.08 \text{ s}$$

$$t_p := 30\text{min} = 1.8 \times 10^3 \text{ s}$$

$$n_t := \frac{t_m}{t_p} = 7.267 \times 10^{-3}$$

Factor de escala de longitudes

$$n_l := \frac{1}{250}$$

Factor de escala de velocidades

$$n_l = n_t^2 n_v$$

$$n_v := \frac{n_l}{n_t} = 0.55$$

Escalando la velocidad del modelo

$$v_{\text{prot}} := 4.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_m := n_v v_{\text{prot}} = 2.477 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ VELOCIDAD DEL TUNEL DE VIENTO}$$

3. CAPÍTULO III

DATOS EXPERIMENTALES EN TÚNEL DE VIENTO Y SIMULACIÓN MEDIANTE MODELO CFD (ANSYS)

INTRODUCCION

En el presente capítulo se detalla el proceso experimental usado en la recolección de datos numéricos y los instrumentos usados para este fin, así como el proceso usado en la toma de datos mediante el software ArmSoft propio del túnel de viento.

Para ello se muestra en detalle las diferentes posiciones de los modelos en la sección de pruebas del túnel de viento y las diferentes posiciones del sensor, el cual fue colocado en función del viento y considerando donde este puede ser más contraproducente en el modelo analizado, obteniendo los resultados en las distintas posiciones analizadas.

Además se muestra el proceso seguido en la simulación para la obtención de datos numéricos simulados, se definen las condiciones de contorno propias de cada modelo, variando los parámetros de mallado con una malla estructurada y una no estructurada, para obtener los resultados con las variaciones antes mencionadas, para finalmente mostrar los resultados obtenidos con las variaciones antes mencionadas para su posterior análisis.

3.1 RECOLECCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES EN TÚNEL DE VIENTO.

Los datos numéricos experimentales de los modelos estudiados en el túnel de viento se obtuvieron por medio del Tubo Pitot Estático, el cual permite determinar la presión total y estática en un punto determinado, los datos de presión que se obtienen en el tubo pitot estático, se visualizan en un manómetro de tubos inclinados, en el cual la presión total se

visualiza en el tubo 13 y la presión estática en el tubo 12, estas presiones permiten obtener la velocidad en el tubo pitot, como se muestra en la figura 3.1.

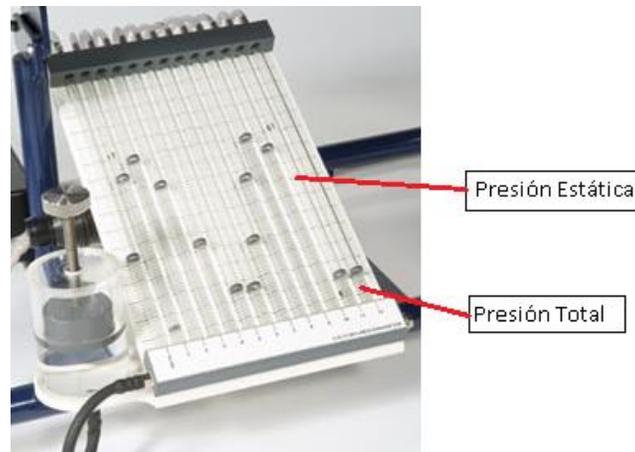


Figura 3. 1 Manómetro de tubos inclinados. Fuente [56]

Para la obtención de los datos de presión estática y total. En el menú principal del software proporcionado en el túnel de viento se selecciona el tipo de análisis, para este caso de estudio se seleccionó la opción de *Static, Dynamic and Total Pressure*, el cual permite determinar las distintas presiones y la velocidad local en el tubo Pitot como se muestra en la figura 3.2.

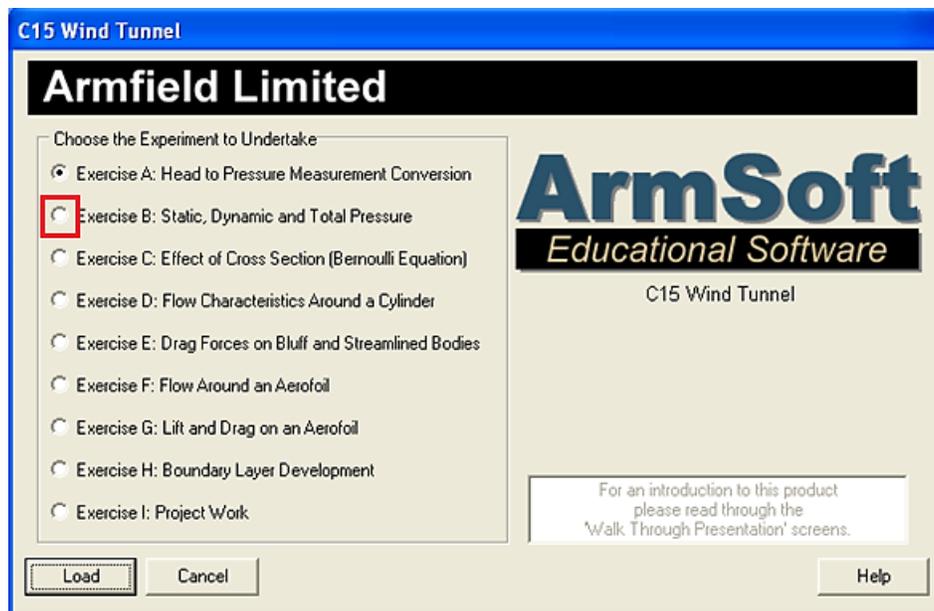


Figura 3. 2: Menú principal software Armfield. Fuente. [Autores]

Luego de seleccionar el ejercicio B, presionamos en Load, donde se muestra el menú de la figura 3.3.

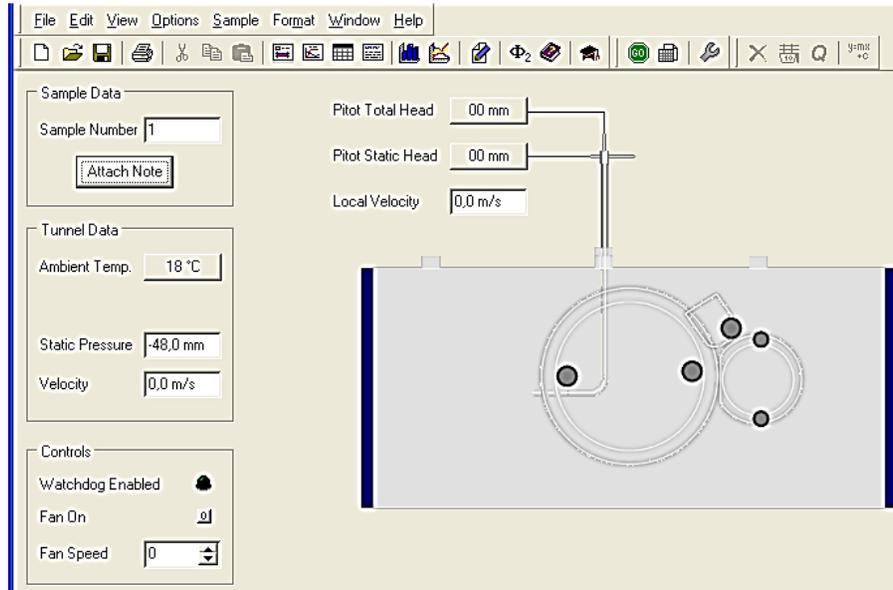


Figura 3. 3: Ventana principal de ensayo seleccionado. Fuente [Autores]

Se enciende el ventilador con la opción *Fan On*, en la pestaña *Fan Speed*, se incrementa o disminuye la velocidad del ventilador, hasta lograr la velocidad que se estableció previamente para el análisis, para este caso se manipulo la velocidad del ventilador, hasta tener una velocidad promedio de 2.46 m/s, y una temperatura de 18 grados centígrados, que equivale a la temperatura en el área del túnel de viento.

Cuando se ha fijado los datos anteriores, se introducen los datos de presión del tubo pitot, para ello se introduce el valor del tubo 13 en *Pitot Total Head*, y el valor de presión del tubo 12 en la opción *Pitot Static Head*, para así determinar la velocidad en el punto del tubo Pitot, dicha velocidad se muestra en la ventana *Local Velocity*.

Para la adquisición de datos es necesario esperar un tiempo para la estabilización del flujo en el túnel de viento y que los datos proporcionados por este sean los correctos, luego de dicha espera se configuro el software de tal manera, que la adquisición de datos se realice de forma automática, en un número de 300, con un intervalo de tiempo de 2 segundos, la configuración se muestra en la figura 3.4.

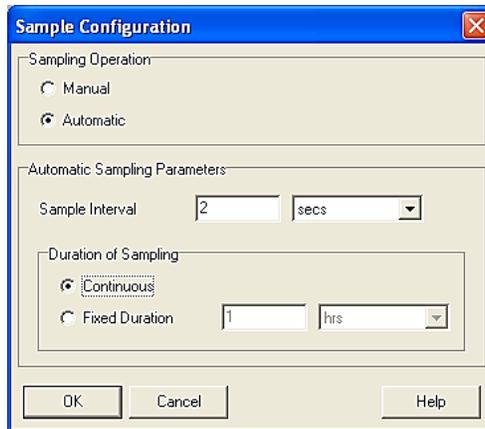


Figura 3. 4: Menú de configuración de datos. Fuente [Autores]

Luego de fijar estos parámetros se empieza con la adquisición de datos, hasta obtener la cantidad de datos necesarios para el análisis, como se muestra en la figura 3.5.

Sample Number	Notes	Fan Speed [%]	Static Pressure p [mm]	Ambient Temperature T [°C]	Density of Air [kg/m ³]	Tunnel Air Velocity [m/s]	Pitot Total Head [mm]
1		0	-48,0	18,0	1,211	0,0	0,0
2		0	-48,0	18,0	1,211	0,0	0,0
3		0	-48,0	18,0	1,211	0,0	0,0
4		0	-48,0	18,0	1,211	0,0	0,0
5		0	-48,0	18,0	1,211	0,0	0,0
6		0	-48,0	18,0	1,211	0,0	0,0

Figura 3. 5: Menú de adquisición de datos. Fuente [Autores]

3.1.1 Ubicación de los sensores

Para la ubicación de los sensores en las diferentes posiciones, las los ejes coordenados de las sección de pruebas del túnel de viento se muestran en la figura 3.6.

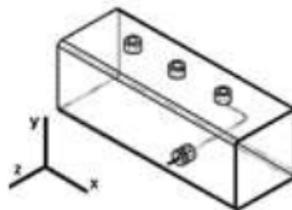


Figura 3. 6: Ejes coordenados del túnel de viento. Fuente [Autores]

Para la obtención de los resultados en los diferentes modelos analizados, los sensores fueron colocados en base a la norma AMCA 203-90, [57] la cual establece que la adquisición en las tomas se deben distribuir en secciones iguales, y sugiere que se use por lo menos 15 puntos de medición en la sección de pruebas, para poder tener resultados de calidad.

Teniendo en cuenta lo que establece la norma, se procedieron a tomar datos, variando las distancias del sensor en el eje X y en el eje Y, de esta manera se determinaron los distintos puntos en las diferentes ubicaciones como se demuestra a continuación.

3.1.1.1 Ubicación de los sensores perfil H.

Para la adquisición de datos de este modelo se colocó en dos posiciones, con diferentes ubicaciones del sensor para la adquisición de datos, para su posterior comprobación y análisis, como se muestra en la figura 3.7 y 3.8.

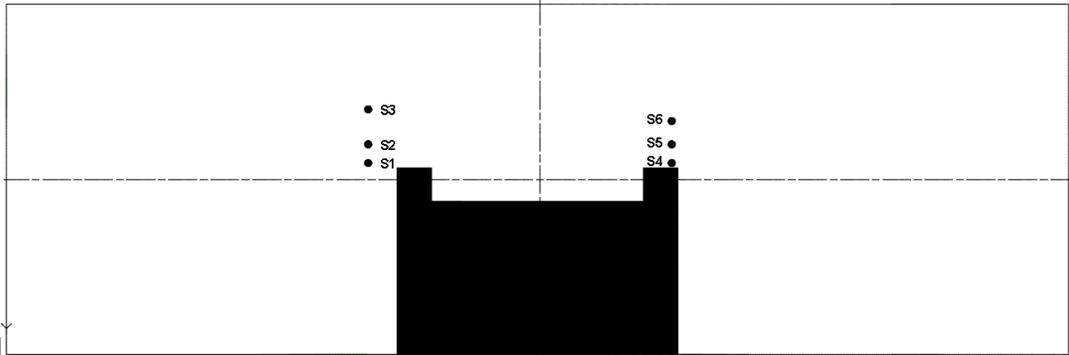


Figura 3. 7: Ubicación de sensores perfil H (Centrado). Fuente [Autores]

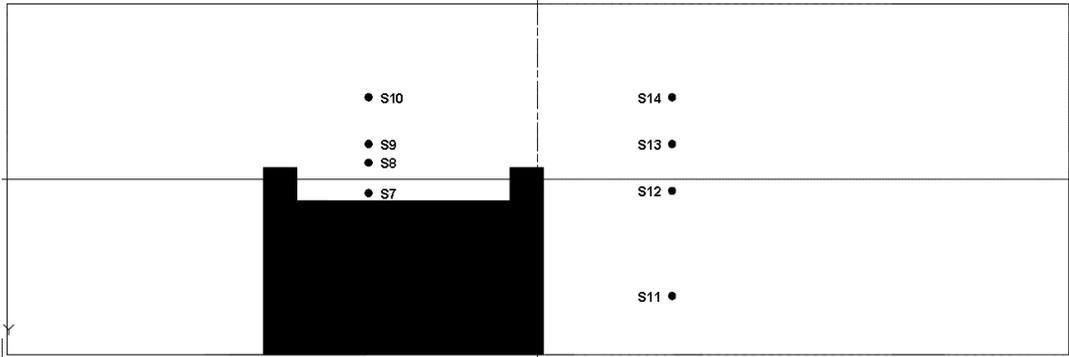


Figura 3. 8: Ubicación de sensores perfil H (Desplazado-Izquierda). Fuente [Autores]

Las coordenadas de las diferentes ubicaciones del sensor en la sección de pruebas del túnel de viento se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1: Coordenadas de sensores en perfil H. Fuente [Autores]

SENSOR	COORDENADA X (mm)	COORDENADA Y (mm)
S1	-72.5	82
S2	-72.5	90
S3	-72.5	105
S4	57.5	82
S5	57.5	90
S6	57.5	100
S7	-72.5	69
S8	-72.5	82
S9	-72.5	90
S10	-72.5	110
S11	57.5	25
S12	57.5	70
S13	57.5	90
S14	57.5	110

3.1.1.2 Ubicación de los sensores Perfil Triangular

Al igual que el modelo de perfil H, para este caso de análisis se colocó la maqueta en tres diferentes posiciones, para obtener la mayor cantidad de datos posible para su posterior análisis, las distintas ubicaciones de los sensores en el modelo de perfil triangular colocado en diferentes posiciones se muestra en las figuras 3.9, 3.10 y 3.11.

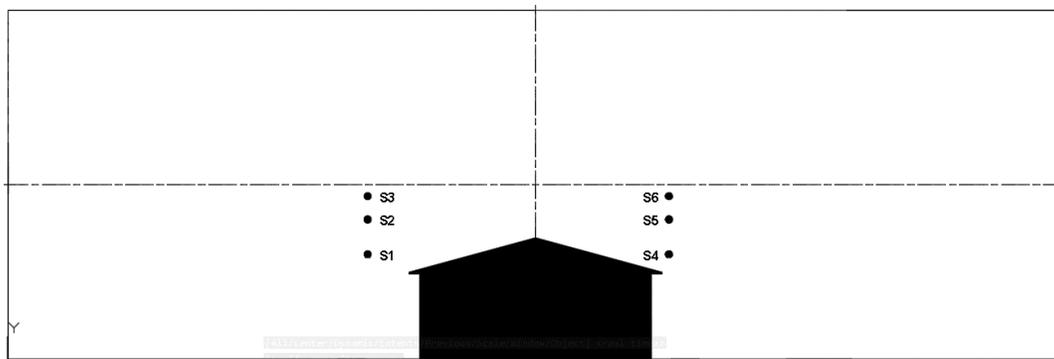


Figura 3. 9: Ubicación de sensores perfil triangular (Centrado). Fuente [Autores]

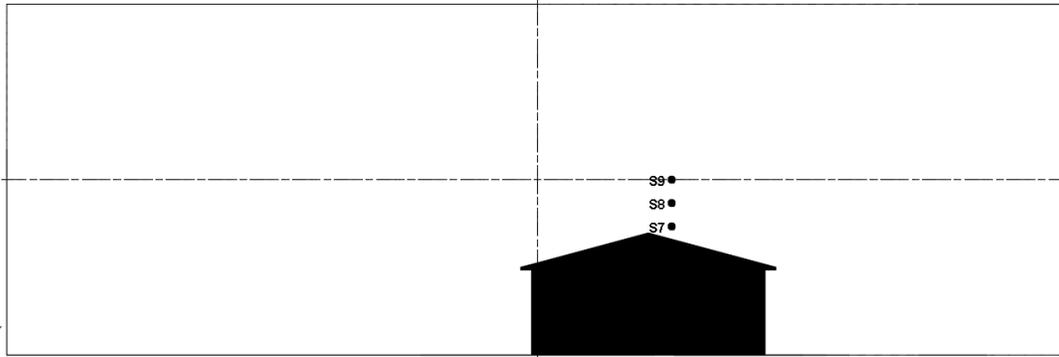


Figura 3. 10: Ubicación de sensores perfil triangular (Desplazado-Derecha). Fuente [Autores]

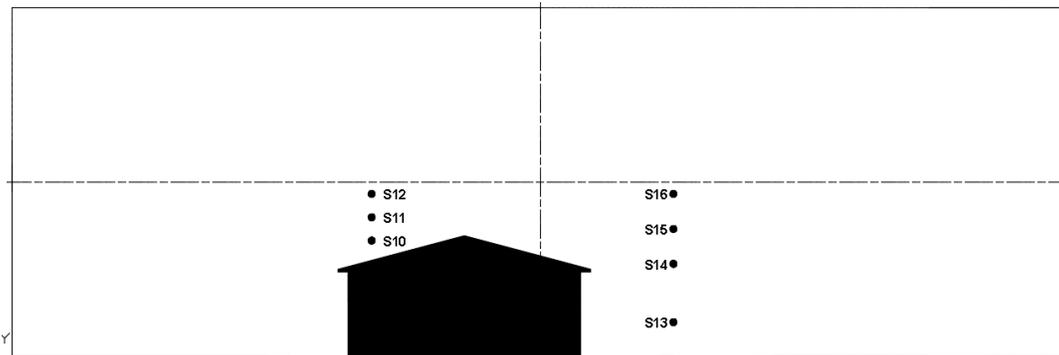


Figura 3. 11: Ubicación de sensores perfil triangular (Desplazado-Izquierda) Fuente [Autores]

Las coordenadas de la ubicación de los sensores colocados en el perfil de techo colgante se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3. 2: Coordenadas de sensores en perfil triangular. Fuente [Autores]

SENSOR	COORDENADA X (mm)	COORDENADA Y (mm)
S1	-72.5	45
S2	-72.5	60
S3	-72.5	70
S4	57.5	45
S5	57.5	60
S6	57.5	70
S7	57.5	55
S8	57.5	65
S9	57.5	75
S10	-72.5	50
S11	-72.5	60
S12	-72.5	70
S13	57.5	15

S14	57.5	40
S15	57.5	55
S16	57.5	70

3.1.1.3 Ubicación de los sensores en techo colgante

Teniendo en cuenta las mismas consideraciones que los dos modelos anteriores, los sensores se colocaron en el modelo como se muestra en las figuras 3.12 y 3.13.

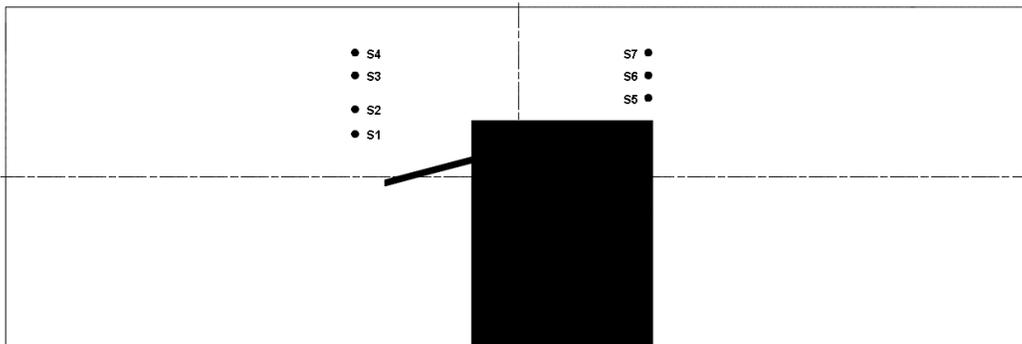


Figura 3. 12: Ubicación de sensores techo colgante (Centrado). Fuente [Autores]

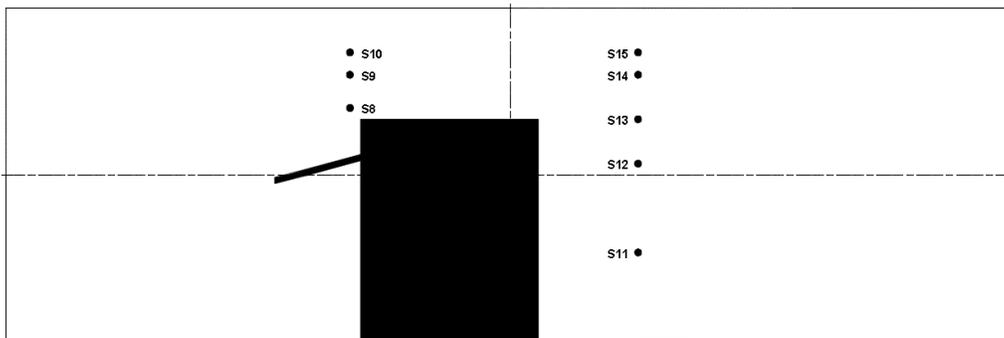


Figura 3. 13: Ubicación de sensores techo colgante (Desplazado- Izquierda). Fuente [Autores]

En la tabla 3.3 se muestran las coordenadas de la ubicación de los sensores en el perfil triangular.

Tabla 3. 3: Coordenadas de sensores en techo colgante. Fuente [Autores]

SENSOR	COORDENADA X (mm)	COORDENADA Y (mm)
S1	-72.5	94

S2	-72.5	105
S3	-72.5	120
S4	-72.5	130
S5	57.5	110
S6	57.5	120
S7	57.5	130
S8	-72.5	105
S9	-72.5	120
S10	-72.5	130
S11	57.5	40
S12	57.5	80
S13	57.5	100
S14	57.5	120
S15	57.5	130

3.2 DATOS OBTENIDOS EN TÚNEL DE VIENTO

Para la recolección de datos en el túnel de viento, se usaron los instrumentos y el software del túnel de viento que se indicaron anteriormente, para ello se tuvo en cuenta los lugares más vulnerables al viento en cada una de las estructuras, de esa forma se tienen los siguientes resultados para los diferentes modelos que se detallan a continuación.

3.2.1 Datos de techo perfil H

Los datos obtenidos en los diferentes puntos establecidos para el análisis se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3. 4: Resultados de velocidades en perfil H. Fuente [Autores]

SENSOR	Presión estática (mm)	Temperatura Ambiente (°C)	Densidad de aire (kg/m³)	Velocidad de entrada (m/s)	Presión total PITOT (mm)	Presión Estática PITOT (mm)	Velocidad tubo PITOT (m/s)
S1	0.402	18.000	1.211	2.546	17.780	19.070	4.571
S2	0.409	18.000	1.211	2.568	17.800	19.360	5.028
S3	0.406	18.000	1.211	2.559	18.630	20.290	5.388
S4	0.391	18.000	1.211	2.510	21.960	21.920	0.808
S5	0.356	18.000	1.211	2.393	23.220	23.230	0.402
S6	0.373	18.000	1.211	2.449	21.700	22.410	3.523

S7	0.408	18.000	1.211	2.564	22.080	22.210	1.447
S8	0.410	18.000	1.211	2.633	19.030	19.002	0.700
S9	0.402	18.000	1.211	2.546	21.833	21.850	0.545
S10	0.412	18.000	1.211	2.484	18.260	22.330	8.435
S11	0.398	18.000	1.211	2.321	19.780	19.480	2.205
S12	0.411	18.000	1.211	2.573	22.130	22.310	1.708
S13	0.302	18.000	1.211	2.196	23.160	23.710	2.982
S14	0.354	18.000	1.211	2.386	22.403	24.530	6.097

3.2.2 Datos de perfil triangular

En la tabla 3.5 se muestran los resultados de velocidad obtenidos en los puntos de estudio.

Tabla 3. 5 Resultados de velocidades en perfil triangular. Fuente [Autores]

SENSOR	Presión estática (mm)	Temperatura Ambiente (°C)	Densidad de aire (kg/m³)	Velocidad de entrada (m/s)	Presión total PITOT (mm)	Presión Estática PITOT (mm)	Velocidad tubo PITOT (m/s)
S1	0.389	18.000	1.211	2.503	22.805	23.250	2.789
S2	0.321	18.000	1.211	2.270	22.805	23.260	2.821
S3	0.307	18.000	1.211	2.215	22.705	23.120	2.694
S4	0.340	18.000	1.211	2.336	23.350	23.570	1.888
S5	0.362	18.000	1.211	2.413	22.980	23.770	3.577
S6	0.359	18.000	1.211	2.404	22.910	23.780	3.754
S7	0.360	18.000	1.211	2.406	19.424	19.950	3.033
S8	0.352	18.000	1.211	2.377	18.900	19.650	3.486
S9	0.362	18.000	1.211	2.413	18.314	19.220	3.980
S10	0.342	18.000	1.211	2.340	21.430	22.610	4.372
S11	0.327	18.000	1.211	2.286	20.230	21.200	3.964
S12	0.351	18.000	1.211	2.372	19.580	20.350	3.669
S13	0.368	18.000	1.211	2.432	23.600	23.480	1.394
S14	0.349	18.000	1.211	2.365	23.550	23.700	1.559
S15	0.335	18.000	1.211	2.317	23.150	23.760	3.144
S16	0.352	18.000	1.211	2.381	23.000	23.820	3.645

3.2.3 Datos de techo colgante

En la tabla 3.6 se muestran los resultados de velocidad obtenidos en los puntos de estudio.

Tabla 3. 6: Resultados obtenidos en techo colgante. Fuente [Autores]

SEN SO R	Presión estática (mm)	Temperatur a Ambiente (°C)	Densida d de aire (kg/m³)	Velocida d de entrada (m/s)	Presió n total PITOT (mm)	Presión Estática PITOT (mm)	Velocida d tubo PITOT (m/s)
S1	0.361	18.000	1.211	2.410	17.280	19.710	6.518
S2	0.322	18.000	1.211	2.273	17.880	19.570	5.436
S3	0.353	18.000	1.211	2.382	17.980	19.570	5.272
S4	0.336	18.000	1.211	2.324	17.980	19.670	5.436
S5	0.358	18.000	1.211	2.401	17.020	19.996	7.214
S6	0.362	18.000	1.211	2.415	17.020	19.906	7.104
S7	0.355	18.000	1.211	2.388	18.670	19.830	7.013
S8	0.297	18.000	1.211	2.179	17.180	19.460	6.314
S9	0.317	18.000	1.211	2.249	17.080	19.760	6.846
S10	0.341	18.000	1.211	2.341	17.080	19.682	6.745
S11	0.344	18.000	1.211	2.349	18.930	18.960	0.724
S12	0.323	18.000	1.211	2.276	18.543	18.970	2.732
S13	0.317	18.000	1.211	2.253	17.150	19.930	6.972
S14	0.315	18.000	1.211	2.242	17.450	19.930	6.585
S15	0.307	18.000	1.211	2.215	17.650	19.930	6.314

3.3 SIMULACIÓN MEDIANTE MODELO CFD (ANSYS).

3.3.1 Software empleado

Para la simulación y obtención de resultados numéricos, se usó el software comercial CFD Fluent, que es modulo del software de ingeniería ANSYS, cuyas características se indicaron anteriormente.

3.3.2 Procedimiento de Simulación

Luego de analizar los modelos, se procede a fijar los parámetros de los modelos físicos que se van a estudiar, para el posterior mallado del modelo y la obtención de resultados para el posterior análisis.

Para el desarrollo de las simulaciones, es necesaria la ejecución de tres pasos importantes, para poder llegar a los resultados, que servirán para la comprobación con el modelo analizado en el túnel de viento, estos procesos son:

3.3.2.1 Pre-proceso

Consiste en los datos previos para realizar la simulación, aquí se introducen todos los puntos de inicio para la solución de ecuaciones, en esta parte se deben definir de una manera clara: la geometría del dominios, además de la creación de una malla adecuada para la resolución numérica del problema, la selección de los modelos que usara el software para la resolución numérica, además de ello propiedades físicas del fluido y de otros materiales que formaran parte de la solución, se debe definir las condiciones de contorno del problema de una manera clara y según las propiedades de cada contorno.

3.3.2.2 Solución

Esta etapa es plenamente la etapa de cálculo, en esta se soluciona el problema planteado, usando las condiciones establecidas en el pre-proceso.

3.3.2.3 Post-proceso

En esta etapa se muestran los resultados luego de la solución del problema planteado anteriormente, para que estos puedan ser analizados y tratados de una manera adecuada.

3.3.3 Condiciones de mallado

Para el análisis de los diferentes modelos estudiados, se usaron dos tipos diferentes de malla, las cuales cuentan con las mismas características para todos los modelos estudiados.

3.3.3.1 Mallado estructurado

Para la realización de la primera malla se usó un mallado estructurado, esta malla se creó por defecto de Fluent, únicamente cambiando las consideraciones de tamaño para los elementos que conforman la malla.

Las características de la malla creada por defecto en Fluent se muestran en la figura 3.14.

Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
<input type="checkbox"/> Relevance	75
Sizing	
Use Advanced Size Fun...	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal A...	75.0 °
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	Default (4)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (5.2004e-005 m)
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	Default (5.2004e-005 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (5.2004e-003 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (1.0401e-002 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.13440)
Minimum Edge Length	1.44e-002 m

Figura 3. 14: Características de MALLA 1. Fuente [Autores]

3.3.3.2 Mallado no estructurado

Se usó un mallado no estructurado conformado por elementos triangulares, debido a que este tipo de elementos logra un mejor resultado en geometrías consideradas complejas, pero este tipo de mallado exige determinar de una manera adecuada los parámetros de la malla para que esta sea de calidad y por ende los resultados sean lo más próximo a los datos reales del modelo.

Para el segundo mallado se usó el mismo criterio para todos los modelos, así se creó una malla que este conformada por elementos triangulares, con un tamaño de elemento de

además se creó un refinamiento de malla en el contorno del modelo, dicho refinamiento permitirá ver los efectos producidos por la capa límite que genera el viento sobre el modelo, las configuraciones de la malla se muestran en las figuras 3.15 y 3.16.

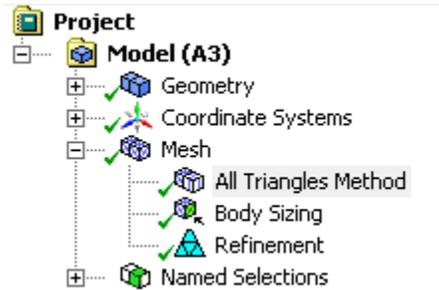


Figura 3. 15: Componentes de MALLA 2. Fuente [Autores]

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Method	Triangles
Element Midside Nodes	Use Global Setting
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	1.5e-003 m
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	74.0 °
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default
<input type="checkbox"/> Local Min Size	Default (2.388e-004 m)
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	7 Edges
Definition	
Suppressed	No
<input type="checkbox"/> Refinement	3

Figura 3. 16: Características de MALLA 2. Fuente [Autores]

3.3.4 Condiciones de contorno

Para el estudio de los tres modelos, se usaron las mismas consideraciones de malla, con la cual se esperan obtener los resultados más aproximados a los reales, para ello se definieron condiciones de contorno en cada modelo a ser estudiado, bajo los siguientes conceptos:

3.3.4.1 Perfil-wall

Es la geometría del modelo a estudiar, para la simulación en las propiedades, esta condición de contorno se considera estacionaria (Stationary Wall), y de tipo Wall.

3.3.4.2 Wall

Es la geometría que representa la pared del túnel de viento, es de Type *Wall* y como consideraciones se tiene que considerar como Stationary Wall.

3.3.4.3 Inlet

Las consideraciones de esta condición de contorno están dadas como Type *velocity-inlet* , con una velocidad de entrada determinada en m/s, por ensayos previos realizados en túneles de viento y por las recomendaciones de Fluent, se considera un valor de 5% para la Turbulent Intensity , y una Turbulent Viscosity Ratio con un valor de 10.

3.3.4.4 Outlet

Para esta condición de contorno se considera Type: *pressure-outlet*, con propiedades de *blacflow Turbulent Intensity* de 5%, y un *Blacflow Turbulent Viscosity Ratio* de 10.

Las condiciones de contorno usadas con los tres modelos y en las distintas posiciones de análisis se muestran en la figura 3.17.

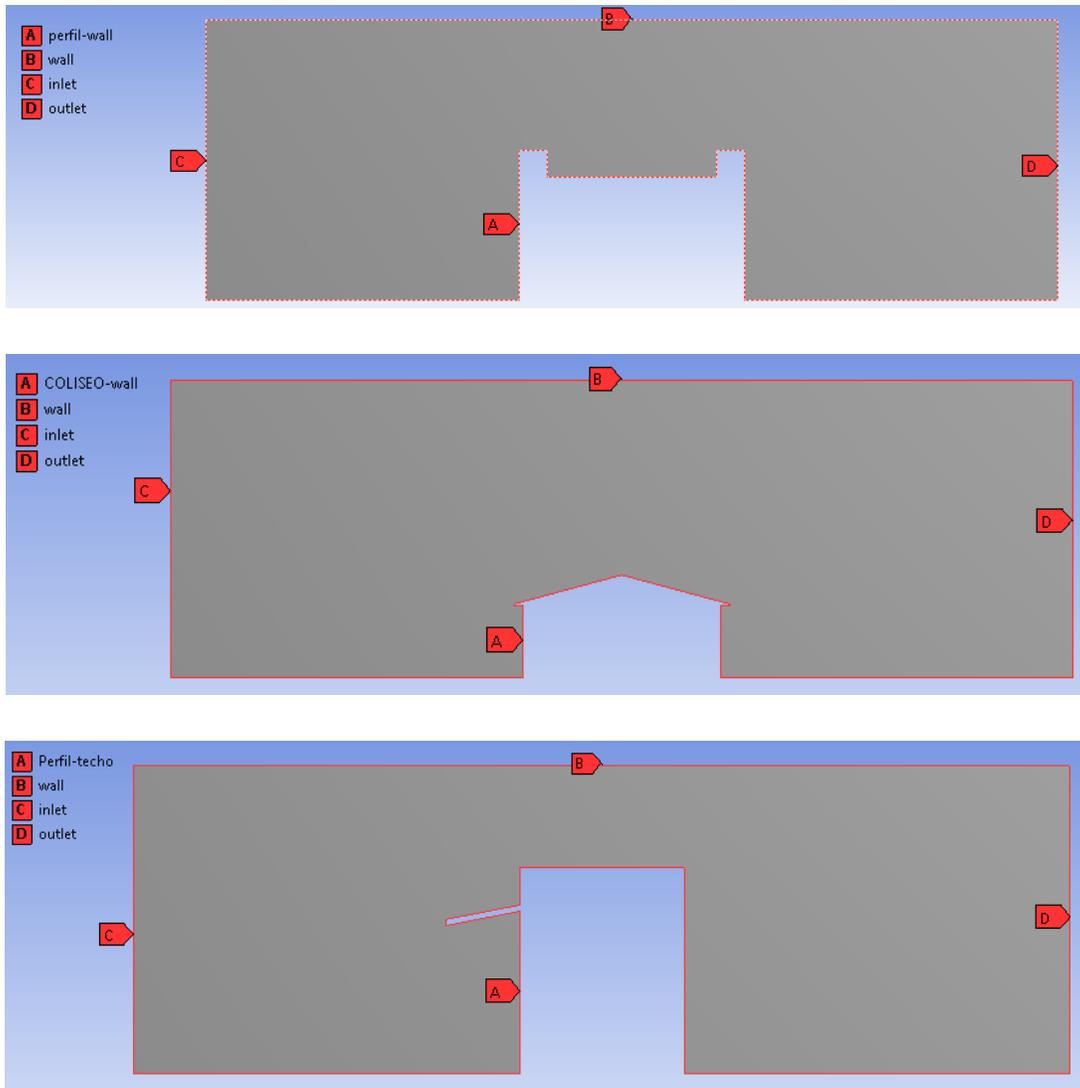


Figura 3. 17: Condiciones de contorno usadas en modelos. Fuente [Autores]

3.3.5 Mallado de perfiles

3.3.5.1 Mallado Perfil H

El perfil a analizar se muestra en la figura 3.18. Las dimensiones de las condiciones de contornos del túnel de viento, del modelo a analizar se muestran en la figura 3.18.



Figura 3. 18. Detalle de perfil H. Fuente [Autores]

3.3.5.1.1 Mallado estructurado (Defecto de Fluent)

En la figura 3.19 se muestra el mallado estructurado creado por defecto en Fluent, esta malla, sin realizar ningún cambio en los elementos que la conforma ni en su tamaño.

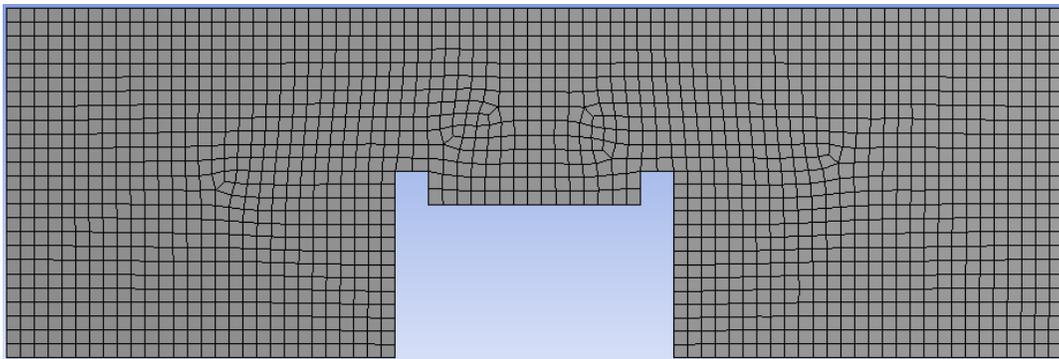


Figura 3. 19: Modelo de perfil H con MALLA 1. Fuente [Autores]

3.3.5.1.2 Mallado no estructurado (Refinamiento)

La segunda malla utilizada consiste en una malla creada con elementos triangulares, a los cuales se les asignó un tamaño de elementos de 0.0015m, además de esto se realizó un refinamiento de la malla en el contorno del modelo de estudio, para poder visualizar de mejor manera el efecto que se produce por la capa límite que se da por el flujo de viento sobre el modelo, los diferentes tipos de mallado se visualizan en la figura 3.20.

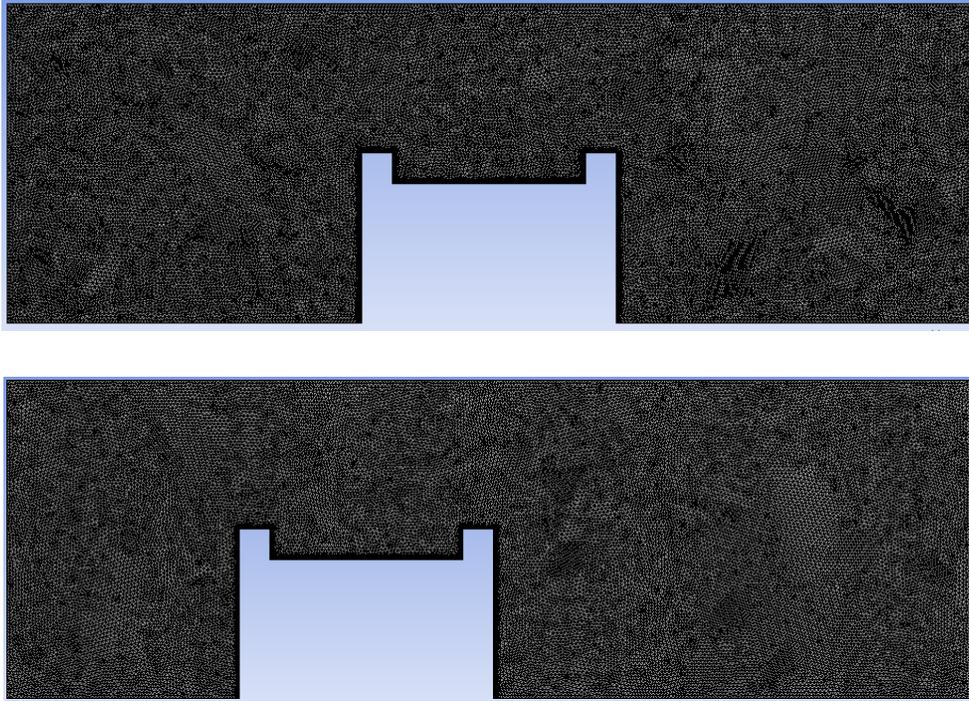


Figura 3. 20: Modelo de perfil H con MALLA 2 en dos posiciones. Fuente [Autores]

En la figura 3.21 se muestra en detalle el refinamiento realizado sobre las paredes del modelo a estudiar, este refinamiento es el mismo para las dos posiciones del modelo en el túnel de viento.

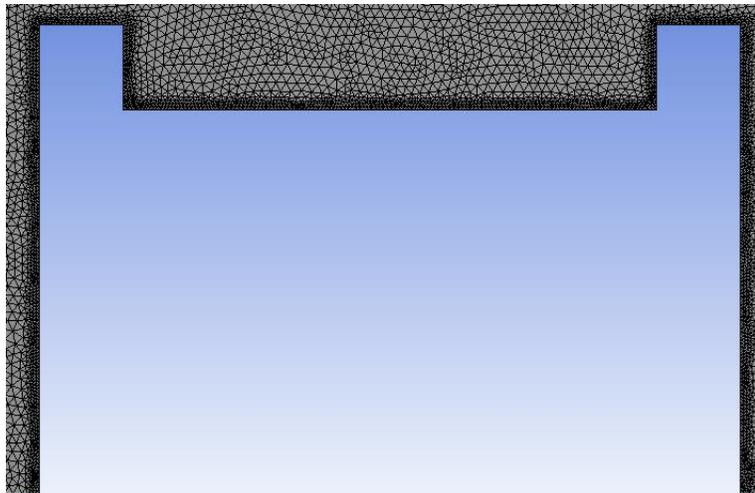


Figura 3. 21: Detalle de refinamiento sobre perfil H. Fuente [Autores]

En la tabla 3.7 se muestran las propiedades de los dos tipos de malla utilizados en el análisis.

Tabla 3. 7: Características de malla de perfil H. Fuente [Autores]

	Posición 1 (Centrado)		Posición 2 (Desplazado)	
	Malla 1	Malla 2	Malla 1	Malla 2
# Nodos	1304	33481	1893	31091
# Elementos	1204	65395	1774	60827
Paso de tiempo	2 seg	2 seg	2 seg	2 seg
Tiempo final	10 min	10 min	10 min	10 in

3.3.5.2 Mallado Perfil Triangular

El detalle del perfil triangular se muestra en la figura 3.22.

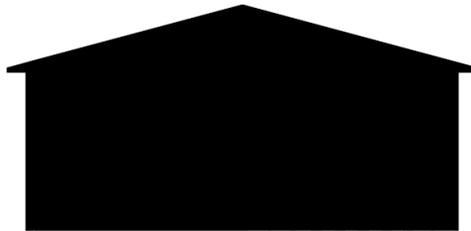


Figura 3. 22: Detalle constructivo de perfil triangular. Fuente [Autores]

3.3.5.2.1 Mallado estructurado (defecto de Fluent)

La primera malla estructurada creada por defecto en Fluent se muestra en la figura 3.23. Cabe mencionar que para las tres ubicaciones del modelo se usó el mismo principio de mallado automático.

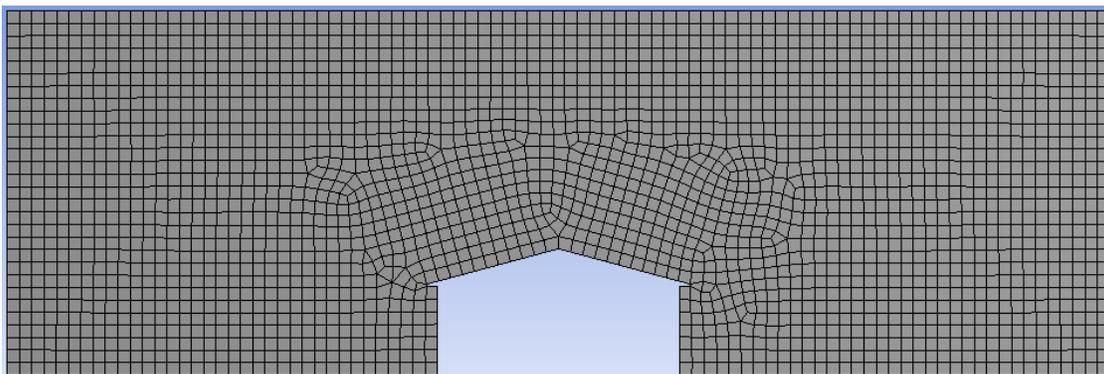


Figura 3. 23: Mallado de perfil triangular con MALLA 1. Fuente [Autores]

3.3.5.2.2 Mallado no estructurado (Refinamiento)

Y una segunda malla creada con elementos triangulares, dichos elementos tienen un tamaño de 0.0015m, en el contorno del modelo se aplicó un refinamiento de la malla, para una mejor visualización de los efectos producidos por la capa límite creada por flujo de viento en el modelo a estudiar.

En la figura 3.24 se muestran los diferentes tipos de mallado en las condiciones de contorno.

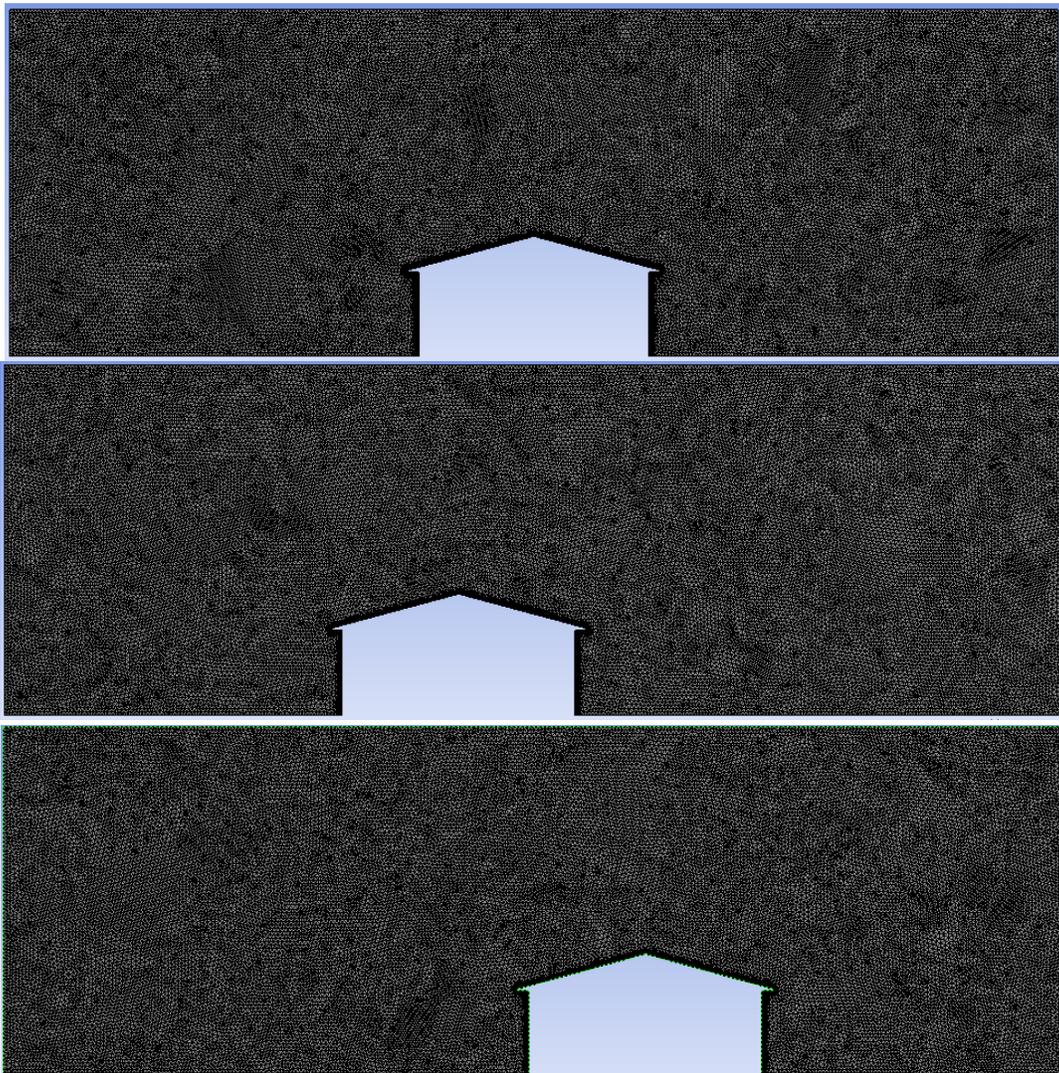


Figura 3. 24: Mallado de perfil triangular con MALLA 2. Fuente [Autores]

En la figura 3.25 se muestra el refinamiento realizado en el contorno del modelo a estudiar, esto para todos los casos de la simulación.

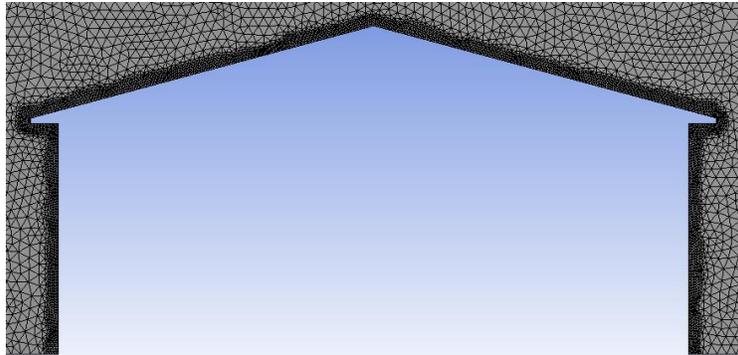


Figura 3. 25: Detalle de refinamiento en perfil triangular. Fuente [Autores]

Las propiedades de las geometrías y de los mallados se muestran en la tabla 3.8.

Tabla 3. 8: Características de malla de perfil triangular. Fuente [Autores]

	Posición 1 (Centrado)		Posición 2 (Desplazado Izquierda)		Posición 3 (Desplazado Derecha)	
	Malla 1	Malla 2	Malla 1	Malla 2	Malla 1	Malla 2
# Nodos	2595	33787	2583	31628	2575	31755
# Elementos	2468	66295	2454	62112	2448	62366
Paso de tiempo	2 seg	2 seg	2 seg	2 seg	2 seg	2 seg
Tiempo final	10 min	10 min	10 min	10 min	10 min	10 min

3.3.5.3 Mallado Techo Colgante

En la figura 3.26 se muestra en detalle el perfil de techo colgante a ser analizado.

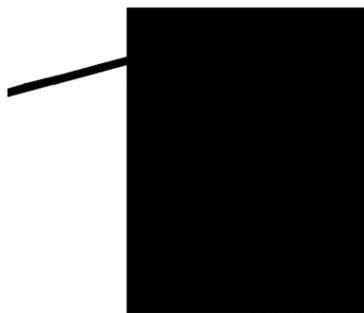


Figura 3. 26: Detalle de perfil de techo colgante. Fuente [Autores]

3.3.5.3.1 Mallado Estructurado (Defecto de Fluent)

La malla creada por defecto de Fluent se muestra en la figura 3.27, para todos los modelos estudiados se usa el mismo principio de mallado automático creado por el software.

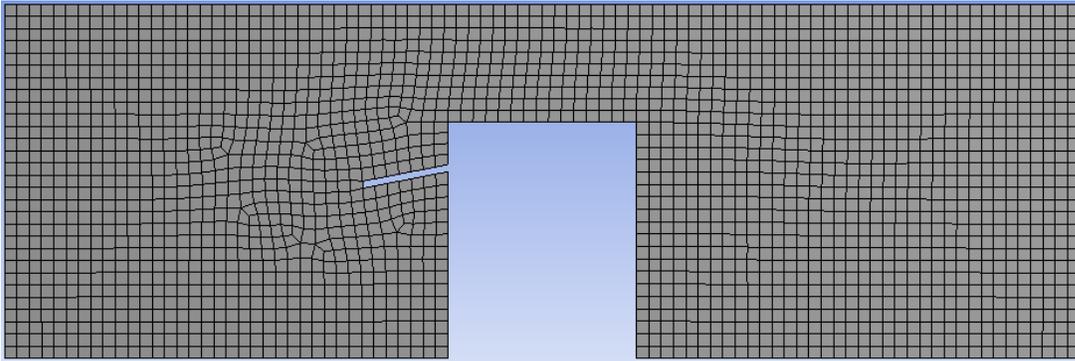
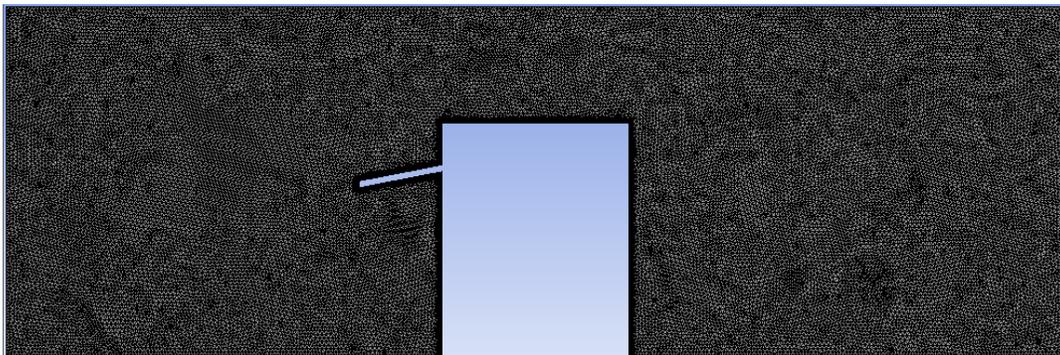


Figura 3. 27: Mallado de perfil de techo colgante con MALLA 1. Fuente [Autores]

3.3.5.3.2 Mallado no Estructurado (Refinamiento)

Para la realización de la malla refinada se usaron elementos triangulares los cuales cuentan con un tamaño de elemento de 0.001 m, en el contorno del modelo se aplicó un refinamiento de la malla como se muestra en la figura 3.28, para lograr una mejor visualización del fenómeno de capa limite que se presenta por el flujo del viento sobre el modelo.



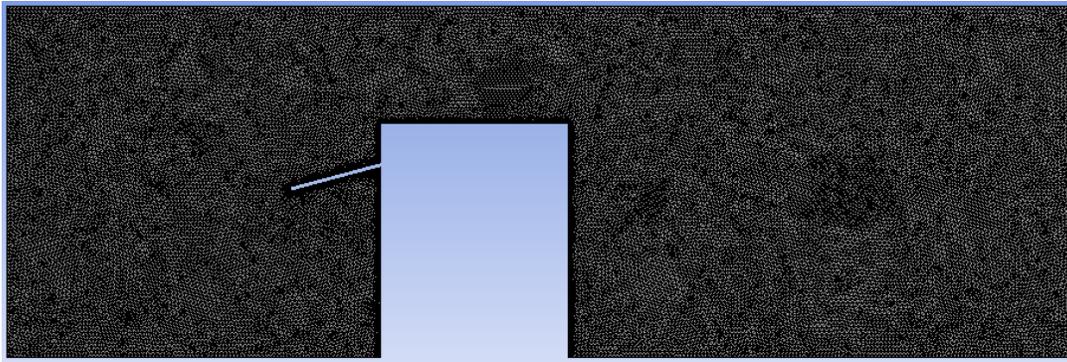


Figura 3. 28: Mallado de perfil de techo colgante MALLA 2. Fuente [Autores]

El refinamiento de la malla sobre el contorno del modelo, se muestra en la figura 3.29.

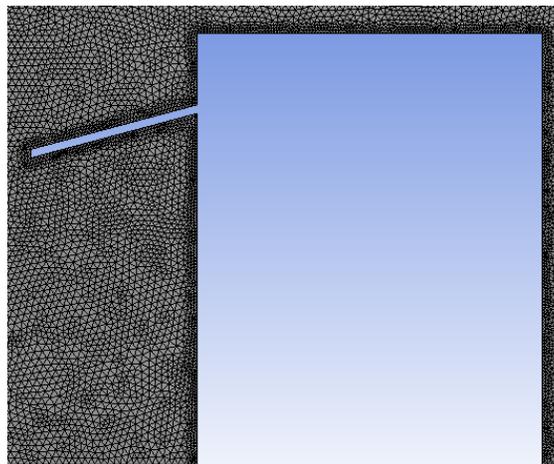


Figura 3. 29: Detalle de refinamiento en perfil de techo colgante. Fuente [Autores]

En la tabla 3.9 se muestran los componentes de los diferentes tipos de malla usados en las distintas ubicaciones del modelo estudiado.

Tabla 3. 9: Características de malla de en techo colgante. Fuente [Autores]

	Posición 1 (Centrado)		Posición 2 (Desplazado Izquierda)	
	Malla 1	Malla 2	Malla 1	Malla 2
# Nodos	2388	72208	2014	66014
# Elementos	2246	141869	1883	130184
Paso de tiempo	2 seg	2 seg	2 seg	2 seg
Tiempo final	10 min	10 min	10 min	10 in

3.4 RESULTADOS SIMULACIÓN CFD FLUENT

Los resultados para cada modelo estudiado en las posiciones establecidas se muestran en las figuras.

3.4.1 Resultados perfil en H

3.4.1.1 Posición 1 (Modelo Centrado t = 0, 2, 4, 6 y 8 seg)

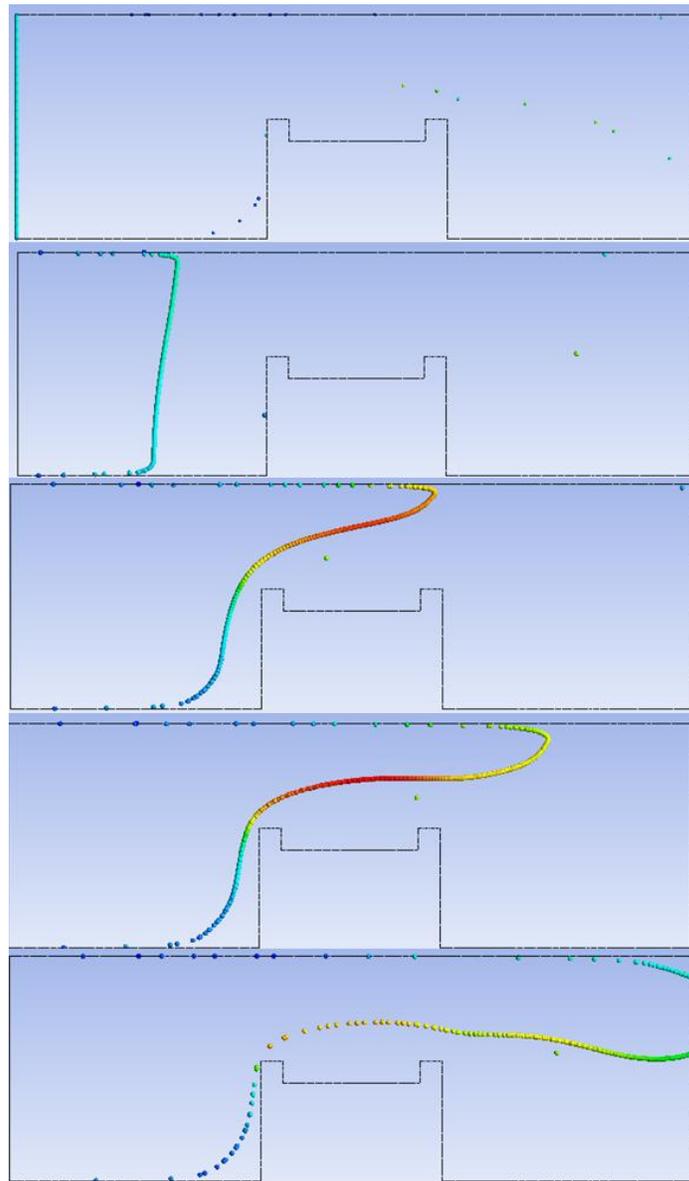


Figura 3. 30 Línea de Flujo de Viento t = 0, 2, 4, 6 y 8 s. de arriba hacia abajo. Fuente [Autores]

3.4.1.2 Posición 1 (Modelo Centrado)

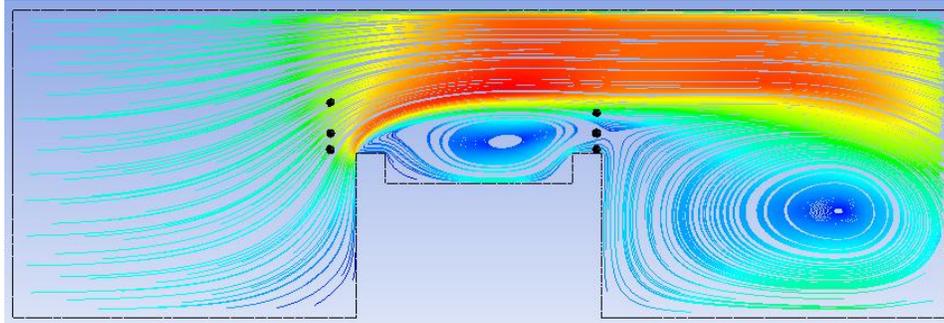


Figura 3. 31: Líneas de corriente en perfil H (Centrado). Fuente [Autores]

3.4.1.3 Posición 2 (Modelo Desplazado-Izquierda t = 0, 2, 4, 6 y 8 seg)

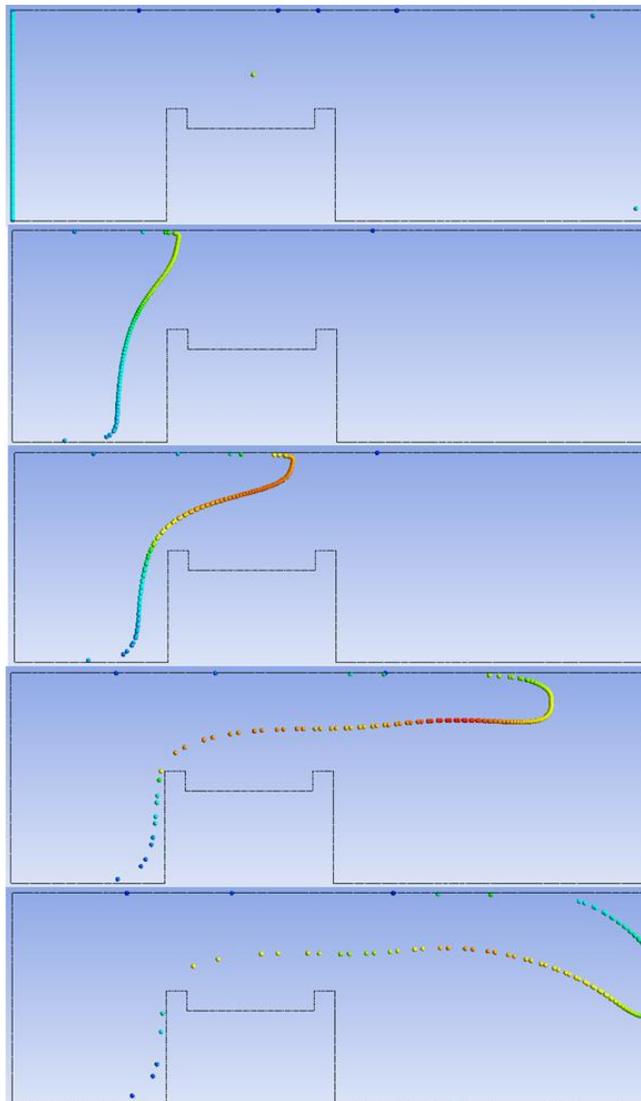


Figura 3. 32 Línea de Flujo de Viento t = 0–2–4–6–8 s. de arriba hacia abajo. Fuente [Autores]

3.4.1.4 Posición 2 (Modelo Desplazado-Izquierda)

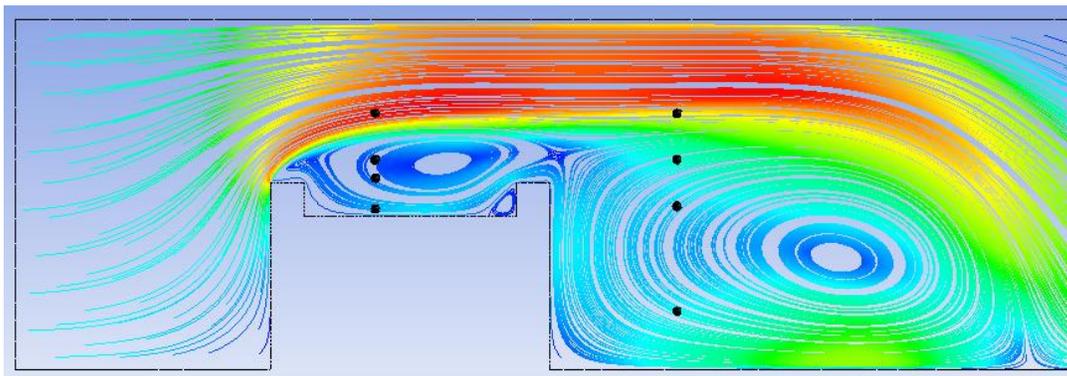


Figura 3. 33: Líneas de corriente en Perfil H (Desplazado- Izquierda). Fuente [Autores]

Los resultados obtenidos en la simulación, usando las mismas ubicaciones de los sensores en el túnel de viento se muestran en la tabla 3.10.

Tabla 3. 10: Resultados de simulaciones en perfil H. Fuente [Autores]

SENSO R	Temperatura Ambiente (°C)	Densidad de aire (kg/m ³)	Velocidad de entrada (m/s)	Velocidad Simulación (m/s) MALLA 1	Velocidad Simulación (m/s) MALLA 2
S1	18	1.211	2.568	4.72165	4.58275
S2	18	1.211	2.546	5.11176	4.99986
S3	18	1.211	2.559	5.18457	5.43573
S4	18	1.211	2.421	0.134407	0.83599
S5	18	1.211	2.484	0.729171	0.405591
S6	18	1.211	2.533	4.05162	3.56364
S7	18	1.211	2.546	0.579613	1.43925
S8	18	1.211	2.564	0.436472	0.70599
S9	18	1.211	2.573	0.579613	0.546292
S10	18	1.211	2.549	0.436472	8.57912
S11	18	1.211	2.510	0.76319	2.24624
S12	18	1.211	2.593	0.544275	1.78173
S13	18	1.211	2.486	1.80901	2.93148
S14	18	1.211	2.396	1.80901	6.09053

3.4.2 Resultados de perfil triangular (Coliseo)

3.4.2.1 Posición 1 (Modelo Centrado t = 6, 12, 18 y 24 seg)

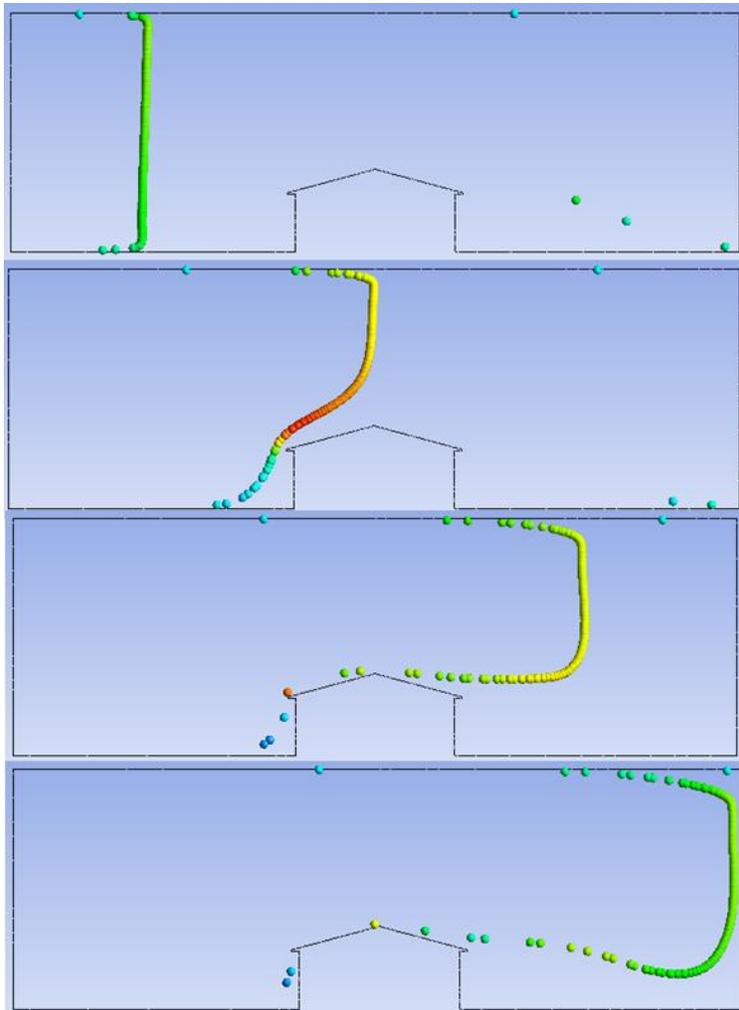


Figura 3. 34 Línea de Flujo de Viento $t = 6, 12, 18$ y 24 s. de arriba hacia abajo. Fuente [Autores]

3.4.2.2 Posición 1 (Modelo Centrado)

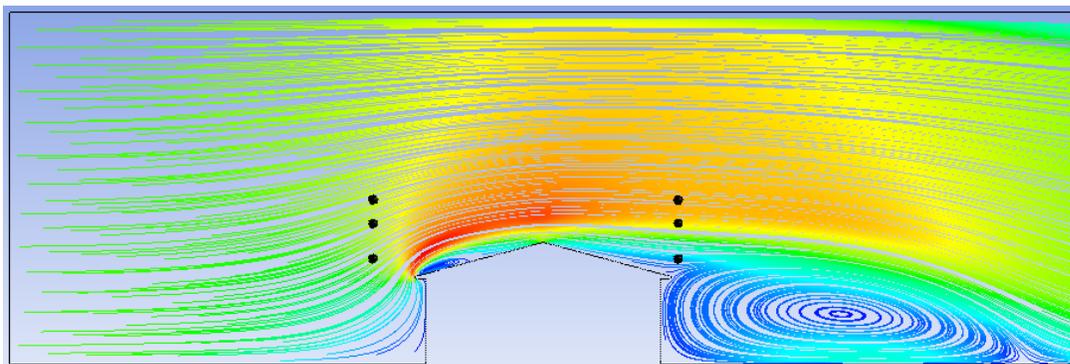


Figura 3. 35: Líneas de corriente perfil triangular (Centrado). Fuente [Autores]

3.4.2.3 Posición 2 (modelo desplazado hacia la derecha t = 6-12-18-24 seg)

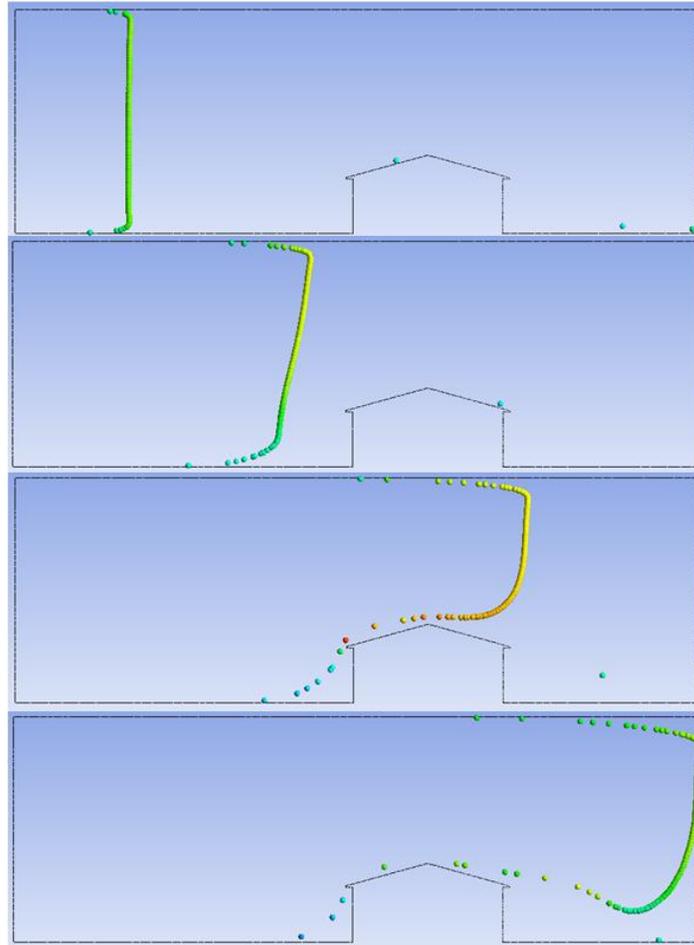


Figura 3. 36 Línea de Flujo de Viento t = 6, 12, 18 y 24 s. de arriba hacia abajo. Fuente [Autores]

3.4.2.4 Posición 2 (modelo desplazado hacia la derecha)

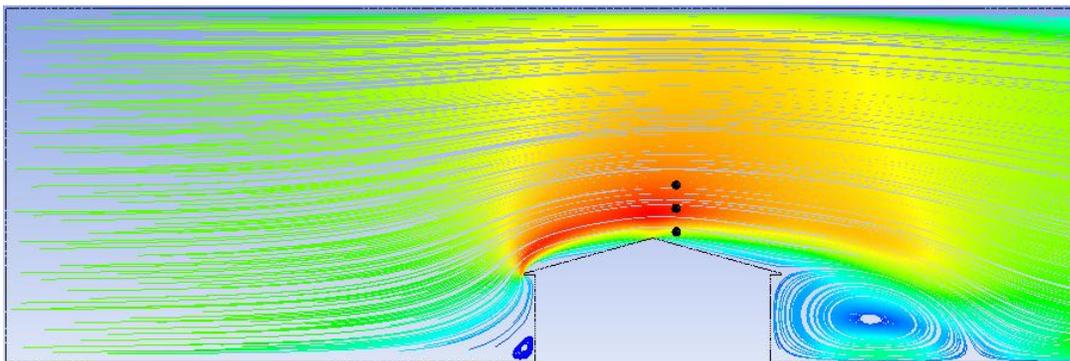


Figura 3. 37: Líneas de corriente perfil triangular (Desplazado-Derecha). Fuente [Autores]

3.4.2.5 Posición 3 (modelo desplazado hacia la izquierda t = 6, 12, 18 y 24 seg)

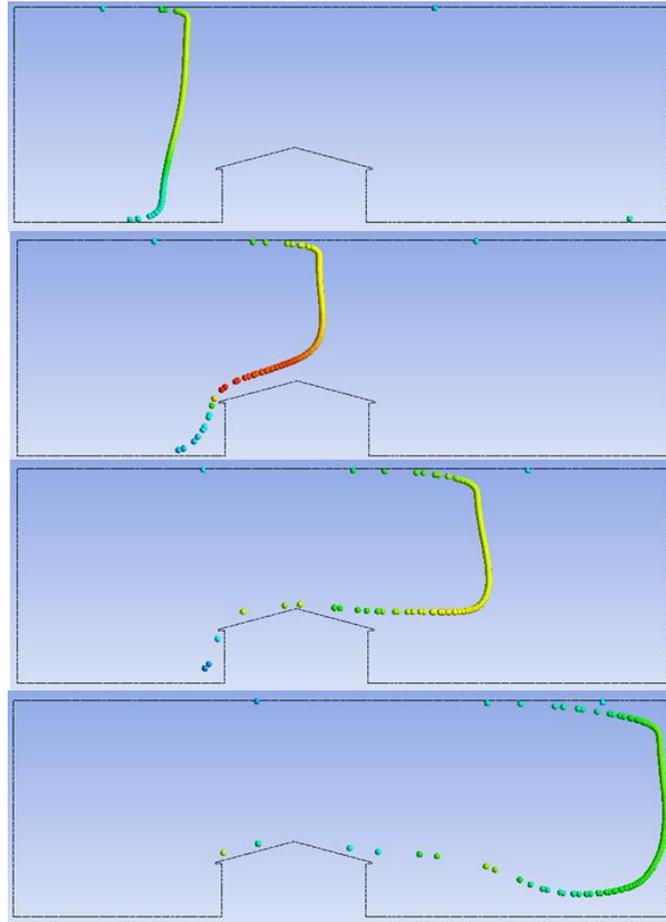


Figura 3. 38 Línea de Flujo de Viento t = 6, 12, 18 y 24 s. de arriba hacia abajo. Fuente [Autores]

3.4.2.6 Posición 3 (modelo desplazado hacia la izquierda)

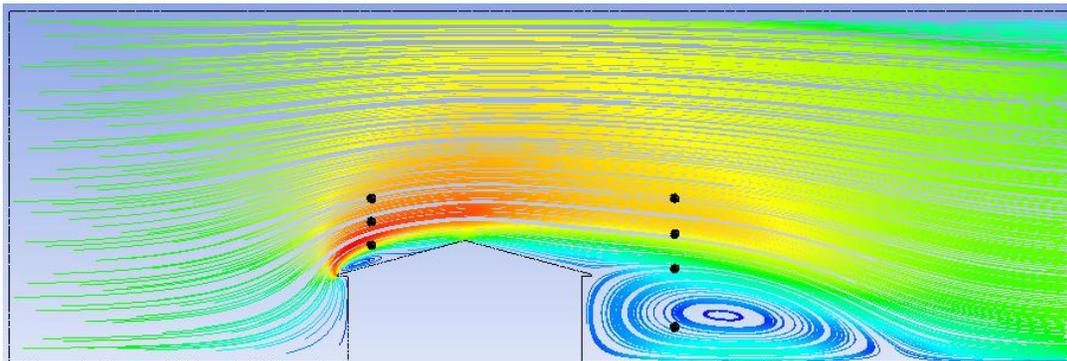


Figura 3. 39: Líneas de corriente perfil triangular (Desplazado-Izquierda). Fuente [Autores]

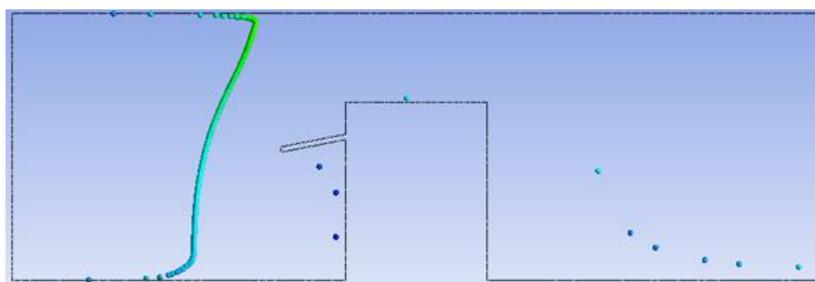
Los resultados de las simulaciones en la misma ubicación física de los sensores se muestran en la tabla 3.11

Tabla 3. 11: Resultados obtenidos en simulación de perfil triangular. Fuente [Autores]

SENSOR	Temperatura Ambiente (°C)	Densidad de aire (kg/m³)	Velocidad de entrada (m/s)	Velocidad de simulación MALLA 1 (m/s)	Velocidad de simulación MALLA 2 (m/s)
S1	18.000	1.211	2.503	2.68625	2.78081
S2	18.000	1.211	2.270	3.05358	2.81875
S3	18.000	1.211	2.215	3.13842	2.64150
S4	18.000	1.211	2.336	0.49469	1.82260
S5	18.000	1.211	2.413	2.85617	3.51973
S6	18.000	1.211	2.404	3.93605	3.79553
S7	18.000	1.211	2.406	2.03386	3.01849
S8	18.000	1.211	2.377	3.75643	3.368
S9	18.000	1.211	2.413	4.00528	3.97478
S10	18.000	1.211	2.340	3.81093	4.43547
S11	18.000	1.211	2.286	4.21627	3.87212
S12	18.000	1.211	2.372	3.97305	3.53795
S13	18.000	1.211	2.432	0.25568	1.3682
S14	18.000	1.211	2.365	0.25568	1.52769
S15	18.000	1.211	2.317	1.67192	3.17645
S16	18.000	1.211	2.381	3.74501	3.55921

3.4.3 Resultados perfil con techo colgante

3.4.3.1 Posición 1 (modelo centrado t = 4 , 8 y 13 seg)



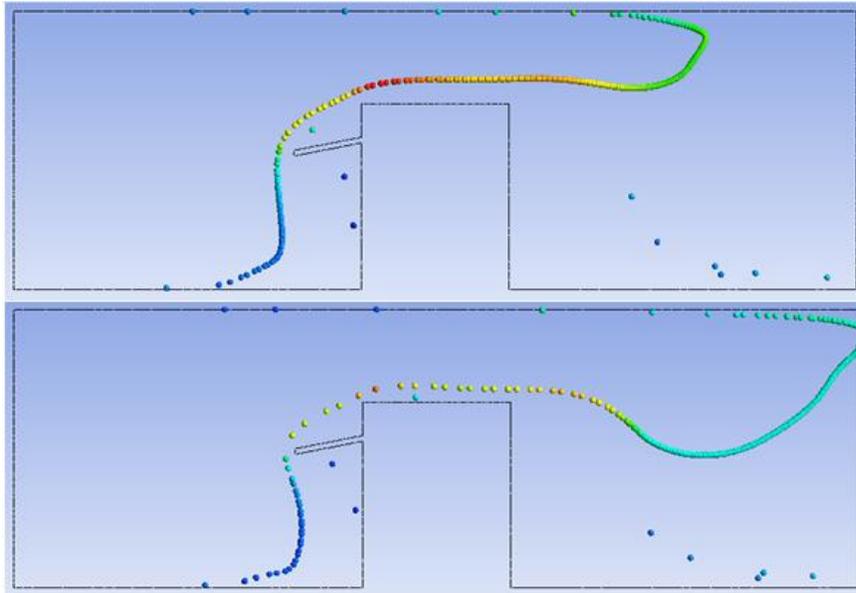


Figura 3. 40 Línea de Flujo de Viento t = 4, 8 y 13 s. de arriba hacia abajo. Fuente [Autores]

3.4.3.2 Posición 1 (modelo centrado)

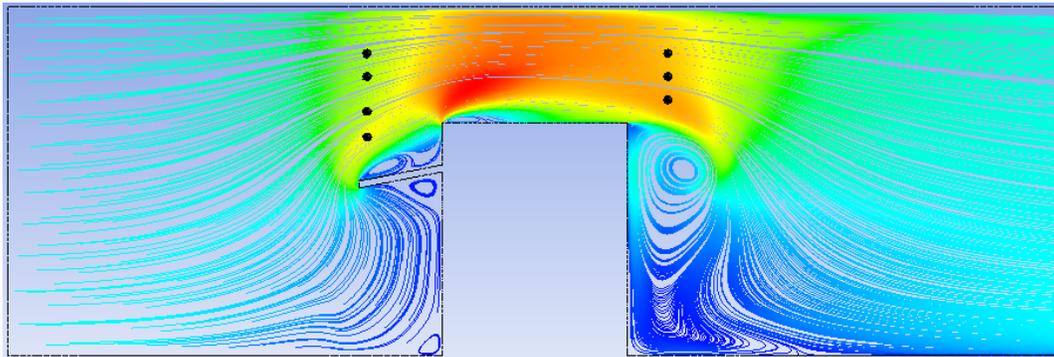
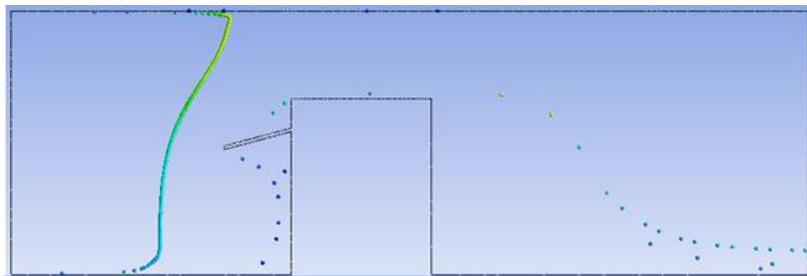


Figura 3. 41: Líneas de corriente techo colgante (Centrado). Fuente [Autores]

3.4.3.3 Posición 2 (modelo desplazado-izquierda t = 4, 8 y 13)



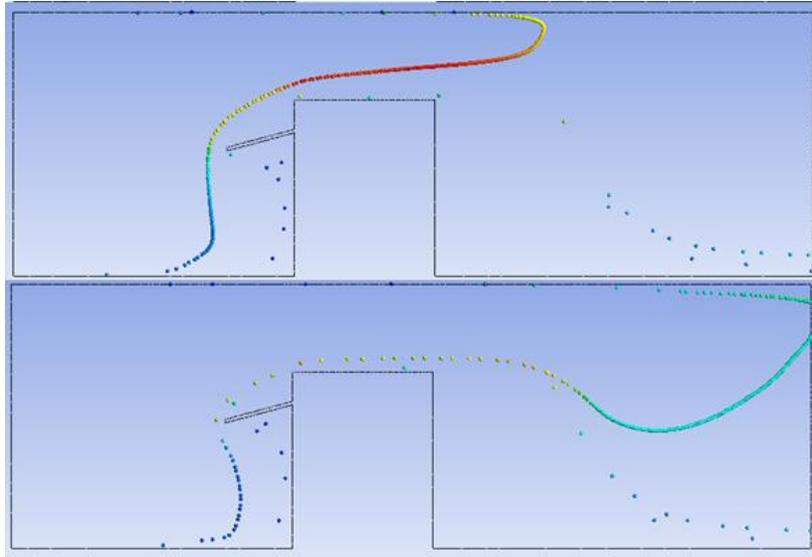


Figura 3. 42 Línea de Flujo de Viento t = 4, 8 y 13 s. de arriba hacia abajo. Fuente [Autores]

3.4.3.4 Posición 2 (modelo desplazado-izquierda)

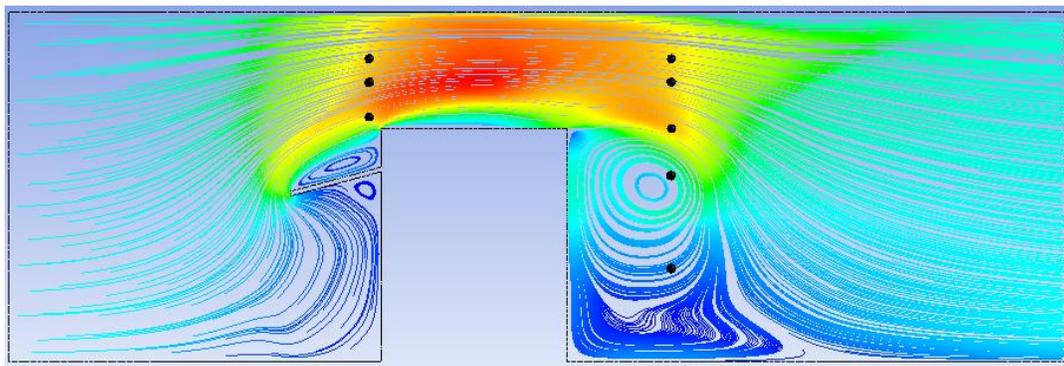


Figura 3. 43: Líneas de corriente de techo colgante (Desplazado-Izquierda). Fuente [Autores]

Los resultados obtenidos en la simulación, teniendo en cuenta las mismas ubicaciones de los sensores que el modelo real se muestran en la tabla 3.12:

Tabla 3. 12: Resultados obtenidos en simulación de techo colgante. Fuente [Autores]

SENSOR	Temperatura Ambiente (°C)	Densidad de aire (kg/m ³)	Velocidad de entrada (m/s)	Velocidad de simulación MALLA 1 (m/s)	Velocidad de simulación MALLA 2 (m/s)
S1	18	1.211	2.410	6.49485	6.52521

S2	18	1.211	2.273	6.39605	5.52668
S3	18	1.211	2.382	5.79714	5.13158
S4	18	1.211	2.324	5.61834	5.32593
S5	18	1.211	2.401	7.55893	7.07313
S6	18	1.211	2.415	7.79942	7.28828
S7	18	1.211	2.388	7.7553	7.13392
S8	18	1.211	2.179	6.8053	6.42331
S9	18	1.211	2.249	6.94074	6.92425
S10	18	1.211	2.341	6.48345	6.88257
S11	18	1.211	2.349	0.207177	0.75461
S12	18	1.211	2.276	0.302468	2.80636
S13	18	1.211	2.253	3.13521	6.74512
S14	18	1.211	2.242	7.28621	6.45331
S15	18	1.211	2.215	7.27456	6.39652

4. CAPÍTULO IV

COMPARACION Y ANALISIS DE RESULTADOS ENTRE MODELO CFD Y MODELO EXPERIMENTAL.

INTRODUCCIÓN

Posteriormente realizado ya la toma y obtención de datos en el túnel de viento y de igual manera la obtención de resultados en las simulaciones, se debe ahora analizar los resultados obtenidos tanto en la parte experimental como en las simulaciones realizadas tanto con mallado por defecto así como con mallado refinado, recordando que los valores de entrada considerados para ambos casos son los mismos, por tal razón después del análisis se efectuará la respectiva comparación de resultados entre el Túnel de Viento y Modelo CFD, para comprobar así la fiabilidad del programa ANSYS Fluent en ensayos de túnel de viento sobre techos de edificaciones.

Por tal razón en el capítulo actual se presenta el análisis y comparación de resultados, resaltando que los resultados experimentales y de simulación son tomados por rangos de tiempo durante cierto espacio de tiempo distintos para cada perfil.

Los datos a usar en este trabajo que entran en el análisis y posterior comparación son los de la velocidad obtenida por el sensor en puntos estratégicos mostrados en el capítulo anterior, comparándola con los datos computacionales, para así obtener la diferencia y error entre valores experimentales y simulados, y cuan próximos están unos de otros con respecto al tipo de mallado que se usa.

4.1 ANÁLISIS DE DATOS OBTENIDOS EN TÚNEL DE VIENTO Y LA SIMULACIÓN COMPUTACIONAL.

A continuación para el análisis de datos obtenidos de manera experimental y computacional nos apoyaremos mediante gráficos de dispersión con líneas suavizadas, en donde el eje de

las abscisas se maneja la magnitud del tiempo en segundos y en el eje de las ordenadas la magnitud de la velocidad en m/s.

Para una mejor comprensión de las gráficas no se visualizarán puntos por la gran cantidad de puntos de medición existentes, por tal razón solo se visualizarán líneas suavizadas como se indicó anteriormente.

Para el caso de análisis se observarán tres tendencias de línea, ya que son tres datos obtenidos en el capítulo anterior para cada punto en los diferentes perfiles, por tal razón a continuación veremos la tendencia que toma la velocidad en un punto durante un lapso de tiempo de manera: experimental, computacional con malla por defecto y computacional con malla refinada; a continuación podremos observar lo anteriormente dicho.

4.1.1 Edificación con Techo Perfil H



Figura 4. 1 Edificación Techo Perfil H. Fuente [Autores]

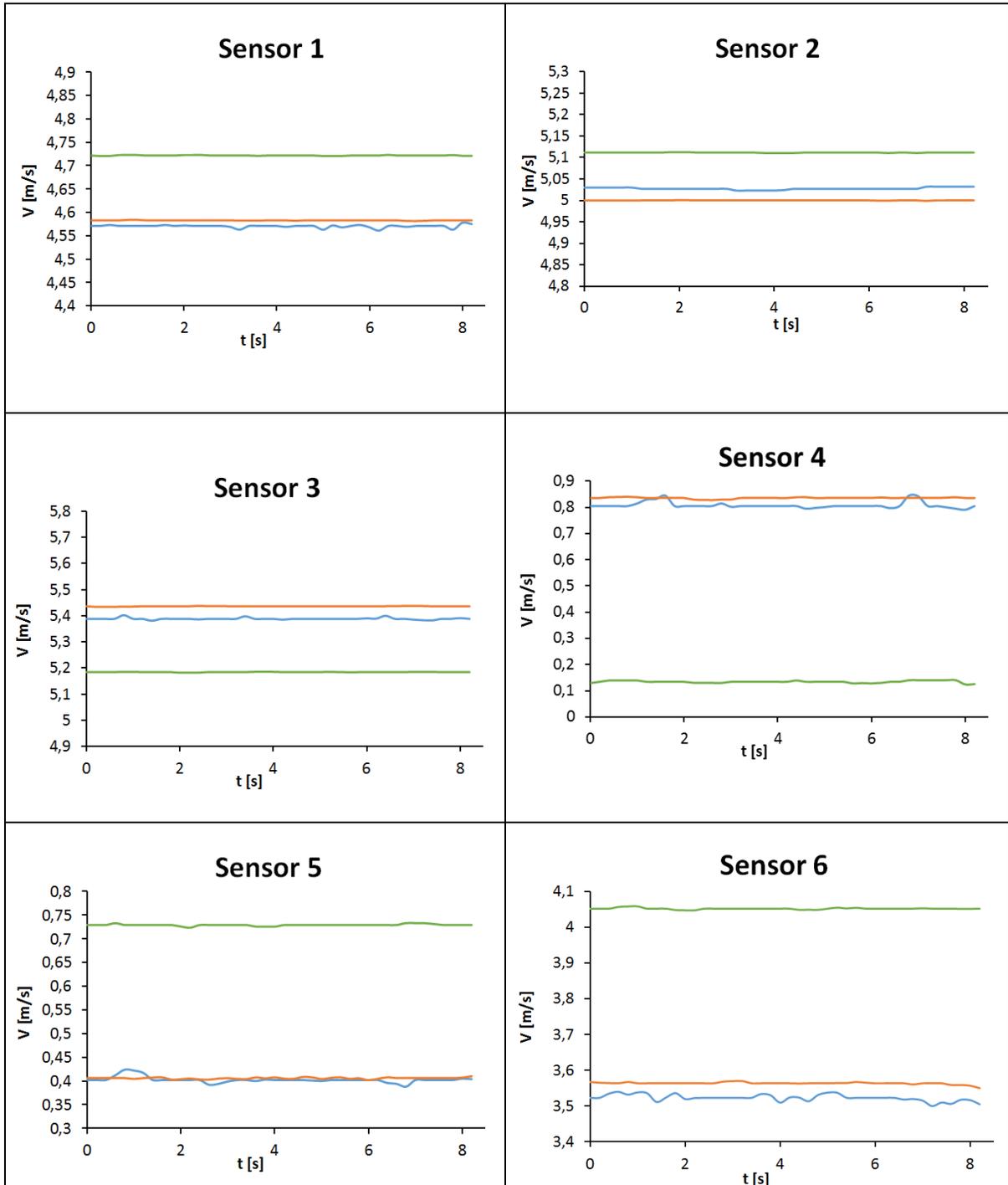
Para el caso de la edificación con Techo Perfil H, la toma de datos experimentales y computacionales se realizó durante 8,2 segundos cada 0,2 segundos cada toma de dato, siendo 42 registros de velocidad obtenidos para este perfil.

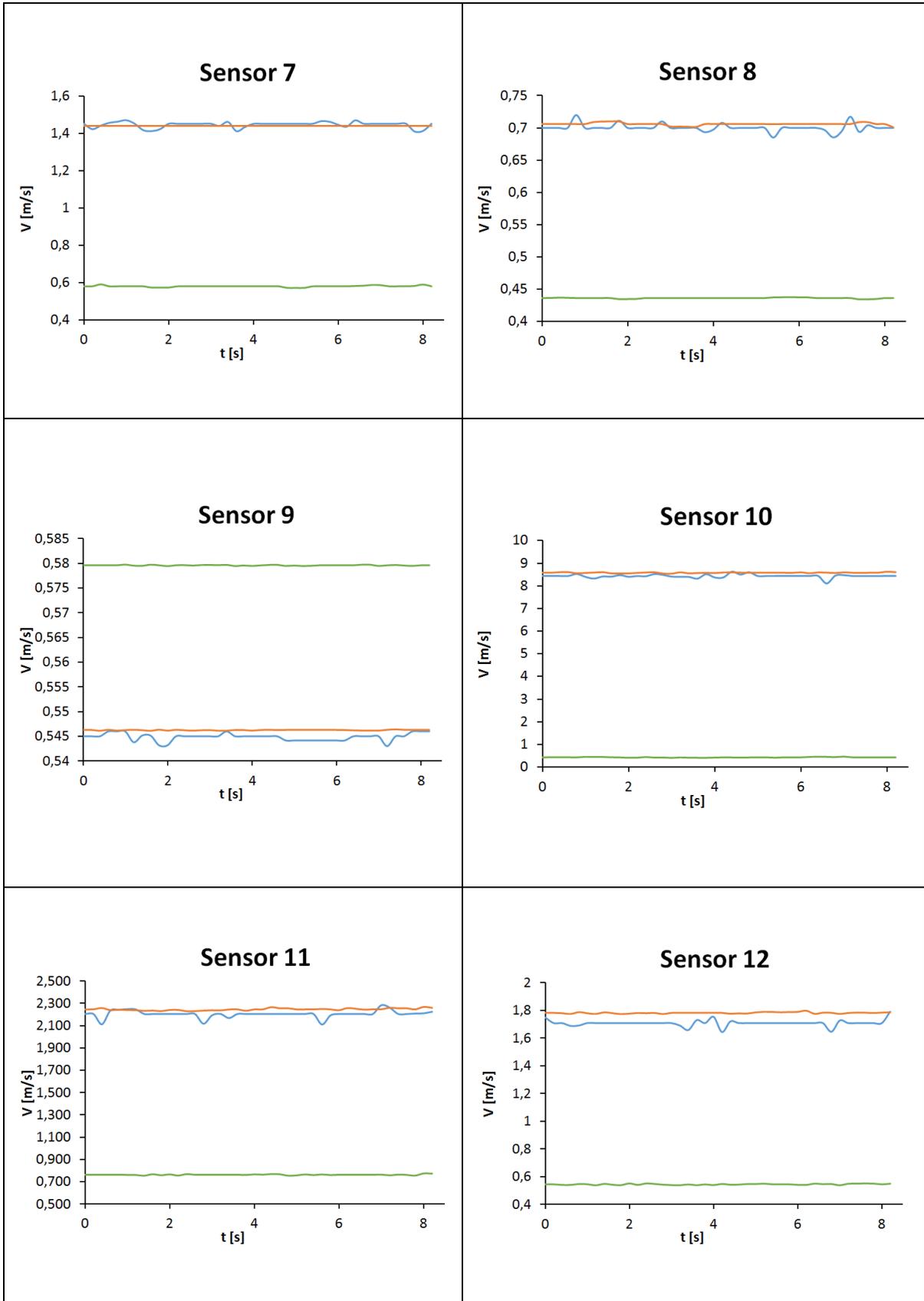
Los puntos estratégicos de medición se mostraron en las figuras 3.7 y 3.8, con los cuales a continuación mediante la Tabla 4.1, se mostrarán las gráficas para visualizar la tendencia de la velocidad en dichos puntos, para el caso experimental y los dos casos computacionales.

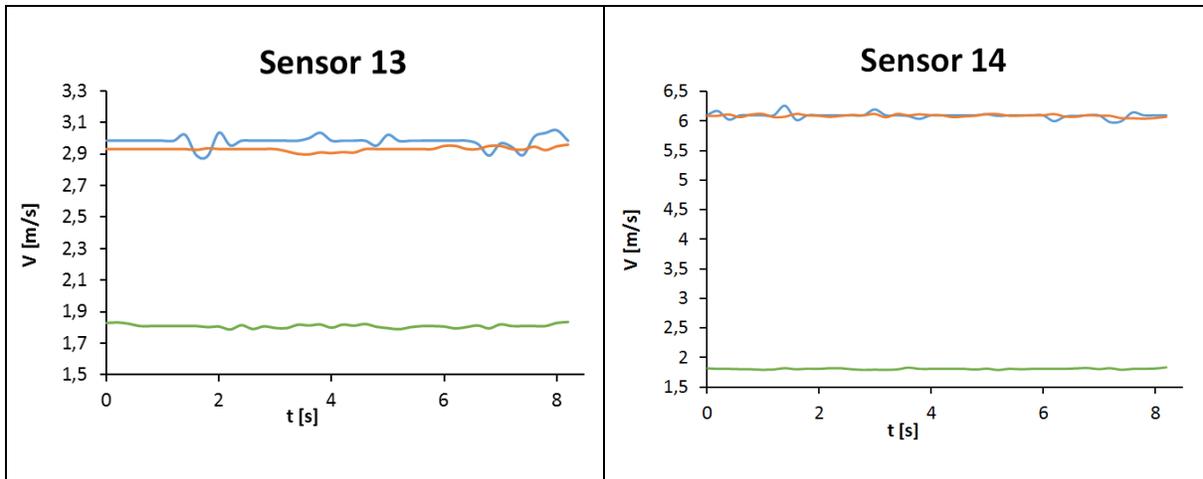
Para diferenciar los casos las líneas suavizadas se utilizaran con colores, a continuación la descripción y la tabla de gráficas.



Tabla 4. 1 Velocidades en Puntos Estratégicos Edificación Techo Perfil H. Fuente [Autores]







El comportamiento de la velocidad en los puntos del Perfil H es casi lineal a lo largo del tiempo, se dice casi ya que existen algunas variaciones, algo mayores en los registros de velocidades del túnel de viento, en cuanto a las simulaciones, los registros muestran variaciones muy pequeñas, tal cual como muestran las gráficas de la tabla 4.1.

Claramente se denota la cercanía que existe entre los valores experimentales y los computacionales de malla refinada, en tanto que, los valores computacionales de malla por defecto son algo más lejanos que los valores reales.

Un tema adicional al que se puede aplicar el análisis de la velocidad es con respecto a la distancia a lo largo de la cámara de prueba del túnel de viento en la simulación, por ende a continuación mostraremos una tabla contenida de graficas con la relación velocidad-distancia, siendo este análisis a diferentes alturas con respecto al modelo centrado, resumido esto en la tabla 4.2

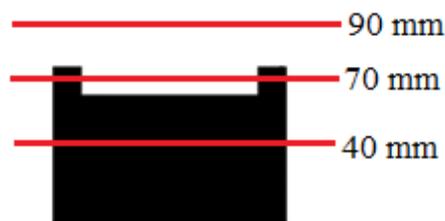
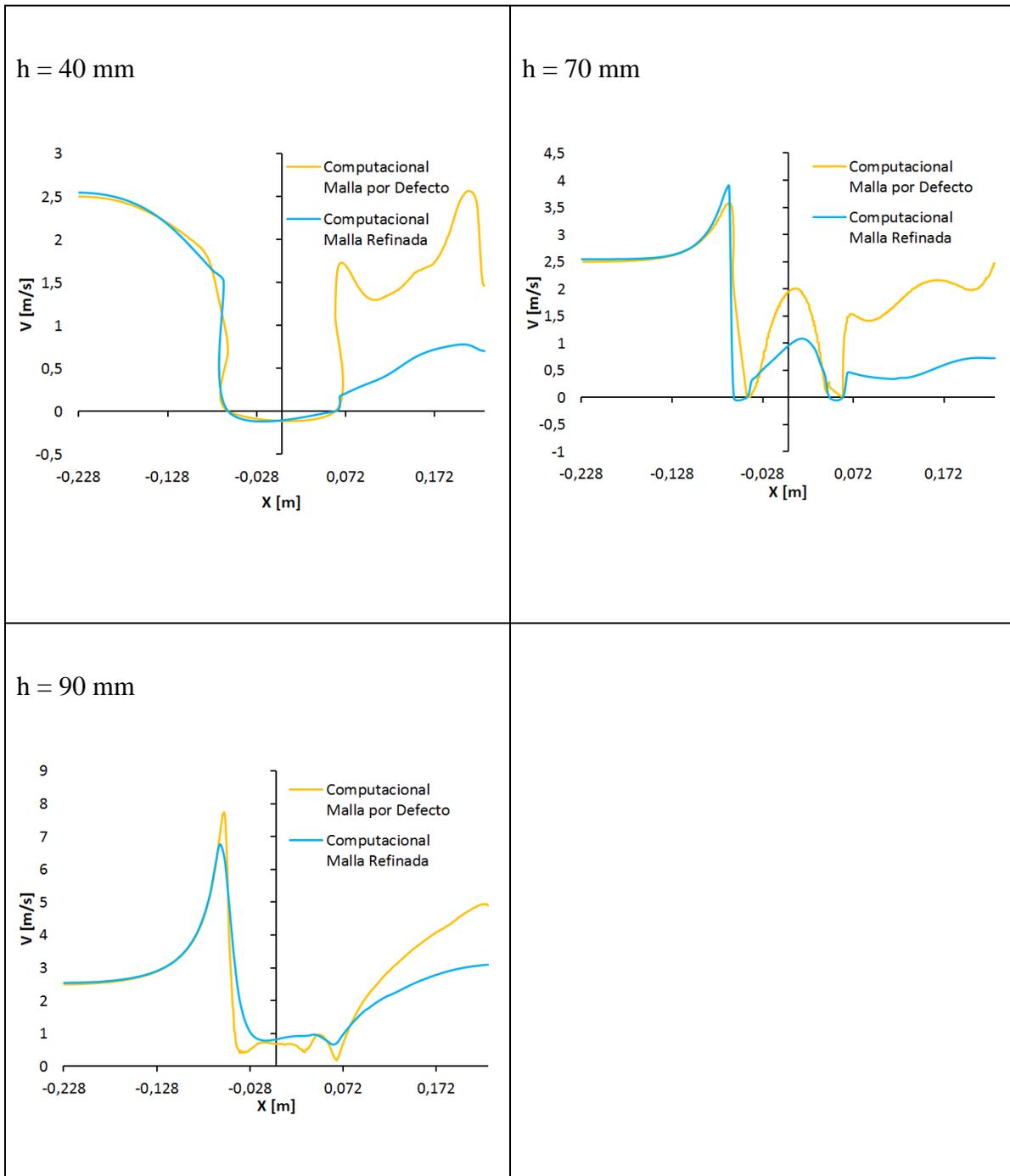


Figura 4. 2 Alturas de análisis de velocidad perfil H Centrado. Fuente [Autores]

Tabla 4. 2 Valores de la Velocidad Perfil H en X. Fuente [Autores]



Las gráficas de la tabla 4.2 muestran similitudes entre los resultados que nos dan los dos mallados antes de que el efecto del viento sea afectado por el cuerpo del modelo, por tal razón ya después de pasar por él, existen considerables variaciones uno del otro, pero en sí la tendencia es semejante.

4.1.2 Edificación Techo Perfil Triangular



Figura 4. 3 Edificación Techo Perfil Triangular. Fuente [Autores]

Para la Edificación con Techo Perfil Triangular, la toma de datos experimentales y computacionales se realizó durante 24,2 segundos cada 0,2 segundos cada toma de dato, siendo 122 registros de velocidad obtenidos para este perfil.

De igual manera para este perfil los puntos estratégicos de medición se mostraron en la figura 3.9, 3.10 y 3.11, con los cuales a continuación mediante la Tabla 4.3, se mostrarán las gráficas para visualizar la tendencia de la velocidad en esos puntos, para los casos experimental y computacional.

Para diferenciar los casos las líneas suavizadas se utilizaran con colores, siendo estos los mismos del perfil anterior, a continuación la descripción y la tabla de gráficas.

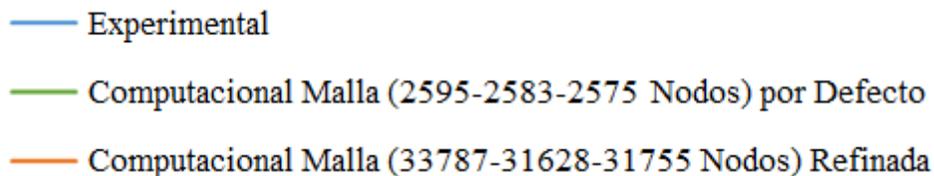
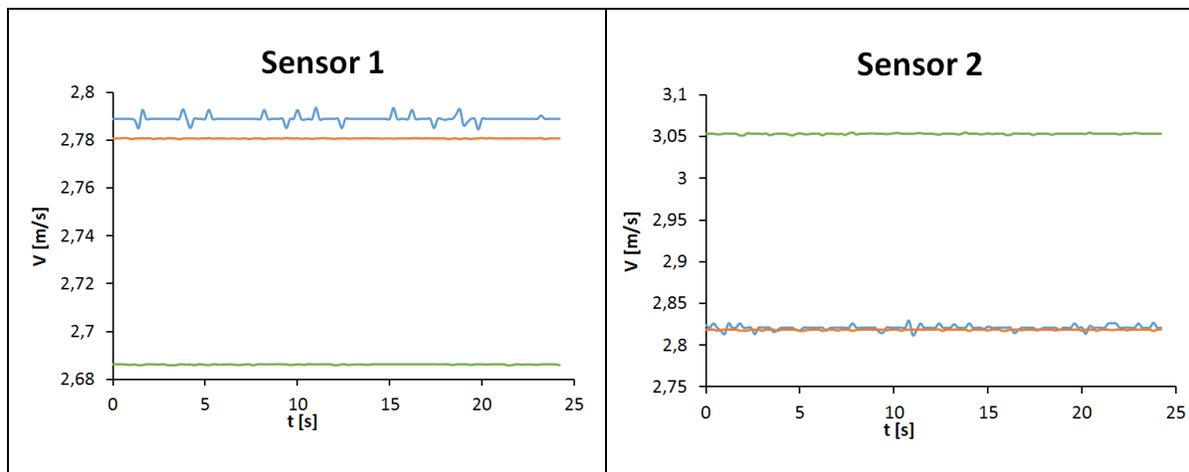
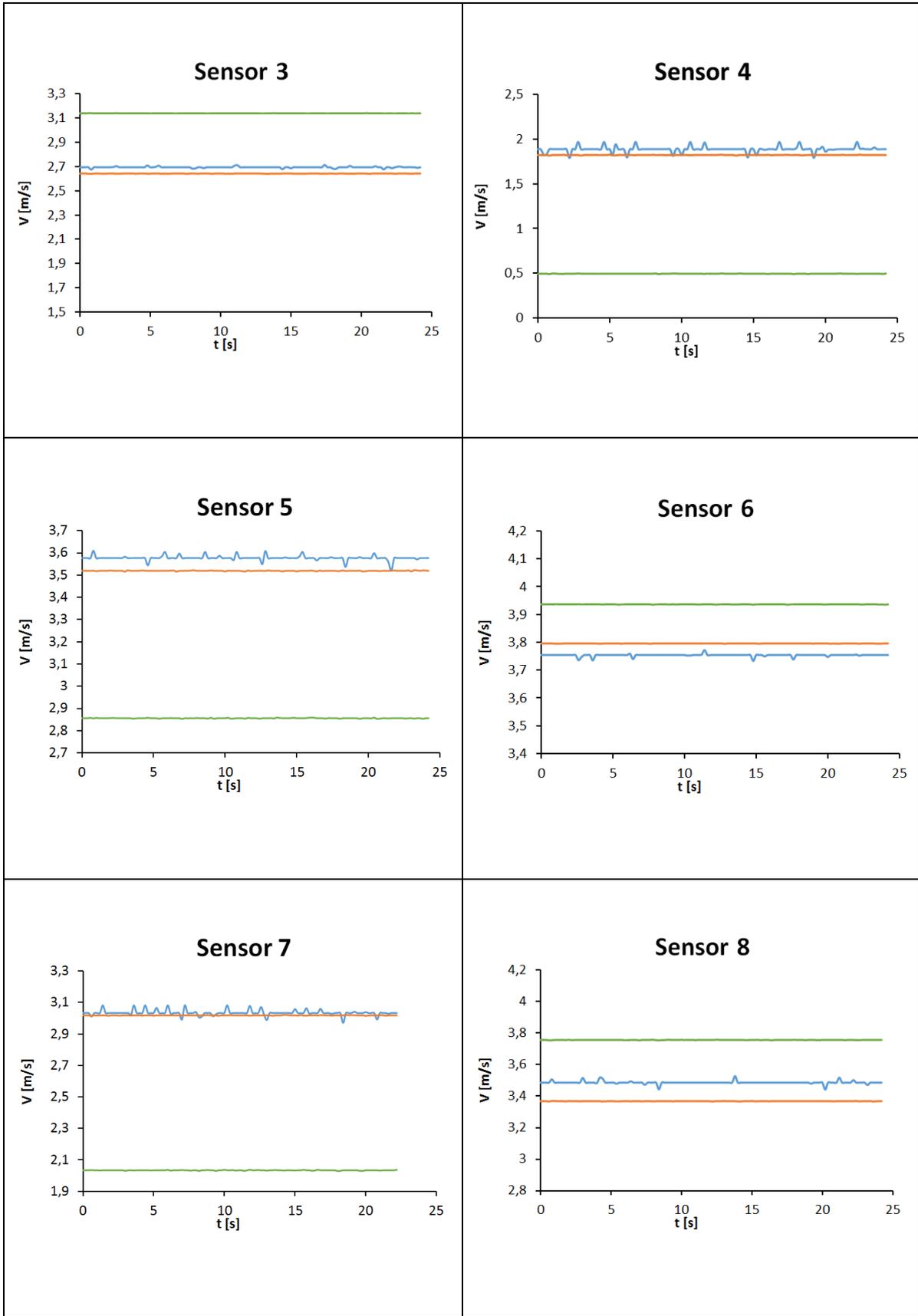
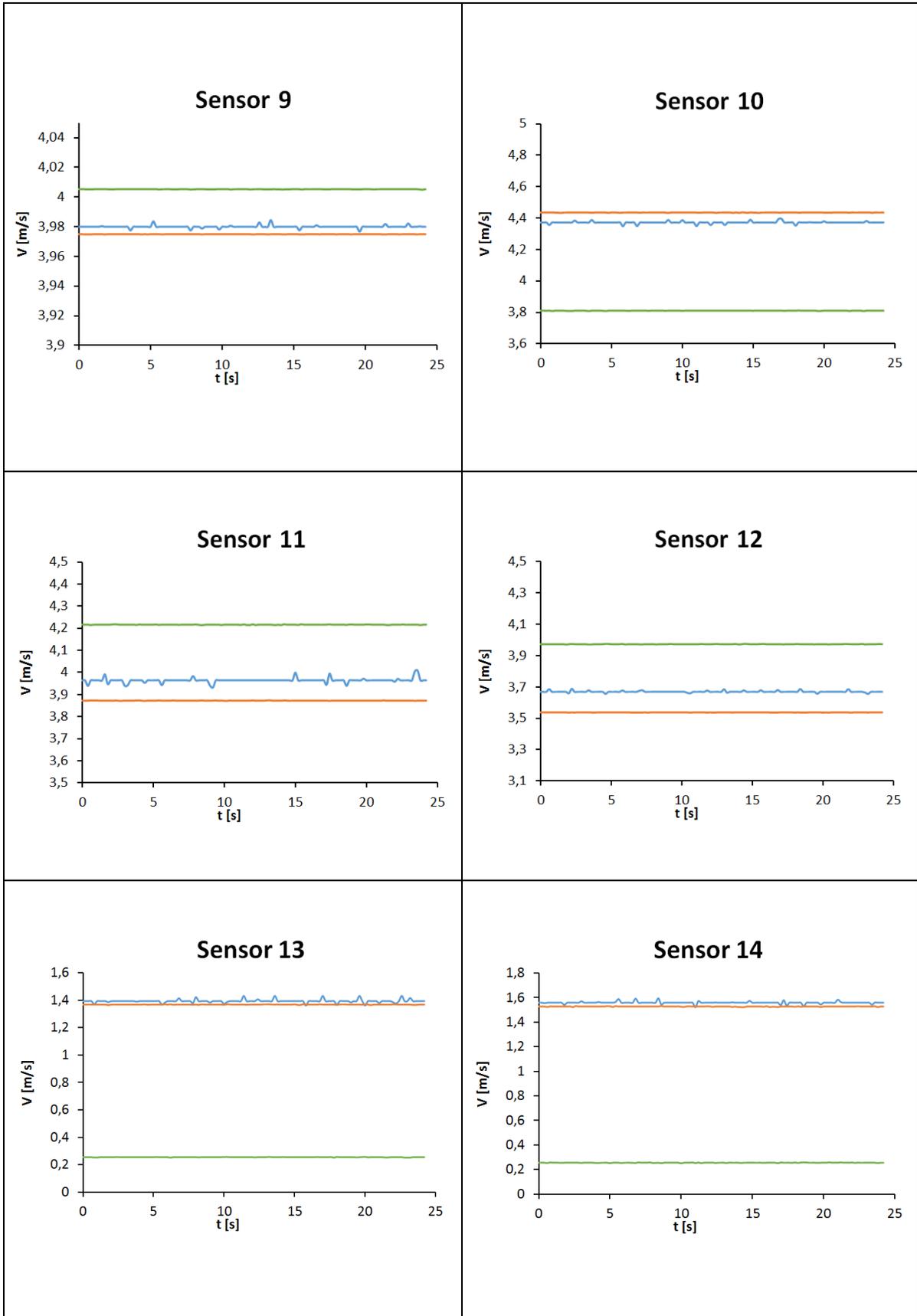
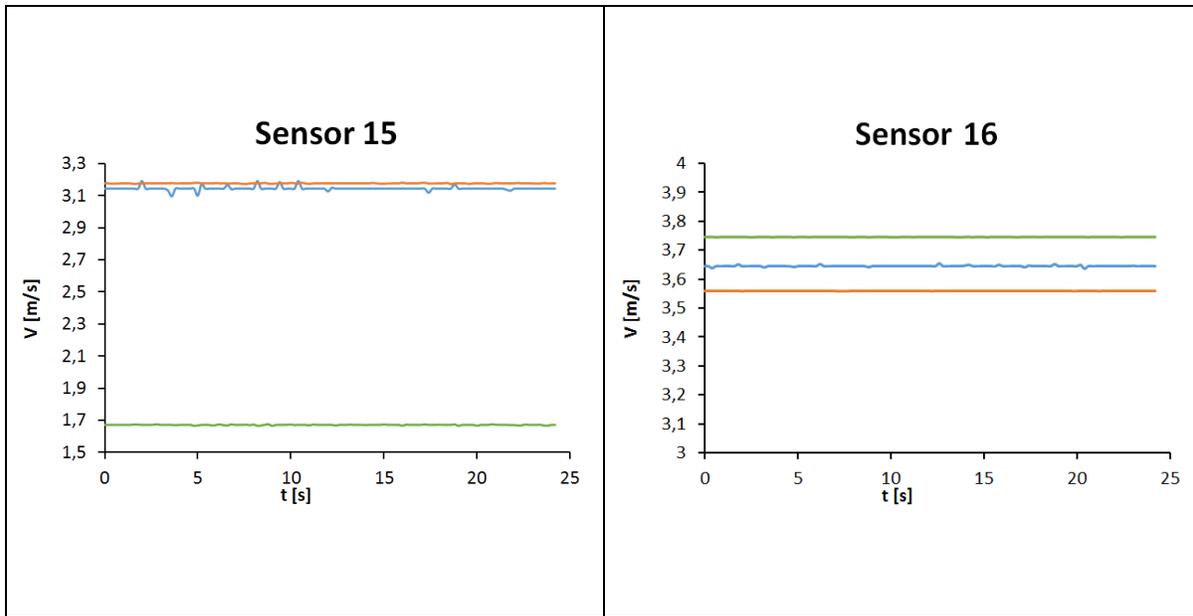


Tabla 4. 3 Velocidades en Puntos Estratégicos Edificación Techo Perfil Triangular. Fuente [Autores]









Para el caso del perfil triangular el comportamiento del viento es similar que en el perfil H ya que existen variaciones mayores en valores experimentales y para los computacionales variaciones mínimas que van al orden incluso de las milésimas.

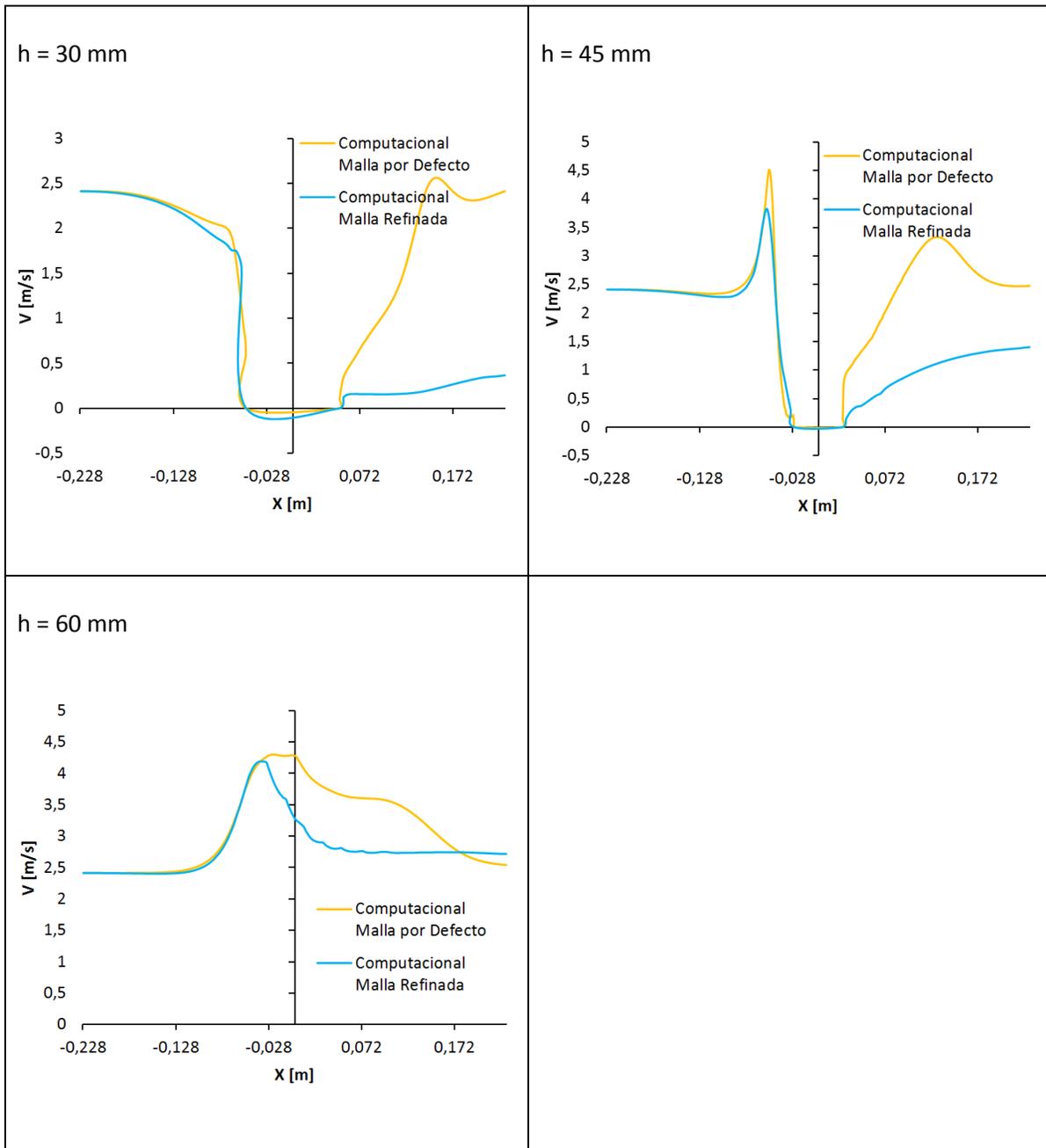
De igual manera los valores computacionales de mallado refinado están mucho más cercanos que en el caso de los valores computacionales de mallado por defecto, algo que se esperaba precisamente.

En cuanto al análisis que respecta con la distancia a lo largo de la cámara del túnel de viento simulado, los resultados lo veremos en la tabla 4.4.



Figura 4. 4 Alturas de análisis de velocidad perfil Triangular Centrado. Fuente [Autores]

Tabla 4. 4 Valores de la Velocidad Perfil Triangular en X. Fuente [Autores]



La tendencia de la velocidad es similar que el caso anterior ya que la velocidad es similar antes que pase por el modelo de allí los vórtices y turbulencias que se generan hacen que haya variaciones en los resultados, quizás teniendo la certeza que la de malla refinada es la más cercana.

4.1.3 Techo Colgante



Figura 4. 5 Edificación Techo Colgante. Fuente [Autores]

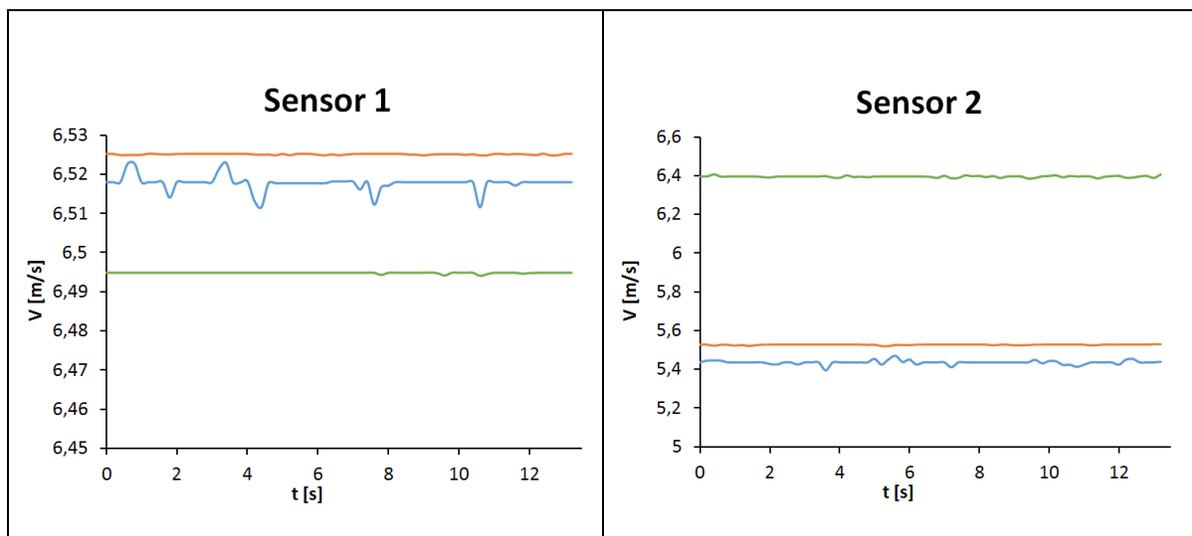
Para el caso último de la Edificación con Techo Colgante, la toma de datos experimentales y computacionales se realizó durante 13,2 segundos cada 0,2 segundos cada toma de dato, siendo 67 registros de velocidad obtenidos para este perfil.

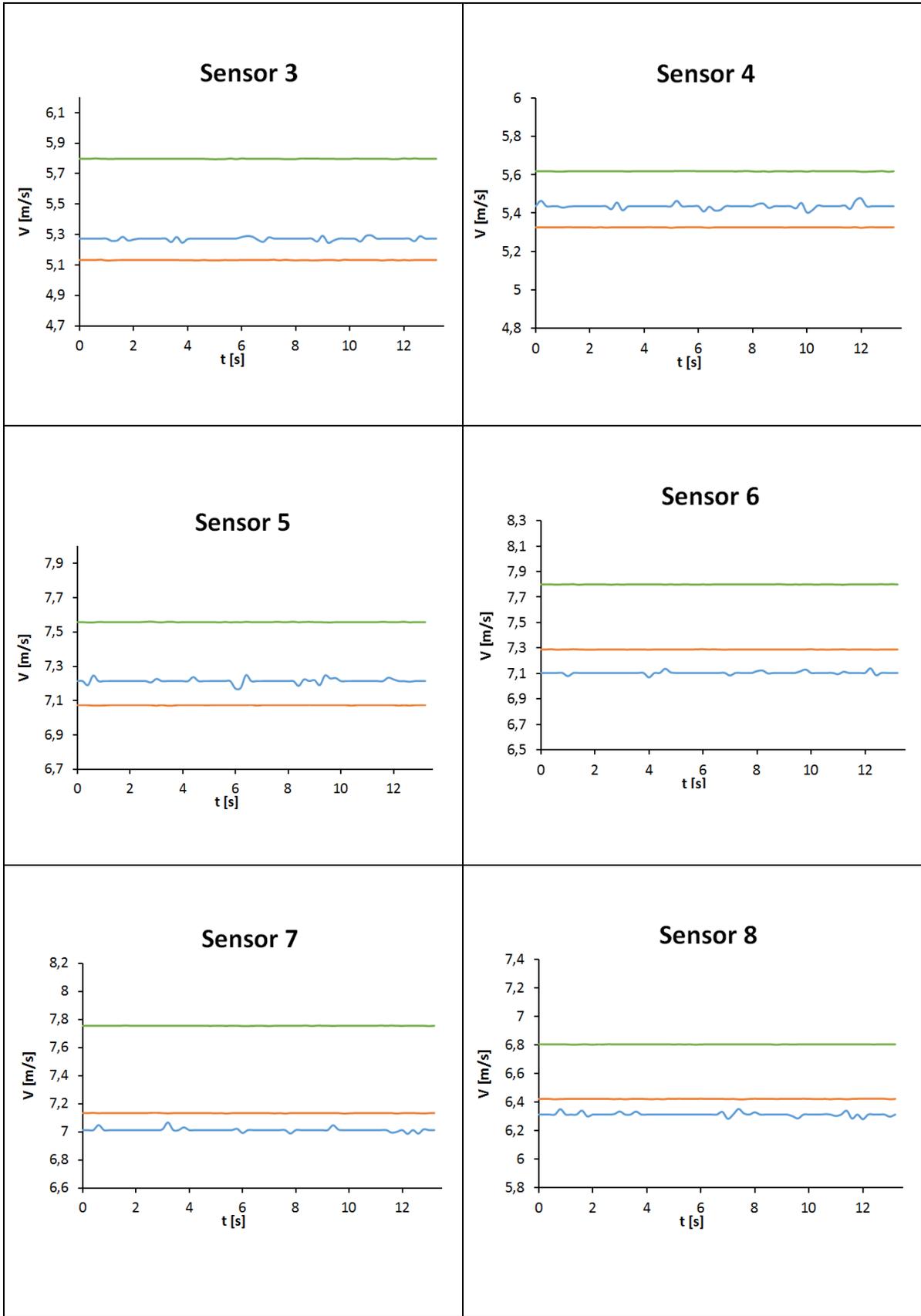
Los puntos estratégicos de este perfil para la medición se mostraron en la figura 3.12 y 3.13, con los cuales a continuación mediante la Tabla 4.5, se mostrarán las gráficas para visualizar la tendencia de la velocidad en esos puntos, para los casos estudiados.

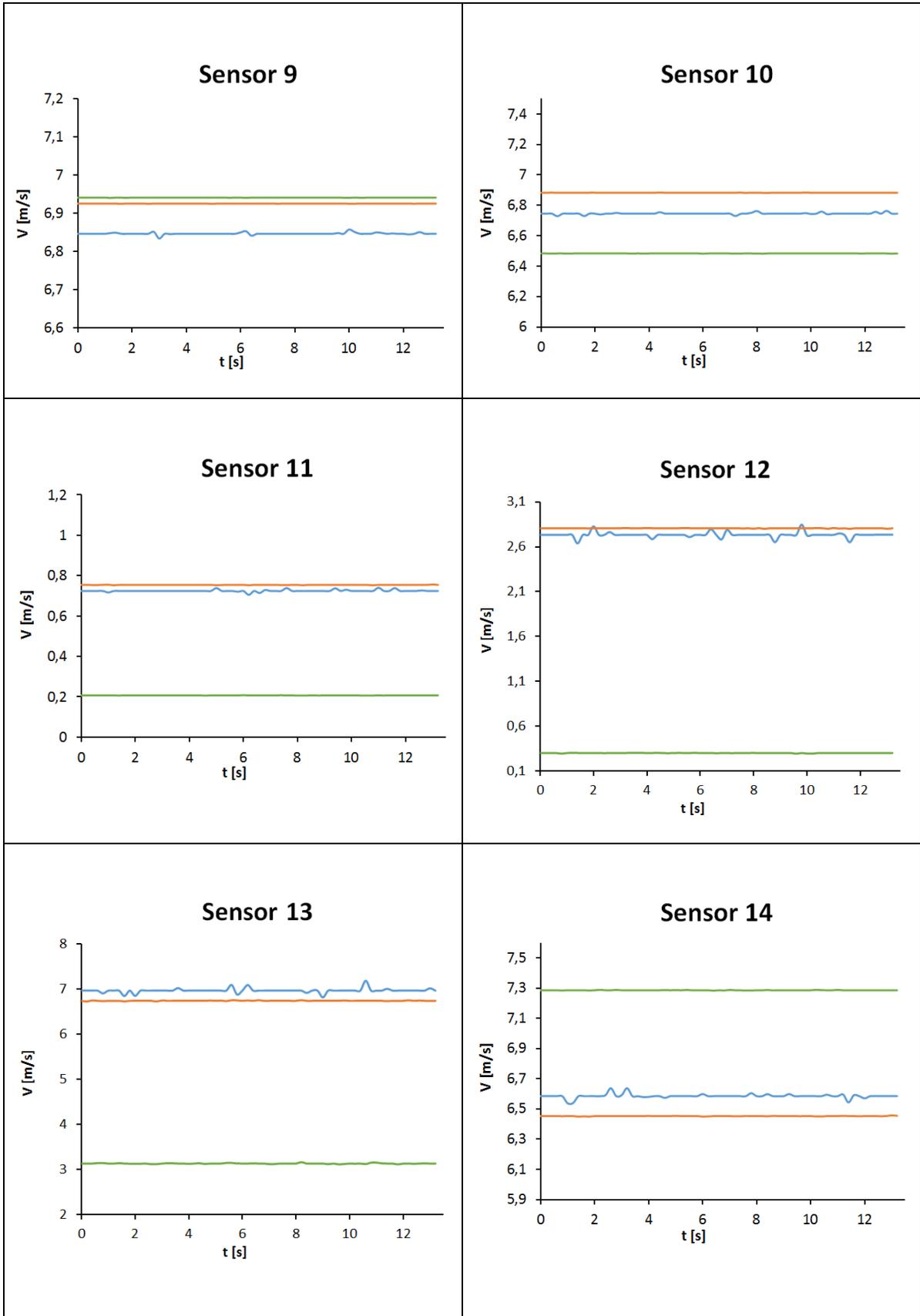
A continuación la descripción y la tabla de gráficas.

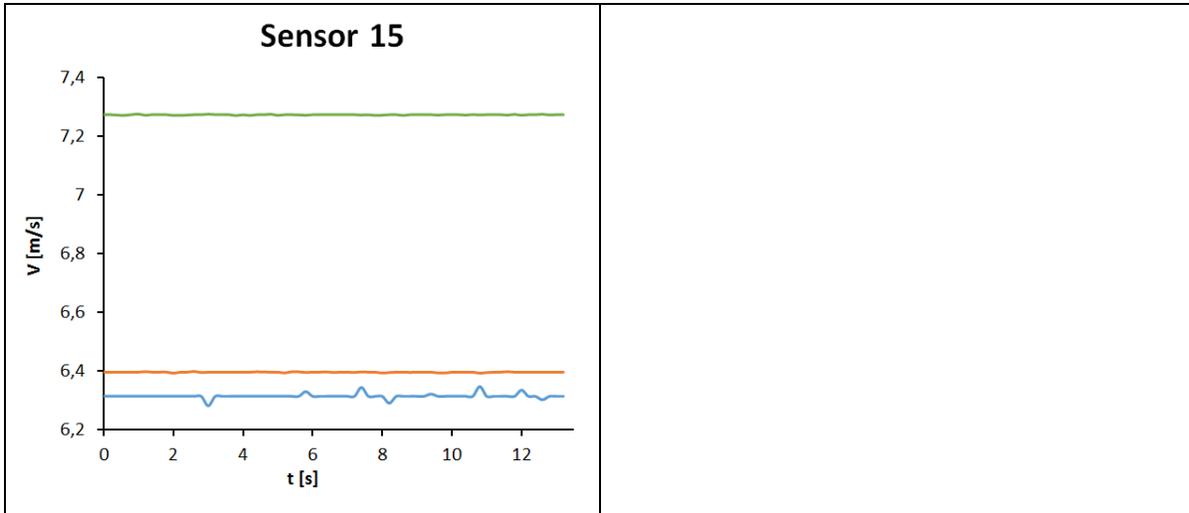


Tabla 4. 5 Velocidades en Puntos Estratégicos Edificación Techo Colgante. Fuente [Autores]









Culminando con el análisis de los resultados, para el perfil de techo colgante el comportamiento es el mismo que en las ocasiones anteriores, tanto en variaciones, como de la cercanía entre un valor y otro.

De igual manera para el último análisis de la velocidad con respecto a la distancia para este perfil, los resultados serán mostrados en la tabla 4.6.

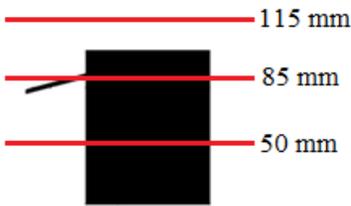
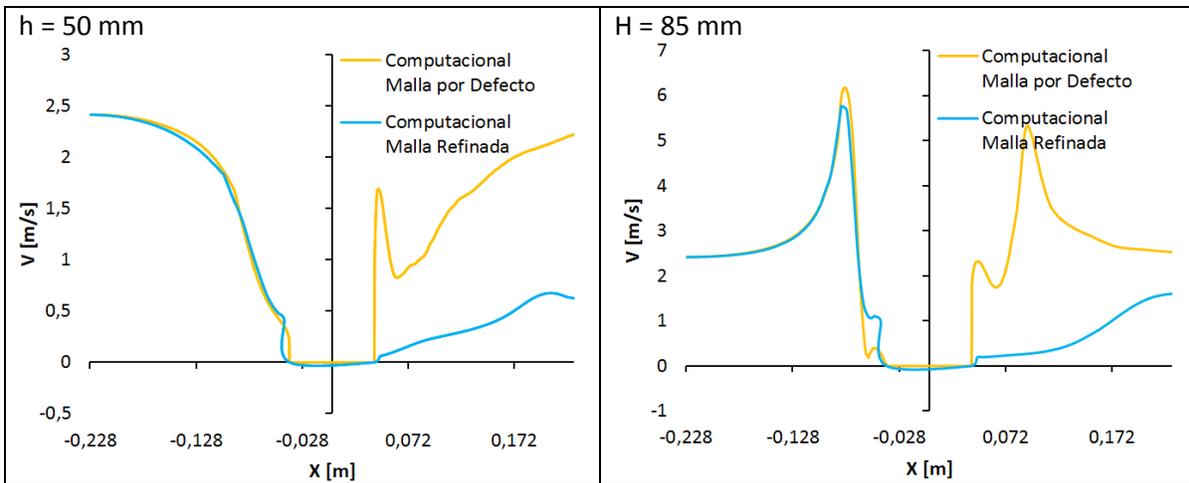
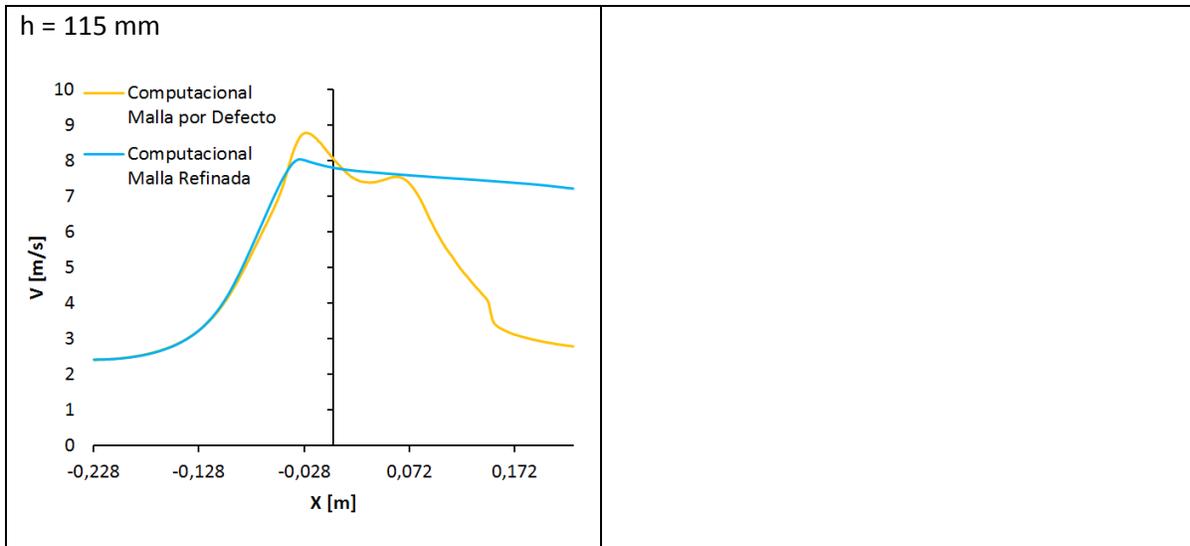


Figura 4. 6 Alturas de análisis de velocidad perfil Techo Colgante Centrado. Fuente [Autores]

Tabla 4. 6 Valores de la Velocidad Perfil Techo Voladizo en X. Fuente [Autores]





Visualizando la tabla anterior demuestra el mismo efecto que los perfiles anteriores ya que la capa límite de los modelos afectan considerablemente al flujo del viento viéndose este efecto en las gráficas.

A continuación procederemos a la debida comparación de resultados.

4.2 COMPARACIÓN DE DATOS SIMULADOS Y REALES

El estudio de comparación se realiza mediante la ayuda de los resultados obtenidos por el túnel de viento y las simulaciones en ANSYS Fluent que fueron mostrados en el capítulo anterior, cuyos datos de velocidad son la media de todos los registros tomados en cada punto de cada perfil, tanto para los datos experimentales y de simulación.

Para sacar el error porcentual entre los valores reales y simulados utilizamos la siguiente expresión:

$$E_{[\%]} = \left(\frac{|V_{Real} - V_{Simulación}|}{V_{Real}} \right) \cdot 100\% \quad (4.1)$$

A continuación se mostraran los valores de error porcentual máximo, mínimo y el medio para cada uno de los puntos y perfiles estudiados.

4.2.1 Techo Perfil H

Tabla 4. 7 Comparación de los Datos Experimentales y Computacionales en el Perfil Tipo H. Fuente [Autores]

Puntos	Malla Por Defecto			Malla Refinada		
	Error Mín. [%]	Error Máx. [%]	Error Promedio [%]	Error Mín. [%]	Error Máx. [%]	Error Promedio [%]
S1	3,12	3,52	3,31	0,11	0,48	0,27
S2	1,58	1,76	1,67	0,15	0,55	0,31
S3	3,65	4,01	3,78	0,6	1,02	0,89
S4	82,34	84,4	83,37	0,45	5,66	3,58
S5	71,97	88,96	81,22	0,07	4,68	1,46
S6	14,47	15,76	15,01	0,68	1,82	1,15
S7	58,29	60,64	59,91	0,01	2,1	1,03
S8	36,13	39,37	37,69	0,14	3,04	1,02
S9	6,13	6,74	6,38	0,03	0,61	0,26
S10	94,36	95,11	94,83	0,24	5,91	1,77
S11	63,7	66,52	65,37	0,04	6,92	2,01
S12	66,71	69,36	68,13	0,37	8,43	4,36
S13	37,44	40,57	39,3	0,47	4,11	1,94
S14	69,56	71,03	70,32	0,01	0,94	0,3

Visualizando el contenido de la tabla 4.4 podemos apreciar que los datos experimentales con los computacionales de mallado por defecto, muestran valores algo alejados de hasta errores medios del 94,83 % el más alto, aunque el más cercano revela un 1,67 %, pese a esto los valores en general muestran un valor muy alto para ser considerados adecuados.

En cuanto se refiere la apreciación entre los datos experimentales y los computacionales de mallado refinado, muestran valores semejantes entre sí, ya que el error medio máximo que existe entre las comparaciones es del 4,36 % y el medio mínimo de apenas el 0,26 %.

4.2.2 Techo Perfil Triangular

Tabla 4. 8 Comparación de los Datos Experimentales y Computacionales en el Perfil Triangular.
Fuente [Autores]

Puntos	Malla Por Defecto			Malla Refinada		
	Error Mín. [%]	Error Máx. [%]	Error Medio [%]	Error Mín. [%]	Error Máx. [%]	Error Medio [%]
S1	3,53	3,85	3,69	0,14	0,46	0,3
S2	7,92	8,58	8,24	0,01	0,39	0,11
S3	15,68	17,37	16,5	1,27	2,63	1,95
S4	72,37	74,99	73,79	0,02	7,5	3,55
S5	18,86	20,92	20,17	0,01	2,49	1,62
S6	4,35	5,42	4,87	0,61	1,68	1,12
S7	31,53	34,05	32,97	0,15	2,06	0,64
S8	6,5	9,14	7,74	2,14	4,51	3,4
S9	1,52	1,72	1,63	0,04	0,24	0,13
S10	12,36	13,3	12,84	0,9	2	1,44
S11	5,18	7,24	6,37	1,51	3,42	2,31
S12	7,75	8,73	8,27	3,23	4,08	3,6
S13	81,06	82,2	81,67	0,04	4,47	1,86
S14	83,1	84,07	83,61	0,01	4,2	2,04
S15	45,99	47,78	46,84	0,17	2,67	1,04
S16	2,49	3,02	2,76	2,11	2,62	2,36

En detalle la tabla 4.5 contempla la misma línea de error que el caso anterior, ya que entre los valores reales y de simulación con mallado por defecto muestran distanciamientos considerables, observando un error medio máximo entre los puntos de medición de 83,61 %, en tanto refiere al error medio mínimo con un valor de 1,63 %.

En cambio los datos entre la experimentación y la simulación por mallado refinado muestran errores mucho más bajos, siendo el error medio máximo de apenas 2,36 % y un error medio mínimo de 0,11%.

4.2.3 Techo Colgante

Tabla 4. 9 Comparación de los Datos Experimentales y Computacionales en el Perfil Techo Colgante.
Fuente [Autores]

Puntos	Malla Por Defecto			Malla Refinada		
	Error Mín. [%]	Error Máx. [%]	Error Promedio [%]	Error Mín. [%]	Error Máx. [%]	Error Promedio [%]
S1	1,26	1,43	1,35	0,03	0,21	0,11

S2	16,92	18,59	17,65	1,02	2,46	1,68
S3	9,51	10,51	9,96	2,16	3,05	2,65
S4	2,54	3,95	3,36	1,44	2,81	2,03
S5	4,27	5,4	4,76	1,35	2,42	1,96
S6	9,25	10,33	9,78	2,08	3,07	2,58
S7	9,73	11,01	10,57	0,92	2,11	1,71
S8	7,12	8,34	7,77	1,07	2,28	1,72
S9	1,21	1,57	1,38	0,98	1,34	1,15
S10	3,64	4,14	3,88	1,76	2,29	2,03
S11	70,61	72	71,42	1,9	6,72	4,05
S12	88,52	89,37	88,94	0,39	6,41	2,78
S13	54,03	56,57	55,03	1,11	6,22	3,24
S14	9,77	11,45	10,64	1,29	2,78	2,01
S15	14,59	15,84	15,19	0,72	1,83	1,29

Con los datos especificados en la tabla 4.6 apreciamos que los resultados reales y computacionales de mallado simple contienen valores alejados, siguiendo con las tendencias de los dos casos anteriores, para este caso el error medio máximo es de 88,94% y un mínimo de 1,35%.

En cuanto para los resultados con respecto a los datos computacionales de mallado refinado, el error máximo es de 4,05 % y un error mínimo de 0,11%.

Resumiendo las comparaciones en los tres casos se concluye que las velocidades que se obtienen mediante las simulaciones por mallado refinado son mucho más cercanos que los de mallado por defecto, esto se esperaba ya que el mallado refinado en el contorno se usa especialmente en geometrías complicadas y para poder visualizar de mejor manera los efectos que se producen gracias a la capa límite del fluido en este caso el viento sobre los perfiles de las edificaciones.

Los posibles factores por los cuales existe cierta variación entre los resultados son los siguientes:

- Fallas en mediciones para ubicación de los puntos de los sensores.

- Pequeños desperfectos en los modelos como ciertas diferencias en las dimensiones o la rugosidad del material, por lo que la capa límite afectaría aún más el comportamiento del viento.
- La sección de cámaras de ensayos al ser rectangular, los vértices evitan que el flujo del viento sea lo más uniforme posible.

Para poder comprobar si los rangos de error en el estudio están dentro de los rangos de error permisibles, nos basamos en un apartado bibliográfico [58] que resalta un error permisible de hasta un 10 %, en el que se toma en cuenta los errores de medición en las características geométricas y mecánicas de la maqueta como la rugosidad del modelo; entonces considerando así que los datos obtenidos en la simulación de mallado con refinamiento están situados dentro de ese rango ya que el error máximo que se encuentra en el estudio está en el caso del Perfil Tipo H específicamente en el S12 (Tabla 4.4) con un valor de 8,43 %, y en general los valores están muy por debajo del 10%, esto demuestra que el Software ANSYS Fluent como herramienta de simulación para predicción, evaluación o para comparación como en el presente estudio es confiable y brinda una gran ayuda para poder analizar el comportamiento del viento y su velocidad como un complemento al túnel de viento para el uso en techos de edificaciones.

CONCLUSIONES DEL PROYECTO

- Una de las dificultades iniciales del proyecto de tesis fue el encontrar perfiles de diferentes geometrías que muestren comportamientos de flujo turbulentos alrededor de ellos, para eso escogimos tres tipos de perfil muy distintos el uno del otro, siendo estos el de un perfil triangular cuyo caso es el que se encuentra más variadamente en el entorno, tomándolo así como ejemplo el de un coliseo; el perfil siguiente lo consideramos para la aplicación de un helipuerto específicamente de una clínica, y por último el de una edificación que tenga el techo colgante, considerado un edificio comercial.
- En la adquisición de datos experimentales en el túnel de viento se usó un tubo de pitot para determinar la velocidad en los distintos puntos, dichos puntos fueron localizados en base a la norma AMCA 203-90 la cual establece las posiciones de los sensores y el número de medidas para realizar un análisis que permita obtener resultados de calidad.
- De igual manera en la misma toma de datos para obtener datos más uniformes, se asistió del mismo software para el cronometraje y registro automático para los ensayos propuestos, así como la ayuda de instrumentos de medición precisos para la ubicación del modelo y la altura de los sensores, aunque para la altura de los sensores la poca maniobrabilidad por el espacio reducido en la cámara de pruebas del túnel de viento dificultaba la medición.
- Posterior a la revisión bibliográfica de diferentes modelos de turbulencia usados en la resolución computacional, el modelo que se usó fue el k-epsilon realizable, con el cual se obtienen mejores resultados sobre los otros modelos, debido a que este modelo tiene en cuenta los gradientes de presión entre las paredes, lo que da como resultado menor error en los cálculos.

- Se realizó un escalamiento de los modelos a ser estudiados, para ello se usaron las semejanzas geométricas y cinemáticas, la primera sirvió para determinar las dimensiones del modelo en base a las medidas del prototipo, y la semejanza cinemática, que permitió determinar la velocidad del viento y el tiempo de ensayo para cada modelo, teniendo en cuenta las velocidades del viento y el tiempo en cada prototipo, según las condiciones establecidas.
- Para lograr mejores resultados en la simulación computacional, es importante realizar un mallado de buena calidad, así con una malla compuesta de elementos triangulares de menor tamaño y un refinamiento en el contorno del modelo analizado, se obtuvieron valores más parecidos a los experimentales, esto contrasta con lo ocurrido al usar una malla compuesta de elementos cuadrados sin ningún tipo de refinamiento.
- Los resultados se validaron con un documento bibliográfico que resaltaba un rango de error permisible de 10 % (que justificaba tal rango debido a errores en mediciones geométricas y mecánicas), siendo los resultados correctos ya que se mantuvieron entre el rango de 0-10 %, teniendo como el error máximo registrado en los ensayos de 8,43 % mediante la malla con refinamiento, el cual demuestra que el software ANSYS Fluent es confiable para complementar el análisis de la velocidad del viento sobre techos de edificaciones.
- El análisis que se realizó entre la velocidad con respecto a la distancia, siendo esta distancia la distancia x de la cámara de ensayos en la simulación, nos demostró el comportamiento a lo largo de la misma, teniendo tres etapas, una antes, durante y después del modelo, donde se ve claramente que los datos de ambas mallas son similares antes de que la capa límite afecte su flujo, pero al tener contacto con la misma y al generar con esto la presencia aceleraciones, vórtices o turbulencias, es donde hay variación importante entre los datos de los dos mallados, pudiendo ser estos validados con ensayos cuya adquisición de datos sea con respecto a distancias.

RECOMENDACIONES

- Para la adquisición de datos se debe colocar el sensor de pitot lo más exacto posible, para poder obtener los datos de calidad, de igual manera debe estar paralelo al flujo del viento para que la velocidad captura por el sensor sea la real.
- Para realizar el escalamiento de los modelos, se debe tomar en cuenta las velocidades y tiempos críticos con el fin de crear un análisis seguro.
- Usar un sensor electrónico para la determinación de velocidades en la sección e pruebas del túnel de viento, de esta manera los resultados obtenidos serán de mejor calidad.
- Para estudios futuros se recomienda aplicar un túnel de viento con el fin de analizar no solo las velocidades en ciertos puntos, sino también la presión que se encuentra en la misma y realizar lo mismo de manera computacional, verificando la fiabilidad del software para estos casos.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS UTILIZADAS

[1] H. Ollague and H. Crespo, “Estudio y Evaluación de los Parámetros de Operación del Proyecto Eólico Villonaco de la Provincia de Loja-Ecuador,” Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2014.

[2] J. Cabrera and C. Ruiz, “Validación del software especializado WAsP para el dimensionado de parques eólicos de altura ubicados en terrenos complejos,” Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2014. S/a, Introducción a la Energía Eólica, Madrid, 2008.

[3] Rodríguez Amenedo, J.L.; Burgos Díaz, J. C.; Gómez, S. A.; Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica, Rueda S. L., 2003

[4] Isla de Calor [en línea] < http://es.wikipedia.org/wiki/Isla_de_calor [consulta: 30 de agosto 2013]

[5] S/a, Introducción a la Energía Eólica, Madrid, 2008.

[6] La turbulencia y otros fenómenos dinámicos [En Línea] < <http://climatologiayparapente.blogspot.com/2008/11/la-turbulencia-y-otros-fenmenos.html>

[7] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME), Guía para la utilización de la energía eólica para generación de energía eléctrica; Documento No. ANC-603-18, Bogotá, Marzo del 2003.

[8] Obras Marítimas ROM 04-95 Capítulo 3 [En Línea] > http://imt.mx/images/files/SPC/Convocatorias/Formatos/Bibliografia/OBRAS_MARITIMAS_ROM_0.4-95_CAPT_3.pdf

[9] Construcciones Civiles _ Edificios: Cargas de Viento [En Línea] >
<http://www.elconstructorcivil.com/2013/07/edificios-cargas-de-viento.html>

[10] XenForo™ ©2010-2013 XenForo Ltd. [En Línea] >
<http://www.bmwfaq.com/threads/para-entender-un-poco-mas-el-tunel-del-viento-como-trabajan.709185/>

[11] Alberto Muñoz Mejías _ DISEÑO Y ANÁLISIS COMPUTACIONAL PARA TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD _ UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID _ ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR [En Línea] > http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/15901/pfc_alberto_munoz_mejias_2012.pdf?sequence=1

[12] Motor Giga _ TÚNEL AERODINÁMICO - Definición – Significado [En Línea] >
<http://diccionario.motorgiga.com/diccionario/tunel-aerodinamico-definicion-significado/gmx-niv15-con195825.htm>

[13] Hidráulica – Conceptos Básicos Fluidos [En Línea] >
<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/es/conceptosbasicosmfluidos/nmach/nmach.html>

[14] G. HANSEN, ARTHUR. Mecánica de fluidos. Regímenes basados en el número de Mach, pag 251. Editorial Limusa. México. 1982.

[15] Laplace – Departamento de Física Aplicada – Universidad de Sevilla _ Número de Mach [En Línea] > http://laplace.us.es/wiki/index.php/N%C3%BAmero_de_Mach

[16] Luis Díaz Iriberry. Estudio de propulsores para aplicación de túneles de viento. Casteldefells, España. 2005.

[17] Luis Díaz Iriberry. Estudio de propulsores para aplicación de túneles de viento. Casteldefells, España. 2005.

[18] Diego Patricio Pineda Maigua y William Hernán Vega Santillán. Diseño y construcción de un túnel de viento subsónico con sistema de adquisición de datos para el estudio de la aerodinámica de los vehículos. Latacunga, Ecuador. 2010.

[19] ANSYS Fluent _ [En Línea] <http://www.ansys.com/es>

[20] Cavendish CFD SA de CV [En línea] > <http://www.cavendishcfid.com/fluent.html>

[21] ANSYS _ Computational Fluid Dynamics Solution [En Línea] > http://www.ansys.stuba.sk/13_AUM_05/data/ANSYS_materialy/ANSYS_10_brochure/cfd-solution-10.pdf

[22] Víctor Marín, “Túnel de viento - Historia - Partes.” [Online]. Available: <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulosos/flujodegases/tuneldeviento/tuneldeviento.html>

[23] ITER _ Túnel de Viento [En Línea] > <http://www.iter.es/index.php/mod.pags/mem.detalle/idpag.101/idmenu.1091/chk.04442b7e1cc70f1f9cb0ef904936b626.html>

[24] Virutas + F1 _ Diseño y funcionamiento de un túnel de viento [En Línea] > <http://virutasf1.com/2013/09/viru-diseno-y-funcionamiento-de-un-tunel-de-viento-2/>

[25] NASA [En Línea] > <http://www.machtres.com/797.htm>

[26] EADIC _ Túnel de viento en Ingeniería Civil [En Línea] > <http://eadic.com/author/admin/page/2/>

[27] Bitácora Virtual _ ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA COMO ARQUITECTURA EXPERIMENTAL [En Línea] > <http://www.bitacoravirtual.cl/2005/05/02/arquitectura-bioclimatica-como-arquitectura-experimental/>

[28] Deutsche Welle _ Un parque eólico "interactivo" [En Línea] > <http://www.dw.de/un-parque-e%C3%B3lico-interactivo/a-5957076>

[29] Cronoramia _ Ciclismo y viento, ¿Enemigos irreconciliables? [En Línea] > <http://www.cronoramia.com/2014/02/13/ciclismo-y-viento-enemigos-irreconciliables/>

[30] MSc. Santiago Orrego _ SIMULACION DE FLUIDOS UTILIZANDO COMPUTADORES: una moderna herramienta para el estudio y análisis de fluidos _ Universidad EAFIT [En Línea] > http://mecanica.eafit.edu.co/~sorrego/IntroCFD_Mecapl.pdf

[31] Mecánica Aplicada Universidad EAFIT [En Línea] > <http://www.eafit.edu.co/Paginas/index.aspx>

[32] José Ángel López Sandoval _ Verificación de Sistemas de Ventilación por Extracción Localizada [En Línea] > <http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/3750/1/tfm266.pdf>

[33] Sensing _ Manómetros Digitales _ Manómetro diferencial digital [En Línea] > http://www.sensores-de-medida.es/sensing_sl/SENSORES-Y-TRANSDUCTORES_35/Sensores-de-presi%C3%B3n_107/Man%C3%B3metros-digitales_115/

[34] Chassan Jalloul _ WIKA _ Instrumentación _ Cómo se mide la presión diferencial [En Línea] > <http://www.bloginstrumentacion.com/blog/2010/12/20/como-se-mide-la-presion-diferencial/#!prettyPhoto>

[35] Armfield Ltd. E & OE, “C15 : Túnel de Viento Controlado por Ordenador.” [En Línea] > <http://discoverarmfield.com/es/products/view/c15/tunel-de-viento-controlado-por-ordenador>

[36] Gustavo C. Balbastroa, Victorio E. Sonzogni _ EFECTO DEL VIENTO EN CUBIERTAS CURVAS AISLADAS CON OBSTRUCCIONES _ Mecánica Computacional, Volume XXX. Number 34. Wind Engineering (A) [En Línea] > <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/3938/3855>

[37] Gustavo C. Balbastroa, Victorio E. Sonzogni _ CARGAS EN CUBIERTAS CURVAS CON OBSTRUCCIONES PARA VIENTO INCIDIENDO OBLÍCUAMENTE _ Mecánica Computacional, Volume XXX. Number 34. Wind Engineering (A) [En Línea] > <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/3938/3855>

[38] Petra Kastner-Klein _ Description of wind tunnel studies on flow field and dispersion characteristics in street canyons at the University of Karlsruhe _ November 1999 [En Línea] > <http://weather.ou.edu/~pkklein/texte/description.pdf>

[39] Yong QUAN, Yi LIANG, Fei WANG, Ming GU _ Wind tunnel test study on the wind pressure coefficient of claddings of high-rise buildings. _ Front. Archit. Civ. Eng. China 2011 [En Línea] > <http://link.springer.com/10.1007/s11709-011-0128-4>

[40] GB 50009–2001. Load Code for the Design of Building Structures. Beijing: the Ministry of Construction. 2002 (in Chinese)

[41] AIJ Recommendations for Loads on Buildings. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2004

[42] Fundación Municipal Turismo _ Ilustre Municipalidad de Cuenca _ Cuenca – Ecuador [En Línea] > <http://www.cuenca.com.ec/cuencanew/themes/sky/descargas/Trade%20Cuenca.pdf>

[43] S.Rivas-Martínez _ Sistema de Clasificación Bioclimática Mundial (temperatures) _ ECUADOR – CUENCA [En Línea] <http://pendientedemigracion.ucm.es/info/cif/station/ec-cuenc.htm>

[44] Cuenca Climate Guide [En Línea] > <http://worldclimateguide.co.uk/climateguides/ecuador/cuenca.php>

[45] María Paz Pesántes Moyano _ CONFORT TÉRMICO en el área social de una vivienda unifamiliar en CUENCA-ECUADOR _ UNIVERSIDAD DE CUENCA FACULTAD DE ARTES ESCUELA DE DISEÑO _ 2012 [En Línea] > <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/393/1/tesis.pdf>

[46] Metocast _ Ecuador - Provincia del Azuay - Cuenca _ Pronóstico del tiempo para Cuenca [En Línea] > <http://es.meteocast.net/forecast/ec/cuenca/>

[47] Formulación del diagnóstico y el pronóstico; Modelos matemáticos, físicos y conceptuales. Su uso para el pronóstico.

[48] C. A. D., José Roberto Niño, Introducción a la Mecánica de Fluidos. Univ. Nacional de Colombia.

[49] Abdunaser Sayma, First Edition Computational Fluid Dynamics. 2009 Abdunaser Sayma y bookboon.com.

[50] C. Y. A, Y. A. Çengel, y J. M. Cimbala, Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones. McGraw-Hill, 2006.

[51] G. Scillone, «análisis del flujo fluido dentro de un túnel de viento subsónico empleando MEF.

[52] L. Rodríguez Collado, M. Collado Contreras, E. Rodríguez Malaver, y L. Patiño, «Análisis numérico del comportamiento del aire en un sistema de distribución de aire acondicionado empleando los modelos de turbulencia ke, RNG ke y el modelo de las tensiones de Reynolds», Ingeniare Rev. Chil. Ing., vol. 16, n.o 2, pp. 370–382, 2008.

[53] P. L. Davis, A. T. Rinehimer, y M. Uddin, «A comparison of RANS-based turbulence modeling for flow over a wall-mounted square cylinder», en 20th Annual Conference of the CFD Society of Canada, 2012.

[54] Prof. Y. Niño, «Modelación numérica en ingeniería hidráulica y ambiental», Departamento de Ingeniería Civil, U de Chile. Sem. Primavera 2002

[55] Luis M. de la Cruz Salas, «Método de volumen finito para flujo en una fase», Grupo de Modelación Matemática y Computacional, Depto. de Recursos Naturales, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 2011.

[56] «C15 : Computer Controlled Subsonic Wind Tunnel». [En línea]. Disponible en: <http://discoverarmfield.com/en/products/view/c15/computer-controlled-subsonic-wind-tunnel>. [Accedido: 30-ene-2015].

[57] «NORMATIVA AMCA TUNEL DE VIENTO.pdf». .

[58] Cálculos y Ensayos. Estudio de los proyectos. Técnicas de Construcción II > [En Línea]

https://books.google.com.ec/books?id=6DvvPcaxxGgC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false