



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“COEFICIENTES DE PRESIÓN EN UNA ESTRUCTURA DE
VIDRIO TIPO PIRAMIDAL MEDIANTE CFD”**

TESIS

PRESENTADA POR:

I.C. FELIPE AMARO CANTO

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

OPCIÓN ESTRUCTURAS

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2020

“Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiera sido aprobado por el sínodo, el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él”.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de posgrado.

RESUMEN

El objetivo principal de esta tesis consiste en emplear la dinámica de fluidos computacionales (o CFD, por sus siglas en inglés) para simular el comportamiento que presenta el viento al incidir en la geometría de una estructura, durante este proceso se modeló en dos direcciones de viento, 0° (incidencia frontal) y 45° (incidencia diagonal).

Se estudió una estructura de vidrio tipo piramidal, ya que su geometría ha sido utilizada en diversas partes del mundo y presenta características que no se encuentran en la normatividad, por lo que requieren un análisis basado en ensayos en un túnel de viento. Dado que en ciertas ocasiones es imposible contar con esta herramienta, se planteó una forma alterna de obtener la información necesaria; aprovechando los avances tecnológicos, se realizó una simulación empleando CFD.

Se utilizó el programa ANSYS Inc. para la simulación de dos casos de incidencia del viento sobre una estructura tipo piramidal. Este software permite generar el modelo, ingresar los parámetros del fluido (propiedades y características del viento), establecer la discretización del dominio, definir las condiciones de frontera y plantear las ecuaciones con la que resolverá la simulación, de tal manera que el fluido tenga un comportamiento igual al que tendría en la realidad.

Después de realizar la simulación y haber obtenido los coeficientes de presión (C_{pe}), se realizó una comparación de los resultados obtenidos, con aquellos de una prueba en el túnel aerodinámico, para ambas direcciones de embate del viento sobre la estructura, con el fin de validar la simulación y el uso del programa para el análisis de estructuras tipo piramidal.

De la comparación, se concluyó, que la dirección menos favorable ocurre a 0° (incidencia frontal), ya que en ella se presentaron las mayores presiones. Los coeficientes de presión obtenidos fueron de: -1.1 para succión en la cara de sotavento y de 0.70 para empuje en la cara de barlovento, con un 0.09% de probabilidad de discrepancia entre resultados obtenidos en el túnel de viento y con CFD.

ABSTRACT

The main objective of this thesis consists in the use of computational fluids dynamics (CFD) to simulate the behavior that the wind presents upon impact with the geometry of a structure. During this process, two wind directions were modeled, 0° (frontal incidence) and 45° (diagonal incidence).

A pyramidal glass structure was studied since this geometry has been used in various parts of the world. Because it has characteristics that are not found in the regulations, they require an analysis in an aerodynamic tunnel. For most of the occasions, it is impossible to have this kind of facility, so, an alternative way of obtaining the information is necessary. In this thesis, it was done by taking advantage of technological advances; a simulation was carried out using CFD.

The ANSYS Inc. program was used to simulate two cases of wind incidence on a pyramidal structure. This software allows to generate the model, introduce the parameters of the fluid (properties and characteristics of the wind), establish the discretization of the domain, define the boundary conditions and propose the equations with which the simulation will be solved so that the fluid has a behavior equal to what it would have in reality.

After carrying out the simulation and obtaining the pressure coefficients (C_{pe}), the results were compared with those obtained from an aerodynamic tunnel for both directions of wind attack on the structure, as a means of validating the simulation, and accept the use of the program for the analysis of pyramidal structures.

From the comparison, it was concluded that the least favorable direction occurred at 0° (frontal incidence) since higher coefficients were found. The coefficients values were: -1.1 for suction on the leeward face, and 0.70 for pressures on the windward face, with 0.09% probability of discrepancy in the similarity of results between wind tunnel and CFD values.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I	1
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO II	5
2 REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	5
2.1 Cubiertas piramidales.....	5
2.2 Clasificación de pirámides.....	5
2.3 Tipo de vidrio.....	6
2.4 Cubiertas piramidales de vidrio del mundo.....	7
2.5 Mecánica de fluidos.....	10
2.5.1 Propiedades fundamentales de los fluidos.....	10
2.5.1.1 Fluido como medio continuo.....	10
2.5.1.2 Campo de velocidades.....	10
2.5.1.3 Viscosidad.....	11
2.5.2 Clasificación de los movimientos de fluidos.....	11
2.5.2.1 Flujos viscosos y no viscosos.....	11
2.5.2.2 Flujos laminar y turbulento.....	12
2.5.2.3 Flujos compresibles e incompresibles.....	13
2.5.2.4 Flujos internos y externos.....	13

2.6 Diseño eólico.	14
2.6.1 Número de Reynolds.....	15
2.6.2 Capa límite.	16
2.6.3 Desprendimiento de la corriente.....	16
2.6.4 Desprendimiento de la capa límite en cuerpos con aristas.	17
2.7 Dinámica de fluidos computacional (CFD).....	18
2.7.1 Proceso de solución de un problema CFD.....	19
2.8 Estudios previos de cubiertas piramidales.	20
2.9 Normas de diseño de estructuras piramidales.	21
2.10 Conclusiones de la revisión de la literatura.....	21
CAPÍTULO III	23
3 METODOLOGÍA.....	23
3.1 Prediseño de la estructura.	24
3.2 Preproceso.	26
3.2.1 Geometría del dominio.....	26
3.2.2 Mallado del dominio.	28
3.2.2.1 Caso con incidencia frontal.....	28
3.2.2.2 Caso con incidencia diagonal.	31
3.2.3 Configuración del solucionador (FLUENT).....	34
3.2.3.1 General.....	35
3.2.3.2 Modelos.	36
3.2.3.3 Material del fluido.....	37
3.2.3.4 Condiciones de celdas.....	38
3.2.3.5 Condiciones de frontera.....	39

3.2.3.6 Valores de referencia.....	39
3.3 Proceso.....	40
3.3.1 Métodos para la solución.	40
3.3.1.1 Esquema.	40
3.3.1.2 Discretización espacial.	41
3.3.2 Control de parámetros.....	42
3.3.3 Monitoreo de residuos.....	44
3.3.4 Inicialización.....	45
3.3.5 Inicio del cálculo.....	46
CAPÍTULO IV.....	47
4 RESULTADOS.....	47
4.1 Postproceso.....	47
4.1.1 Dirección 0°.....	48
4.1.2 Dirección 45°.....	50
4.2 Validación con el túnel de viento.	51
4.2.1 Resultado en el túnel de viento, dirección 0°.	51
4.2.2 Resultados en el túnel de viento, dirección 45°.....	53
4.2.3 Comparación entre CFD y Túnel de viento.	54
4.2.3.1 Dirección 0°.	55
4.2.3.2 Dirección 45°.	56
CAPÍTULO V.....	58
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	58
5.1 Conclusiones.	58
5.2 Recomendaciones.	59

6 REFERENCIAS.....	60
APÉNDICE A	62
A.1 Ensaye en el túnel de viento.	62
APÉNDICE B	77
B.1 Coordenadas en dimensiones del prototipo, con base en los puntos instrumentados.	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Pirámide triangular, cuadrangular y hexagonal.	6
Figura 2.2 Movimiento de un fluido en flujo laminar.	12
Figura 2.3 Movimiento de un fluido en flujo turbulento.	12
Figura 2.4 Ejemplo de un flujo interno.	13
Figura 2.5 Ejemplo de un flujo externo.	14
Figura 2.6 Desarrollo de la capa límite.	16
Figura 2.7 Desprendimiento de la corriente.	17
Figura 2.8 Desprendimiento de capa límite en cuerpos con aristas.	18
Figura 2.9 Pasos para la solución de un problema utilizando CFD	20
Figura 3.1 Sistema de análisis “FLUENT”.	24
Figura 3.2 Generación del modelo del prototipo. Selección del tipo de sólido.	25
Figura 3.3 Sólido tipo “Pyramid”. Parámetros de medida.	25
Figura 3.4 Modelo final del prototipo.	26
Figura 3.5 Sección transversal de la geometría del dominio.	27
Figura 3.6 Extensión longitudinal a barlovento de la geometría del dominio.	27
Figura 3.7 Extensión longitudinal a sotavento de la geometría del dominio.	28
Figura 3.8 Dominio por multibloques para incidencia frontal del fluido. Vista aérea.	28
Figura 3.9 Dominio por multibloques para incidencia frontal del fluido. Vista isométrica.	29
Figura 3.10 Dominio para incidencia frontal del fluido. Porción considerando la simetría.	29
Figura 3.11 Mallado del modelo para incidencia frontal del fluido. Vista lateral considerando la simetría.	30

Figura 3.12 Mallado del modelo para incidencia frontal del fluido. Vista en planta considerando la simetría.	30
Figura 3.13 Detalles del mallado.	31
Figura 3.14 Dominio por multibloques para incidencia diagonal del fluido. Vista aérea.	32
Figura 3.15 Dominio por multibloques para incidencia diagonal del fluido. Vista isométrica.	32
Figura 3.16 Dominio para incidencia diagonal del fluido. Porción considerando la simetría.	33
Figura 3.17 Mallado del modelo para incidencia diagonal del fluido. Vista lateral.	33
Figura 3.18 Mallado del modelo para incidencia diagonal del fluido. Vista en planta.	34
Figura 3.19 Detalles del mallado.	34
Figura 3.20 Ajustes iniciales del solucionador (FLUENT).	35
Figura 3.21 Configuración general del solucionador (ANSYS).	36
Figura 3.22 Configuración del modelo viscoso (Fluent).	37
Figura 3.23 Propiedades estándar del fluido, aire (Fluent).	38
Figura 3.24 Condiciones de celdas que conforma el dominio (Fluent).	38
Figura 3.25 Definición de valores iniciales de referencia (Fluent).	40
Figura 3.26 Configuración del método para la solución (Fluent).	42
Figura 3.27 Configuración del control de parámetros (Fluent).	43
Figura 3.28 Configuración del monitoreo de residuos (Fluent).	44
Figura 3.29 Configuración para la inicialización de la solución (Fluent).	45
Figura 3.30 Panel de posibles errores (Fluent).	46
Figura 3.31 Configuración de inicio de cálculo (Fluent).	46

Figura 4.1 Contornos de C_{pe} en C1, mediante CFD con dirección 0° (Incidencia Frontal).....	48
Figura 4.2 Contornos de C_{pe} en C2 y C3, mediante CFD con dirección 0° (Incidencia Frontal).....	49
Figura 4.3 Contornos de C_{pe} en C4, mediante CFD con dirección 0° (Incidencia Frontal).....	49
Figura 4.4 Contornos de C_{pe} en C1 y C2, mediante CFD con dirección 45° (Incidencia Diagonal).....	50
Figura 4.5 Contornos de C_{pe} en C3 y C4, mediante CFD con dirección 45° (Incidencia Diagonal).....	51
Figura 4.6 Contornos de C_{pe} en C1, en Túnel de viento con dirección 0° (Incidencia Frontal).....	52
Figura 4.7 Contornos de C_{pe} en C2 y C3, en Túnel de viento con dirección 0° (Incidencia Frontal).....	52
Figura 4.8 Contornos de C_{pe} en C4, en Túnel de viento con dirección 0° (Incidencia Frontal).....	53
Figura 4.9 Contornos de C_{pe} en C1 y C2, en Túnel de viento con dirección 45° (Incidencia Diagonal).....	54
Figura 4.10 Contornos de C_{pe} en C3 y C4, en Túnel de viento con dirección 45° (Incidencia Diagonal).....	54
Figura A 1 Idealización del modelo dentro de la cámara de ensayos del túnel de viento.....	64
Figura A 2 Espaciamiento puntos de medición.	65
Figura A 3 Distribución de puntos de medición.	65
Figura A 4 Modelo instrumentado por dentro.	70
Figura A 5 Esquema del túnel de viento.....	70
Figura A 6 Zona de rectificación y pantallas correctoras de flujo.	71

Figura A 7 Zona de contracción.	71
Figura A 8 Zona de simulación de rugosidades.	72
Figura A 9 Cámara de ensayos.....	72
Figura A 10 Difusor.	73
Figura A 11 Ventilador (vista interior).	73
Figura A 12 Micromanómetro con tubo de pitot.....	74
Figura A 13 Multisensor de Presiones marca Esterline, modelo 9116.	74
Figura A 14 Direcciones de estudio.....	75
Figura A 15 Prueba del modelo a 0°.	75
Figura A 16 Prueba del modelo a 45°.	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Prototipo de estudio.....	24
Tabla 3.2 Condiciones de frontera usados en el modelo.	39
Tabla A 1 Parámetros para semejanza geométrica.	63
Tabla A 2 Resumen de datos obtenidos en el análisis con velocidad del viento de 18 m/s.	67
Tabla A 3 Resumen de datos obtenidos en el análisis con velocidad del viento de 20 m/s.	67

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes.

Debido a los avances constructivos, la arquitectura moderna demanda innovación de las estructuras en sus configuraciones y materiales empleados. Ocasionando que los diseñadores de la actualidad busquen edificaciones únicas y minimalistas. (Amarante, et al., 2015).

Las cubiertas como objeto de acentuación en la estética de un edificio se han convertido en pieza fundamental del diseño que, en conjunto con la tendencia de obtener limpieza y transparencia en las fachadas, han llevado al vidrio como material principal de la época moderna y al empleo de sistemas de refuerzo con el menor material visible, que inclina a la aplicación de adhesivos o fijaciones metálicas (Amarante, et al., 2015).

Una cubierta es un elemento constructivo que protege a los edificios de los diferentes fenómenos meteorológicos en la parte superior y, por extensión, a la estructura sustentante de dicha cubierta. Aunque el conjunto de ambas, cubierta y estructura lleva el nombre de techumbre (Lajo Pérez, 1990).

Entre los diferentes tipos de cubierta que existen, la cúpula es un elemento arquitectónico que desde los albores de la civilización se construyeron con materiales variados, desde el uso de hormigón y escoria volcánica, hasta cúpulas reforzadas con acero; pero no es hasta el siglo XX, con el desarrollo tecnológico, que se modificó su criterio constructivo, haciendo posible la cobertura de mayores espacios sin apoyos intermedios, utilizando cables tensores, estructuras reticuladas tridimensionales, y disposiciones estructurales basadas en catenarias (Vidal, et al., 2007).

Hoy en día existen diversos diseños de cubiertas que, gracias a los avances constructivos, se han vuelto cada vez más audaces, tanto en el material empleado como en la distribución de la estructura.

La amplia gama de posibilidades al diseñar una techumbre ha llevado a la utilización de antiguas estructuras, dándoles un toque moderno. Es así como el uso de una estructura tipo piramidal pasó, de ser una tumba real, a un aditamento más de un edificio, para acentuar su estética.

El uso de vidrio como material para las cubiertas ha ido en aumento en la actualidad, haciéndolo popular ya que los diseñadores, en busca de múltiples aspectos como la transparencia, han encontrado en el uso de paneles de vidrio una solución factible (Amarante, et al., 2015).

1.2 Planteamiento del problema.

En el uso de cubiertas de vidrio existen tres grandes preocupaciones sobre su desempeño inmediato ante eventos naturales: el riesgo del vidrio colapsando cerca de los usuarios, el costo asociado a las reparaciones y tiempo perdido de ocupación del edificio.

Debido a que el atractivo turístico de la Península de Yucatán se centra en sus playas, esto ha llevado a los arquitectos al diseño de centros vacacionales cerca de la costa marina, la cual se encuentra más susceptible a cargas de viento por varios motivos, como el que las edificaciones se encuentran orientadas con vista a la costa, fachadas y cubiertas completamente de vidrio para resaltar la estética transparente, áreas extensas desprotegidas que complica la colocación de algún tipo de protección preventiva y el no contar con algún tipo de impedimento para que el aire no impacte directamente contra la edificación.

Existen registros históricos de afectaciones por grandes rachas de viento, (Avelar, 2006), en donde se pueden apreciar los daños de colapso de marcos y cristales, que transmiten una idea del nivel de afectación que dichos sucesos traen a la zona de estudio.

El objetivo al momento de proyectar un edificio, es que sea funcional en todas sus partes, por lo que se pretende que este estilo de diseño no comprometa la seguridad del usuario y del mismo inmueble.

Debido a lo mencionado en los párrafos anteriores, se ha vuelto indispensable el conocer la distribución de presiones sobre las cubiertas para el diseño de éstas.

Al ser las formas piramidales un tipo de estructura que no forma parte de la normatividad existente, el análisis se puede realizar mediante ensayos en túneles aerodinámicos o mediante la utilización de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés).

El uso de CFD permite estudiar la distribución de presiones mediante modelos computacionales simplificados para obtener resultados con una gran aproximación a la realidad (Pérez, 2017).

En este trabajo se llevó a cabo el estudio del efecto del viento sobre una cubierta de vidrio con geometría piramidal mediante el uso de CFD, que permite realizar la simulación numérica de las ecuaciones que rigen a los fluidos y determinar la distribución de presiones que se generan en la superficie de la estructura y las fuerzas transmitidas a los soportes.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo general.

Determinar mediante una simulación en CFD la distribución de presiones de una estructura de vidrio tipo piramidal sometida a la acción del viento y validar sus resultados de manera experimental en un túnel de viento.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Obtener el modelo computacional de una estructura tipo piramidal.
- Definir las características y direcciones de las acciones del viento para las pruebas.

- Obtener la distribución de presiones en la superficie del modelo computacional para cada dirección.
- Verificación de resultado obtenidos en la simulación con los resultados obtenidos en un túnel de viento.

CAPÍTULO II

2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Cubiertas piramidales.

El uso de formas singulares en las estructuras combina la geometría con las consideraciones ergonómicas, económicas, estructurales y eficiencia energética.

La pirámide, como opción preferida para los tejados, es elegida debido a muchos motivos, entre los que se encuentran sus siguientes características:

- **Estables:** Debido al tamaño de su base, la ubicación del centro de gravedad y las formas triangulares que se generan en sus lados.
- **Resistentes:** Las estructuras trianguladas aportan estabilidad y resistencia con un número mínimo de perfiles.
- **Rígidas:** La geometría formada por los elementos y las uniones permite prescindir de subestructuras sin problemas de grandes deformaciones.
- **Auto limpiantes:** Es una estructura que por su elevado grado de inclinación se mantiene limpia.
- **Durables:** Su propia geometría evita problemas de roturas, desgastes o malos usos, ya que, debido a su inclinación, permite rápida evacuación de condensación y menor tránsito de personas en la cubierta.
- **Requieren poco mantenimiento:** Debido a la inclinación que presentan, a diferencia de los techos planos, no permiten la acumulación de líquidos y filtraciones, por lo que su mantenimiento es menor.

2.2 Clasificación de pirámides.

Una pirámide es un cuerpo geométrico que tiene una base (puede ser cualquier polígono) y un número de caras laterales (Igual al número de lados del polígono de

su base). Las pirámides acaban en un vértice llamado cúspide. Las propiedades que los caracterizan son:

- Número de caras y vértices.
- Número de Aristas.
- Polígono de la base
- Todas las caras laterales se unen en la cúspide.

Las pirámides se pueden clasificar según el número de lados del polígono de la base (triangular, cuadrangular, hexagonal, etc.)

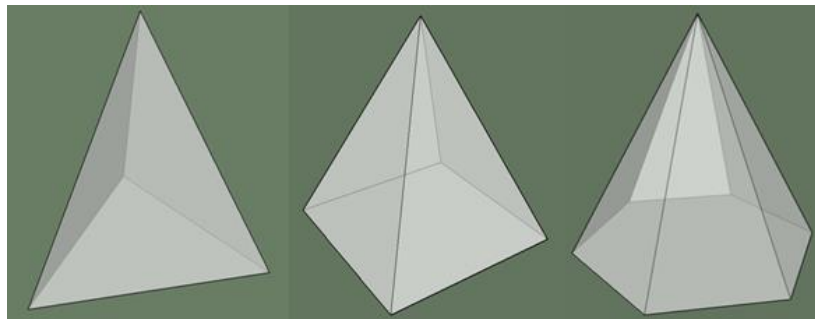


Figura 2.1 Pirámide triangular, cuadrangular y hexagonal.

2.3 Tipo de vidrio.

Este tipo de estructuras normalmente están constituidas por vidrio laminado, que es el resultado de la unión de dos o más placas de vidrio, intercalando entre ellas, una o más láminas de PVB (Polivinil Butiral), consiguiendo de este modo, la combinación de las propiedades específicas del vidrio (transparencia y durabilidad), con las del PVB, entre las que se encuentran: el prevenir lesiones en personas frente a la rotura, al evitar que los fragmentos se separen, el aislamiento acústico y el bloqueo de los rayos UV (TEMPLAGLASS S.A., 2017).

La evolución en los materiales y los procesos de fabricación de este tipo de vidrios han permitido que hoy en día éstos sean utilizados en la construcción, sustituyendo a otros elementos y ofreciendo, no sólo las características técnicas necesarias para ello, sino también aportando una serie de criterios estéticos que sólo está al alcance

de este material, como pueden ser la transparencia, la luminosidad o la versatilidad de diseños.


2.4 Cubiertas piramidales de vidrio del mundo.

En la actualidad existe un gran interés en el uso de las formas piramidales en cubiertas. Se han utilizado de esta manera en edificios con variadas funciones, entre las que se encuentran museos, arenas deportivas, conservatorios y hoteles entre otros. Como ejemplos, podemos señalar:

Museo de Louvre	
Construida en 1989 en la ciudad de París, Francia.	
Figura de la base	Cuadrangular
Número de caras	5
Número de vértices	5
Número de lados de la base	4
Altura	21.65 m
Largo por lado de base	35 m
Ángulo de inclinación	51.7 °




Memphis Bass Pro Pyramid	
Construida en 1991 en la ciudad de Memphis, Estados Unidos.	
Figura de la base	Cuadrangular
Número de caras	5
Número de vértices	5
Número de lados de la base	4
Altura	98 m
Largo por lado de base	180 m
Ángulo de inclinación	47 °




Nima Sand Museum	
Construida en 1991 en la ciudad de Kotogahama, Japón.	
Figura de la base	Cuadrangular
Número de caras	5
Número de vértices	5
Número de lados de la base	4
Altura	21 m
Largo por lado de base	17 m
Ángulo de inclinación	68 °




Bolz Conservatory	
Construida en 1991 en la ciudad de Wisconsin, Estados Unidos.	
Figura de la base	Cuadrangular
Número de caras	5
Número de vértices	5
Número de lados de la base	4
Altura	15 m
Largo por lado de base	30 m
Ángulo de inclinación	45 °



Pirámide del Hotel Luxor Las Vegas	
Construida en 1993 en la ciudad de Las Vegas, Estados Unidos.	
Figura de la base	Cuadrangular
Número de caras	5
Número de vértices	5
Número de lados de la base	4
Altura	99 m
Largo por lado de base	183 m
Ángulo de inclinación	47 °




The Walter Pyramid	
Construida en 1994 en la ciudad de Long Beach, Estados Unidos.	
Figura de la base	Cuadrangular
Número de caras	5
Número de vértices	5
Número de lados de la base	4
Altura	58 m
Largo por lado de base	105 m
Ángulo de inclinación	47.8 °



Hotel Paradisus México	
Construida en 2001 en la ciudad de Cancún, México.	
Figura de la base	Octagonal
Número de caras	9
Número de vértices	9
Número de lados de la base	8
Altura	21.5 m
Largo por lado de base	42 m
Ángulo de inclinación	44 °



Palace of Peace and Reconciliation	
Construida en 2006 en la ciudad de Astana, Kazajistán.	
Figura de la base	Cuadrangular
Número de caras	5
Número de vértices	5
Numero de lados de la base	4
Altura	62 m
Largo por lado de base	62 m
Angulo de inclinación	63 °



2.5 Mecánica de fluidos.

Para poder utilizar el CFD como herramienta de análisis para estructuras sujetas a las acciones del viento, es necesario conocer las propiedades fundamentales de los fluidos y clasificación de sus movimientos, que nos ayudarán a determinar el comportamiento que se busca modelar.

2.5.1 Propiedades fundamentales de los fluidos.

Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente bajo la aplicación de un esfuerzo de corte, sin importar cuan pequeño pueda ser este esfuerzo. Éstos abarcan las fases líquidas y gaseosas de las formas físicas en las cuales existe la materia; la mecánica de fluidos estudia su comportamiento en reposo y en movimiento. El conocimiento y comprensión de los principios y conceptos básicos de la mecánica de fluidos son esenciales para analizar cualquier sistema en el cual un fluido sea el medio de trabajo. (Fox y McDonald, 1995).

2.5.1.1 Fluido como medio continuo.

Los fluidos se tratan como sustancias infinitamente divisibles, es decir, como medios continuos, dejando de lado el comportamiento de las moléculas individuales.

Como consecuencia, se considera que cada propiedad del fluido tiene un valor definido en cada punto en el espacio. Por ello, propiedades del fluido como la densidad, temperatura, velocidad, etc., se consideran como funciones continuas de la posición y el tiempo (Fox y McDonald, 1995).

2.5.1.2 Campo de velocidades.

Debido a la suposición de tratar a los fluidos como un medio continuo, existen propiedades que se pueden describir mediante campos. Al tratar con fluidos en movimiento, necesariamente nos concierne la descripción de su campo de velocidades.

Si definimos una partícula de fluido como una masa pequeña de identidad fija de volumen, entonces la velocidad queda definida como instantánea en un punto y un tiempo determinado.

La velocidad en cualquier punto en el campo de flujo podría variar de un instante a otro. Por lo que, si las propiedades no cambian con el tiempo, el flujo se puede denominar estacionario. En consecuencia, cualquier propiedad puede variar de un punto a otro en el campo, pero todas las propiedades permanecen constantes con el tiempo en todo punto (Fox y McDonald, 1995).

2.5.1.3 Viscosidad.

Se ha definido un fluido como una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo de corte, por tanto, en ausencia de este, no habrá deformación.

Los fluidos se pueden clasificar de manera general de acuerdo con la relación entre el esfuerzo de corte aplicado y la relación de deformación. Por tanto, los fluidos en los que el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la tasa de deformación son fluidos newtonianos.

Los fluidos más comunes tales como el agua, aire y la gasolina son newtonianos en condiciones normales (Fox y McDonald, 1995).

2.5.2 Clasificación de los movimientos de fluidos.

2.5.2.1 Flujos viscosos y no viscosos.

La principal subdivisión en los movimientos de los fluidos se da entre los flujos viscosos y no viscosos. Los cuales son necesarios definir, ya que de esto dependerá el comportamiento del fluido en contacto directo con una frontera sólida.

En la realidad los flujos no viscosos no existen, pero se define que tienen viscosidad nula con el fin de desprestigiar sus fuerzas y simplificar los análisis.

En esta investigación se modelan las acciones del viento incidiendo contra una estructura piramidal (frontera solida) lo que hace de suma importancia definir el flujo

como viscoso para que el fluido en contacto directo con ésta no genere deslizamiento y suceda la separación del flujo donde existan cambios rápidos en la geometría, y así, asemejarse lo más posible a la realidad.

2.5.2.2 Flujos laminar y turbulento.

Los regímenes de flujo viscoso se clasifican en laminar o turbulento con base en la estructura del flujo. En el régimen laminar, como se puede observar en la Figura 2.2, la estructura de flujo se caracteriza por un movimiento continuo en láminas, o capas. En cambio, como se presenta en la Figura 2.3, la estructura del flujo en el régimen turbulento, se caracteriza por movimientos tridimensionales, al azar, de partículas de fluido que se suman al movimiento promedio (Fox y McDonald, 1995).

Durante la simulación, se requiere monitorear que las características del flujo se apeguen a la realidad, por lo que una de las herramientas para ver que se está llevando a cabo esto correctamente, es verificar que el flujo laminar y turbulento se presenten durante la modelación de manera coherente con el comportamiento que se espera, al tener contacto con la superficie de la estructura.

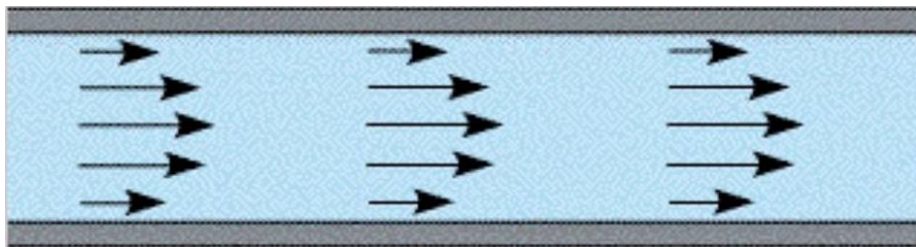


Figura 2.2 Movimiento de un fluido en flujo laminar.

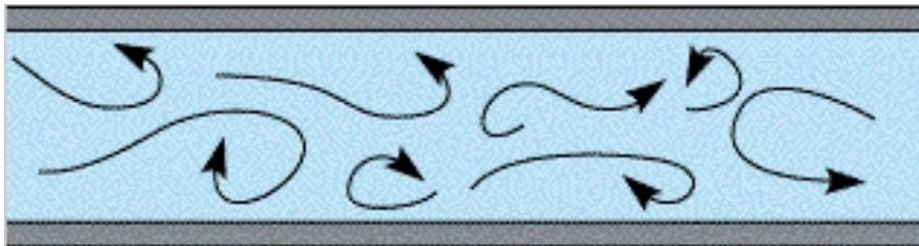


Figura 2.3 Movimiento de un fluido en flujo turbulento.

2.5.2.3 Flujos compresibles e incompresibles.

Los flujos en los cuales las variaciones en la densidad son despreciables se denominan incompresibles; cuando las variaciones de densidad dentro de un flujo no son despreciables, el flujo se llama compresible. Los ejemplos más comunes de flujo compresible conciernen al flujo de gases, en tanto que el flujo de líquidos puede tratarse con frecuencia como incompresibles. Sin embargo, los flujos de gas con transferencia de calor despreciable se pueden considerar incompresibles, siempre que las velocidades de flujo sean pequeñas en relación con la velocidad del sonido; la relación de la velocidad de flujo V , con la velocidad local del sonido, c , en el gas se define como número de Mach de acuerdo con la Ecuación 2.1.

$$M = \frac{V}{c} \quad \text{Ec. 2.1}$$

2.5.2.4 Flujos internos y externos.

Los flujos delimitados por superficies solidas se llaman internos o de ducto, mientras que los flujos sobre cuerpos sumergidos en un fluido sin fronteras reciben el nombre de flujos externos. Estos pueden ser laminares o turbulentos, compresibles o incompresibles. La Figura 2.4 y Figura 2.5 ejemplifican estos flujos.



Figura 2.4 Ejemplo de un flujo interno.

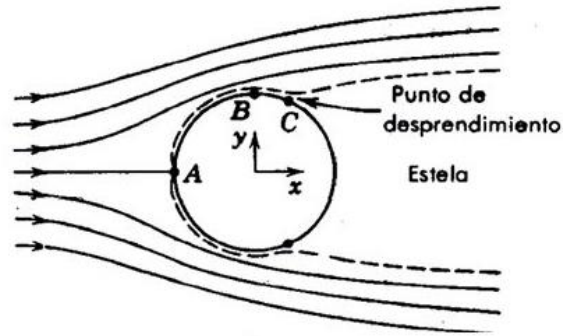


Figura 2.5 Ejemplo de un flujo externo.

2.6 Diseño eólico.

En la aerodinámica es habitual utilizar coeficientes adimensionales para representar las fuerzas y momentos que actúan sobre el movimiento de un fluido alrededor de un obstáculo, la ventaja de esto, es que permite a la hora de modelar, caracterizar e identificar a los flujos con unos pocos parámetros adimensionales, lo que confiere una gran generalidad a los resultados, además de reducir el número de variables involucradas (Meseguer Ruiz, et al., 2001).

Para conocer el estado de cargas producido por el viento sobre un obstáculo, será preciso determinar la distribución de presiones sobre las superficies del cuerpo para integrarlas y obtener las cargas globales. Así, los coeficientes adimensionales que se suelen usar para determinar las cargas producidas por un fluido sobre un cuerpo son (Meseguer Ruiz, et al., 2001):

- Coeficiente de presión (Ecuación 2.2):

Es la diferencia entre la presión en un punto considerado (p) y la presión dinámica de la corriente incidente, ($\rho U_{\infty}^2/2$) es decir:

$$C_p = \frac{p - p_{\infty}}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde: U_{∞} es el valor de la velocidad media del viento de referencia corriente arriba y ρ es la densidad del aire.

- Coeficiente de fuerza (Ecuación 2.3):

Es definido de manera similar al coeficiente de presión:

$$C_f = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2 A} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde: F la fuerza aerodinámica, y A es el área de referencia (no necesariamente el área donde la fuerza actúa).

- Coeficiente de momento (Ecuación 2.4):

De igual manera que el coeficiente de presión y fuerza se define como:

$$CM = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2 A^2} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde M es el momento inducido por el flujo del fluido en el centro del área de referencia:

2.6.1 Número de Reynolds.

Los dos efectos con mayor influencia en el flujo del aire son los efectos viscosos y los efectos inerciales; y a partir de la relación de estos efectos, se obtiene un índice que puede servir para conocer el tipo de características o el tipo de fenómeno que se puede esperar que ocurra al interior del fluido. Este índice o parámetro adimensional, definido en la Ecuación 2.5 como **Re**, es el Número de Reynolds que mide la relación de las fuerzas de inercia frente a las fuerzas viscosas (Pérez, 2017).

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad \text{Ec. 2.5}$$

ρ : Densidad del fluido (kg/m^3).

v : Velocidad del fluido (m/s).

L : Longitud característica (m).

μ : Viscosidad dinámica ($kg/(s * m)$).

2.6.2 Capa límite.

La capa límite es una zona existente alrededor de un cuerpo que se desplaza por un fluido, en la cual la velocidad del fluido respecto al cuerpo varía desde cero hasta el 99% de la velocidad exterior. En esta zona que suele ser delgada, si el Número de Reynolds es suficientemente alto, los gradientes de velocidad son grandes y, en consecuencia, los efectos viscosos importantes (Prandtl, 1904).

En la Figura 2.6 se muestra el desarrollo de una capa límite sobre una placa plana paralela a la corriente incidente. La capa límite nace laminar, (a), y recorrida una distancia se produce la transición de régimen laminar a régimen turbulento, (b), para transformarse en una capa límite turbulenta, (c) (Meseguer Ruiz, et al., 2001).

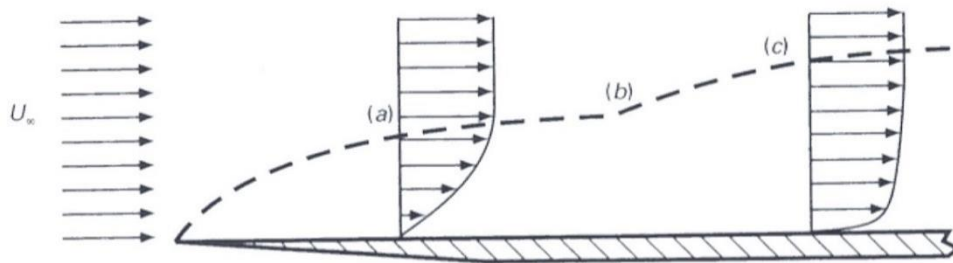


Figura 2.6 Desarrollo de la capa límite.

En una capa límite adherida, la presión es constante a lo largo de rectas perpendiculares a la superficie del obstáculo y adicionalmente, toda capa límite se ensancha según avanza sobre la superficie de un obstáculo, este ensanchamiento es debido a dos fenómenos, los de fricción y a los gradientes de presiones (Meseguer Ruiz, et al., 2001).

2.6.3 Desprendimiento de la corriente.

Cuando las partículas próximas a la pared terminan por retroceder en vez de avanzar, se dice que la capa límite está desprendida, este efecto es ocasionado por el ensanchamiento de la capa límite que se debe a las fuerzas de fricción (deceleración por viscosidad entre capas) y debido al campo de presiones.

En la Figura 2.7 se muestran los perfiles de velocidad en diferentes secciones de una capa límite en presencia de un gradiente adverso de presiones ($P_2 > P_1$), la

cual la desacelera llegando a invertir el sentido del flujo de la misma (Meseguer Ruiz, et al., 2001).

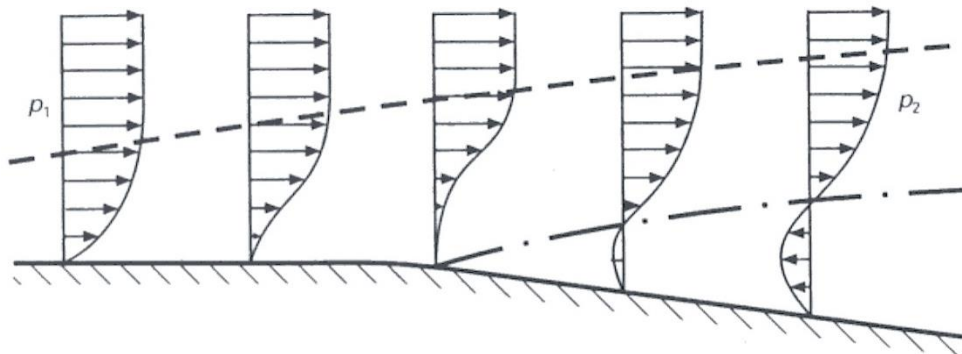


Figura 2.7 Desprendimiento de la corriente.

2.6.4 Desprendimiento de la capa límite en cuerpos con aristas.

En cuerpos con aristas o bordes agudos como se muestra en la Figura 2.8, la corriente se acelera mucho cuando se aproxima a las esquinas (gradiente favorable de presión a barlovento de la esquina) y sufre una desaceleración de la misma magnitud después de sobrepasarlas (gradiente desfavorable de presión a sotavento de la esquina). Antes de una esquina, el gradiente de presión es favorable y muy intenso, y después de la esquina el gradiente de presión es desfavorable y también muy intenso. En obstáculos con estas características la capa límite se desprende siempre en las aristas a Números de Reynolds bajos, y una vez desprendida permanece inalterada cualquiera que sea el valor del Número de Reynolds (Meseguer Ruiz, et al., 2001).

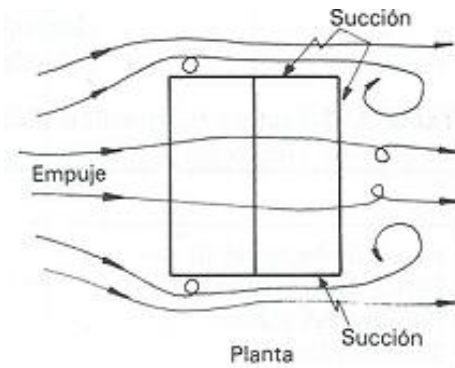


Figura 2.8 Desprendimiento de capa límite en cuerpos con aristas.

2.7 Dinámica de fluidos computacional (CFD).

La dinámica de fluidos computacional es el análisis de sistemas que involucran flujo de fluidos, transferencia de calor y fenómenos asociados mediante simulaciones de computadora.

Esta técnica pretende resolver numéricamente las ecuaciones que explican el comportamiento de los fluidos, que están gobernados por los principios de conservación de la masa, la conservación de la cantidad de movimiento y conservación de la energía.

Estos principios pueden traducirse a un conjunto de expresiones matemáticas, las llamadas ecuaciones de Navier-Stokes que, junto a la ecuación de estado del fluido, permiten calcular las tres componentes de la velocidad, la presión, la temperatura y la densidad, en todo el espacio ocupado por el fluido (Meseguer Ruiz, et al., 2001).

- Ecuación de conservación de la masa o continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = S_m \quad \text{Ec. 2.6}$$

- Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \rho g + F \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde:

$\rho g + F$: Fuerza de cuerpo.

t : Tiempo.

S_m : Masa agregada.

Para una simulación típica, el usuario tiene que seleccionar las variables a estudiar, la forma aproximada de las ecuaciones de gobierno, el modelo de turbulencia, el dominio computacional, la malla computacional, las condiciones de frontera, los esquemas de discretización y criterios de convergencia (Pérez, 2017).

Los códigos de CFD están estructurados alrededor de algoritmos numéricos que pueden resolver problemas de fluidos. Con la finalidad de ser accesibles a los usuarios, todos los softwares de CFD comerciales incluyen interfaces gráficas para la introducción de parámetros del problema y para examinar los resultados. Así, las pautas para realizar la simulación numérica están estructuradas de acuerdo con ciertos pasos generales (Franke, et al., 2005).

2.7.1 Proceso de solución de un problema CFD.

En los paquetes de software existentes de CFD, el usuario debe especificar las condiciones del problema que se va a resolver, así como proveer a la computadora de ciertos parámetros de resolución para que el programa consiga encontrar una solución correcta del problema. La Figura 2.9 representa esquemáticamente los pasos a seguir para realizar un análisis utilizando un software CFD.

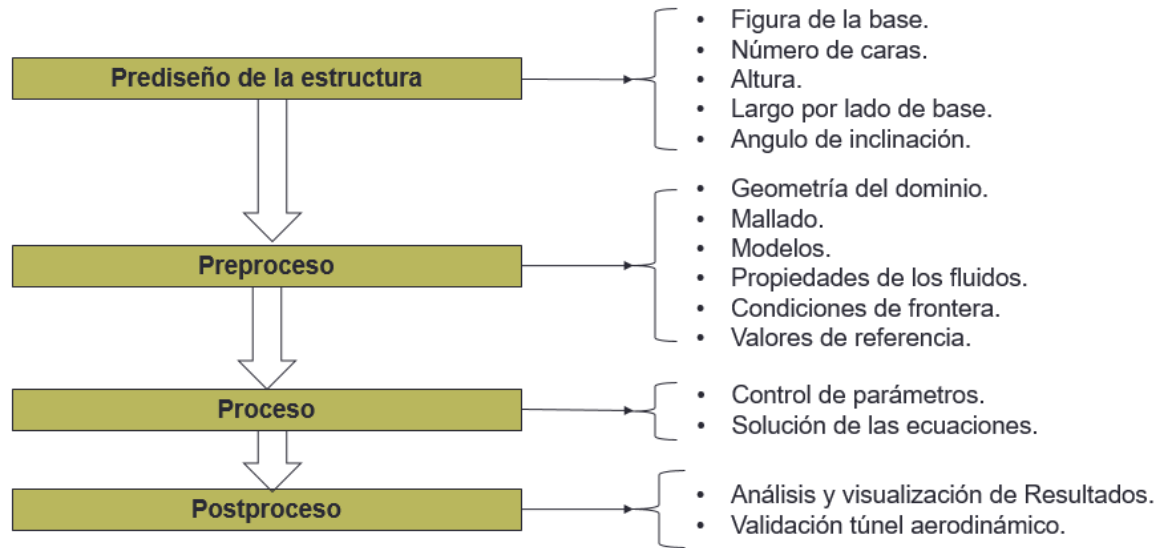


Figura 2.9 Pasos para la solución de un problema utilizando CFD.

2.8 Estudios previos de cubiertas piramidales.

- M. Ikhwan (2006) realizó una investigación sobre las características de flujo y presión que se presentan alrededor de estructuras piramidales. Los experimentos se realizaron en un túnel de viento de capa límite atmosférica. Se ensayaron ocho pirámides diferentes con ángulos variables respecto a la base. En la investigación se describen las características del flujo y los campos de presión alrededor de las superficies de las pirámides. De igual manera también son discutidas las características que distinguen las pirámides de los edificios rectangulares. Se encontró que, para estructuras piramidales, la variación de su ángulo y la dirección del viento altera significativamente la velocidad y presiones presentes, por lo que estas características se deben considerar al momento de ser diseñadas. Además, los datos revelaron que las presiones máximas o mínimas sobre la superficie pueden ser modificadas cambiando uno de los dos parámetros antes mencionados.

- A. K. Roy (2012) presentó los resultados de la simulación en CFD de una estructura de sección cuadrada con una cubierta tipo piramidal. Esta simulación fue llevada a cabo con el software comercial ANSYS utilizando el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ realizable y calibrada con los datos obtenidos durante la medición de los coeficientes de presión de una cubierta piramidal en un túnel aerodinámico. Para la

modelación se consideraron como parámetros de investigación cuatro incidencias del viento contra la estructura (0° , 15° , 30° y 45°) y siete pendientes para la cubierta (0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° y 30°). Los resultados muestran que el valor del coeficiente de presión varía significativamente debido al cambio en las pendientes de la cubierta y el ángulo de incidencia del viento. La conclusión a la que llegaron sobre la distribución de presiones sobre la superficie de la estructura fue que, para pendientes menores de 30° , el efecto de succión domina, y para una pendiente igual a 30° , la estructura es sujeta a empujes en la cara de barlovento y succión en el resto de las caras.

2.9 Normas de diseño de estructuras piramidales.

En las normas mexicanas no existen requerimientos específicos para este tipo de estructuras. Sin embargo, en el Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento de la Comisión Federal de Electricidad (2008); en el apartado 4.1.4 “Clasificación de las estructuras según su respuesta ante la acción del viento” hace referencia a la geometría de la estructura, donde su forma y dimensiones, además de sus características dinámicas, determinan la naturaleza de las solicitaciones debidas al viento. Estas últimas pueden dividirse en dos componentes, una que representa su valor medio (estático) y otra que representa sus variaciones en función del tiempo (dinámico). Ante viento sostenido con velocidad constante, las presiones medias (estáticas) constituyen la parte más importante de los efectos en construcciones poco flexibles y con periodos naturales de vibración cortos (no mayores que un segundo aproximadamente). La distribución de dichas presiones sobre las superficies expuestas al viento depende de la geometría, y puede calcularse experimentalmente a partir de pruebas sobre modelos rígidos en túnel de viento. Para fines prácticos y estructuras comunes, dichas presiones se determinan en función de coeficientes de presión calibrados con las pruebas experimentales.

2.10 Conclusiones de la revisión de la literatura.

Debido a los avances constructivos de la actualidad, el uso de vidrio y geometrías peculiares como cubiertas de estructuras ha ido en aumento, incrementando así la

demanda de su implementación. Esto ha vuelto indispensable el conocer la distribución de presiones sobre las mismas, para diseñar correctamente los sistemas de soporte.

Gracias a la creciente aceptación del uso y desarrollo de las técnicas de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), es posible utilizarla como herramienta en la obtención de distribuciones de presiones medias sobre cuerpos romos. Sin embargo, según normatividad y debido a la variación que existe en la elaboración de modelos computacionales que impactan directamente en los resultados, continúa siendo de gran importancia la comparación con datos experimentales.

CAPÍTULO III

3 METODOLOGÍA

En el presente capítulo, se describe el procedimiento de modelación en CFD para determinar los parámetros de diseño de una estructura de vidrio tipo piramidal. Dicho procedimiento, se dividió de la siguiente manera:

- Prediseño de la estructura.
- Preproceso.
- Proceso.
- Postproceso.
- Diseño de la estructura.

El software ANSYS se utilizó para el desarrollo de esta investigación, para predecir cómo se comporta una estructura tipo piramidal ante acciones de viento; como se observa en la Figura 3.1, se optó por el sistema de análisis "FLUENT". La elección de este programa se debió a la gran cantidad de simulaciones realizadas con éste en la actualidad, las cuales han obtenido resultados cercanos a la realidad y que la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY), en la que se ha llevado a cabo este proyecto, cuenta con la licencia correspondiente para su uso.

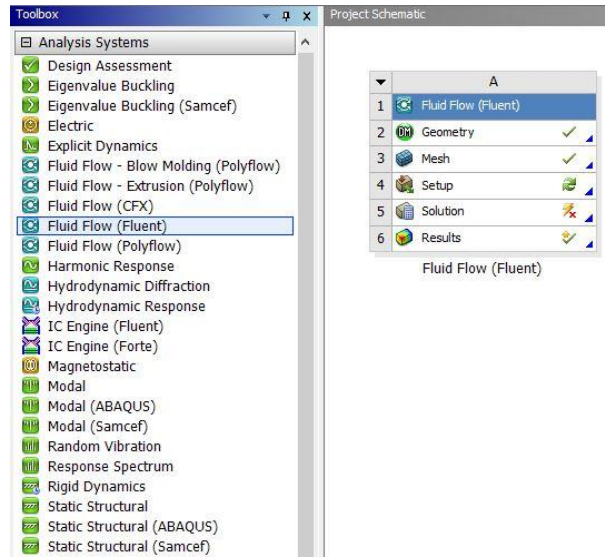


Figura 3.1 Sistema de análisis “FLUENT”.

3.1 Prediseño de la estructura.

El primer paso consiste en definir las peculiaridades físicas de la estructura que se simula dentro del dominio del fluido. A partir de la revisión de la literatura, se eligió un prototipo que considerara una geometría cercana a las estructuras construidas en la actualidad, por lo que se seleccionó una pirámide con las características proporcionadas en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1 Características del prototipo en estudio.

Figura de la base	Cuadrangular	
Número de caras	5	
Número de vértices	5	
Numero de lados de la base	4	
Altura	20 m	
Largo por lado de base	40 m	
Angulo de inclinación	45 °	

Para la generación del modelo geométrico, se utilizó el programa auxiliar llamado Design Modeller, el cual es recomendado directamente por ANSYS.

El proceso realizado fue muy sencillo, ya que el programa tiene figuras predeterminadas llamadas “Primitives” que generan un sólido al cual se le pueden

modificar los parámetros de medidas. Se utilizó la opción “Pyramid” entre las “Primitives” proporcionadas por el programa. En las Figura 3.2 y Figura 3.3 se puede observar la selección del tipo de sólido e introducción de sus características, para la obtención del modelo presentado en la Figura 3.4.

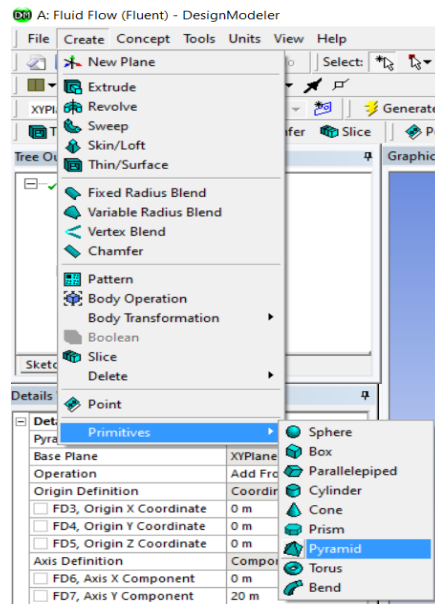


Figura 3.2 Generación del modelo del prototipo. Selección del tipo de sólido.

Details View	
Details of Pyramid1	
Pyramid	Pyramid1
Base Plane	XYPlane
Operation	Add Frozen
Origin Definition	Coordinates
<input type="checkbox"/> FD3, Origin X Coordinate	0 m
<input type="checkbox"/> FD4, Origin Y Coordinate	0 m
<input type="checkbox"/> FD5, Origin Z Coordinate	0 m
Axis Definition	Components
<input type="checkbox"/> FD6, Axis X Component	0 m
<input type="checkbox"/> FD7, Axis Y Component	0 m
<input type="checkbox"/> FD8, Axis Z Component	20 m
Base Definition	Components
<input type="checkbox"/> FD9, Base X Component	0
<input type="checkbox"/> FD10, Base Y Component	1
<input type="checkbox"/> FD11, Base Z Component	0
<input type="checkbox"/> FD13, Base Length (>0)	40 m
<input type="checkbox"/> FD14, Base Width (>0)	40 m
<input type="checkbox"/> FD15, Pyramid Height (>=0)	Full Height
As Thin/Surface?	No

Figura 3.3 Sólido tipo “Pyramid”. Parámetros de medida.

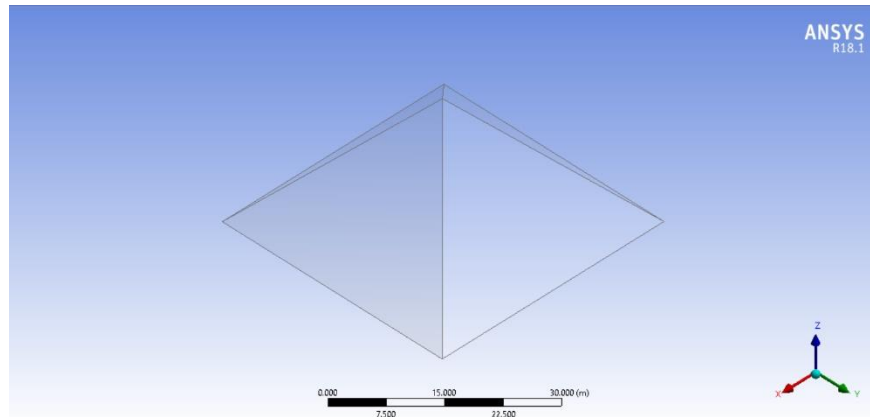


Figura 3.4 Modelo final del prototipo.

3.2 Preproceso.

En esta etapa se definió la geometría y se establecieron los parámetros que definieron la forma en que se resolvieron las ecuaciones del fluido, en el cual la estructura piramidal se encuentra inmersa durante la simulación. Para esta tesis se consideraron dos casos particulares para la dirección del viento; primero se estudió el fluido incidiendo sobre una de las caras de la estructura (incidencia frontal) y segundo, cuando el viento incide sobre un vértice o arista (incidencia diagonal).

3.2.1 Geometría del dominio.

Se definió el dominio, como un modelo tridimensional rectangular con las dimensiones mínimas propuestas en los manuales, para que la simulación se comporte lo más cercano a la realidad (Casey y Wintergerste, 2000).

El tamaño del dominio en sentido vertical, lateral y direcciones del fluido dependerá de las medidas de la estructura, las cuales se consideran a través de la altura de la estructura (H), como se describe a continuación (Franke, et al., 2005):

- Extensión vertical: Cinco veces la altura ($5H$).
- Extensión lateral: Cinco veces la altura ($5H$).
- Extensión frente a la estructura: Cinco veces la altura ($5H$).
- Extensión posterior a la estructura: Quince veces la altura ($15H$).

Para la generación del dominio, de igual manera que para la estructura piramidal, se utilizaron las “Primitives”, en específico, la opción “Box”. Considerando una altura de la estructura $H = 20$ m, el dominio se generó con una sección transversal de 100 m de altura por 100 m de ancho (Figura 3.5), con una extensión a barlovento de 100 m (Figura 3.6) y a sotavento de 300 m (Figura 3.7).

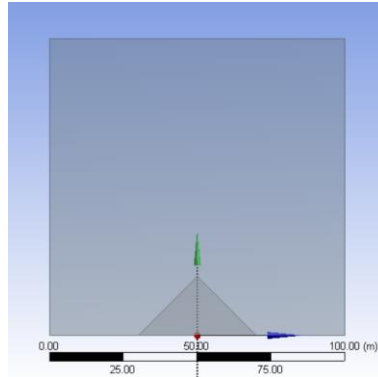


Figura 3.5 Sección transversal de la geometría del dominio.

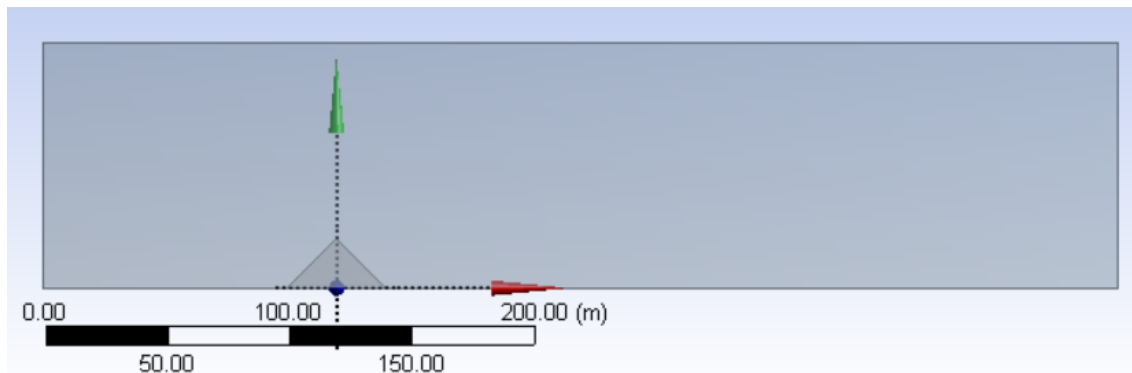


Figura 3.6 Extensión longitudinal a barlovento de la geometría del dominio.

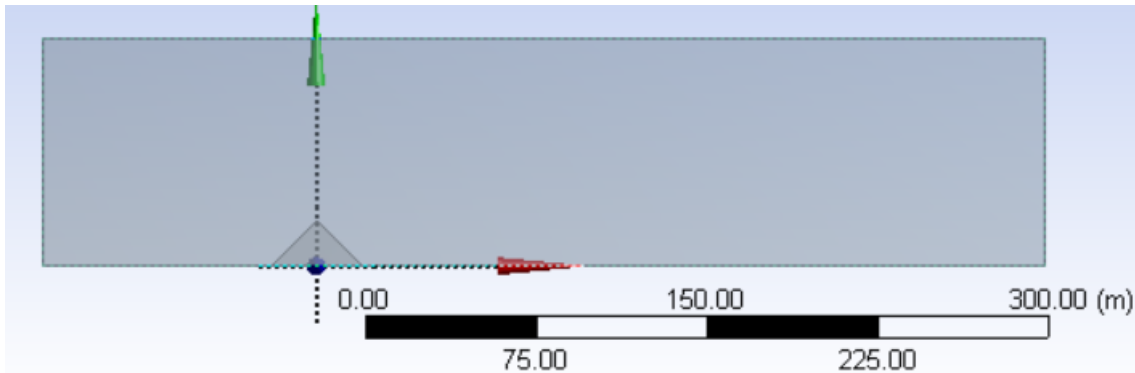


Figura 3.7 Extensión longitudinal a sotavento de la geometría del dominio.

3.2.2 Mallado del dominio.

Puesto que el mallado requiere considerar la topología de la estructura, se consideró un mallado por multibloques, el cual consiste en la división del dominio por medio de técnicas de mallado en cada bloque individualmente, para posteriormente unirlos y obtener el mallado de todo el dominio. Para este paso fue necesario considerar los dos casos de incidencia del viento en la estructura, ya que, dependiendo de su posición, cambia el desarrollo del mallado en el dominio.

3.2.2.1 Caso con incidencia frontal.

Para el primer caso (incidencia frontal del fluido), se dividió el dominio en sólidos hexaédricos tomando como referencia la estructura. (Figuras 3.8 y 3.9).



Figura 3.8 Dominio por multibloques para incidencia frontal del fluido. Vista aérea.

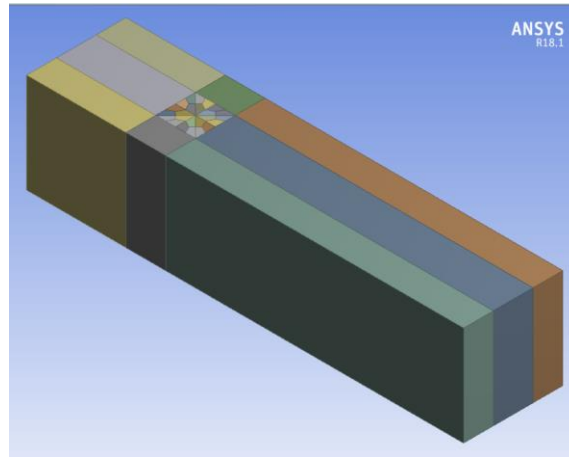


Figura 3.9 Dominio por multibloques para incidencia frontal del fluido. Vista isométrica.

En las Figura 3.10 a 3.12 se puede observar el dominio dividido por la mitad, división que se realizó debido a que tanto el fluido como la estructura son simétricos por el centro. La finalidad de utilizar la disminución del dominio por simetría en el modelo utilizado es reducir el tiempo y memoria necesarias para llevar a cabo la simulación.

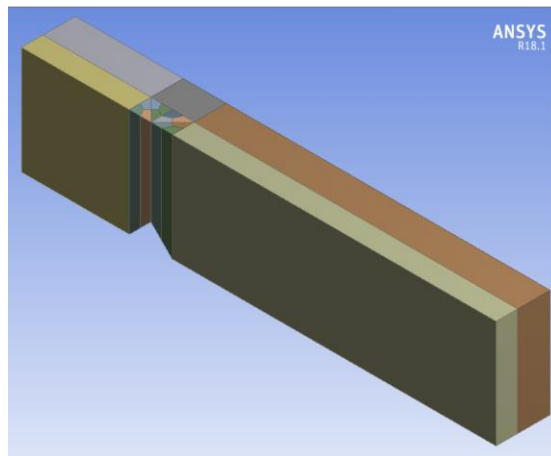


Figura 3.10 Dominio para incidencia frontal del fluido. Porción considerando la simetría.

Ya que el mallado depende de la forma de los volúmenes, se les aplicaron a los bloques: un algoritmo de mallado tipo “Map”, para generar un mallado estructurado; y el tipo de elementos “Hex”, para crear elementos hexaédricos. Ambos factores, específicos para el mallado de modelos en 3D.

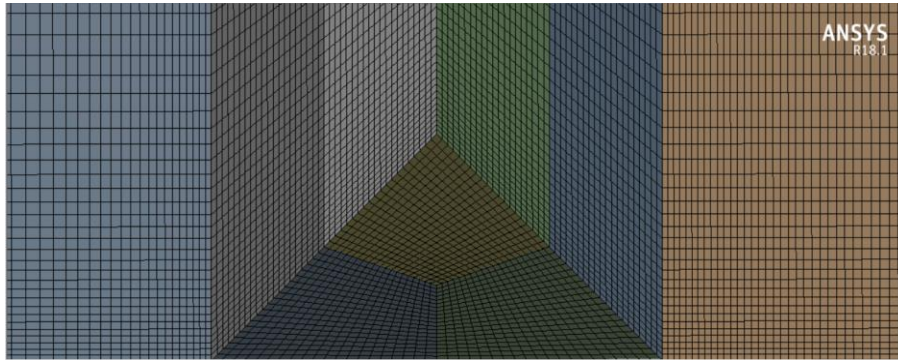


Figura 3.11 Mallado del modelo para incidencia frontal del fluido. Vista lateral considerando la simetría.

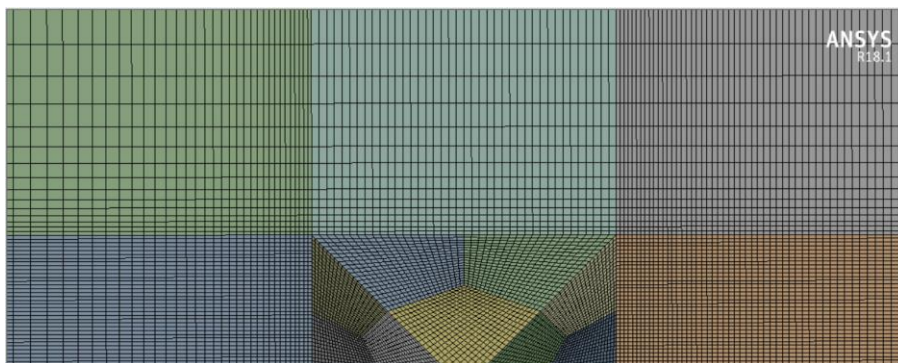


Figura 3.12 Mallado del modelo para incidencia frontal del fluido. Vista en planta considerando la simetría.

En la Figura 3.11 y Figura 3.12 se muestra el mallado del modelo para el primer caso (incidencia frontal del fluido), el cual considera una tasa de crecimiento a partir de la estructura con el fin de tener un mallado más fino en la zona de interés sin incrementar en exceso el número de elementos en zonas que no lo requieren en la simulación. Se realizó una discretización controlada a la estructura, subdividiéndola en secciones hexaédricas para mantener una mejor calidad de elementos y no afectar la precisión de la simulación debido a la deformación de éstos.

Details of "Mesh"	
+	Display
-	Defaults
	Physics Preference: CFD
	Solver Preference: Fluent
	<input type="checkbox"/> Relevance: 0
	Export Format: Standard
	Element Order: Quadratic
+	Sizing
+	Quality
+	Inflation
+	Assembly Meshing
+	Advanced
-	Statistics
	<input type="checkbox"/> Nodes: 15738876
	<input type="checkbox"/> Elements: 3760000

Figura 3.13 Detalles del mallado.

Con el tipo de mallado antes mencionado se generaron 3,738,000 elementos hexaédricos, se optó considerarlos de orden cuadrático ya que los nodos no coincidían, esto debido a una tasa de crecimiento irregular cercana a la estructura, por lo que se obtuvieron 15,738,876 nodos (Figura 3.13). Estos parámetros fueron determinados como aceptables, debido a que la solución ya no varió al aumentar el número de elementos o nodos.

3.2.2.2 Caso con incidencia diagonal.

Para el segundo caso (incidencia diagonal del fluido), debido a que la estructura se encuentra en diagonal, se decidió utilizar un modelo en "V" (límites extremos en forma de cuchilla) tanto al inicio como al final del dominio (Figura 3.14 y Figura 3.15), este diseño se utilizó para mantener al mínimo las transiciones entre los elementos, así como evitar la deformación de los mismos para poder tener un mallado estructurado, factores que permiten, en la simulación, la convergencia a la solución.

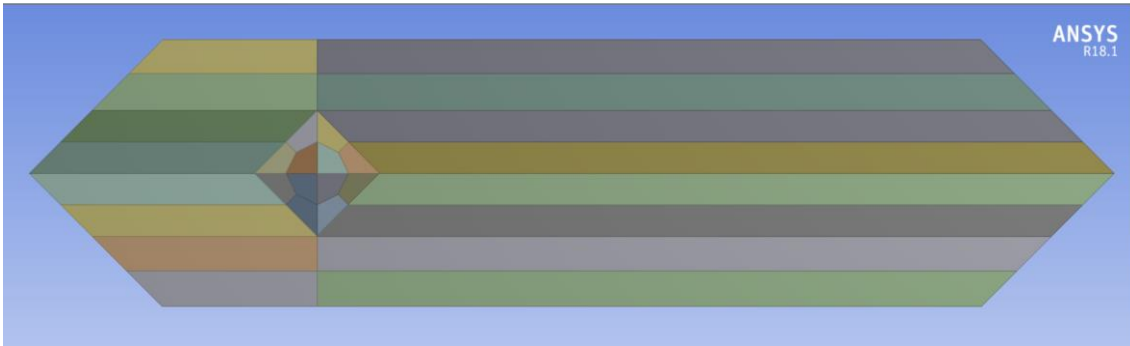


Figura 3.14 Dominio por multibloques para incidencia diagonal del fluido. Vista aérea.

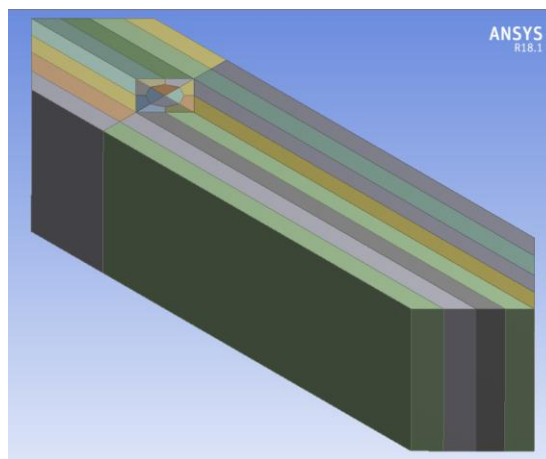


Figura 3.15 Dominio por multibloques para incidencia diagonal del fluido. Vista isométrica.

En la Figura 3.16 a 3.18 se puede observar el dominio dividido por la mitad, división que se realizó debido a que tanto el fluido como la estructura son simétricos por el centro. La finalidad de utilizar la disminución del dominio por simetría en el modelo utilizado es reducir el tiempo y memoria necesarias para llevar a cabo la simulación.

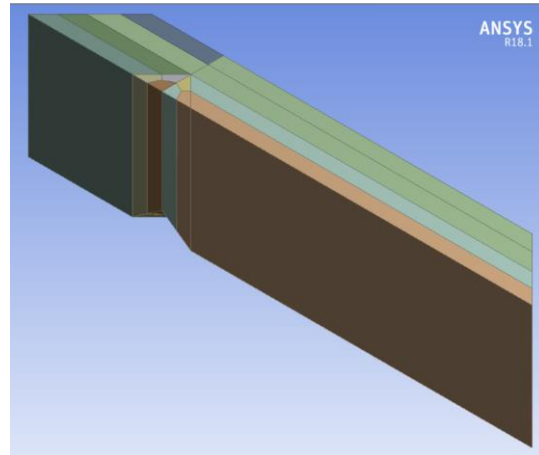


Figura 3.16 Dominio para incidencia diagonal del fluido. Porción considerando la simetría.

Se aplicó un mallado tipo “Map” y elementos “Hex” al igual que el caso de incidencia frontal. En las Figura 3.17 y Figura 3.18 se muestra el mallado del modelo, donde se utilizó una tasa de crecimiento a partir de la estructura, en donde el mallado requiere ser más fino, esto se realizó con el fin de ahorrar tiempo computacional al resolver las ecuaciones ya que de esta manera se cuenta con una menor cantidad de elementos y nodos.

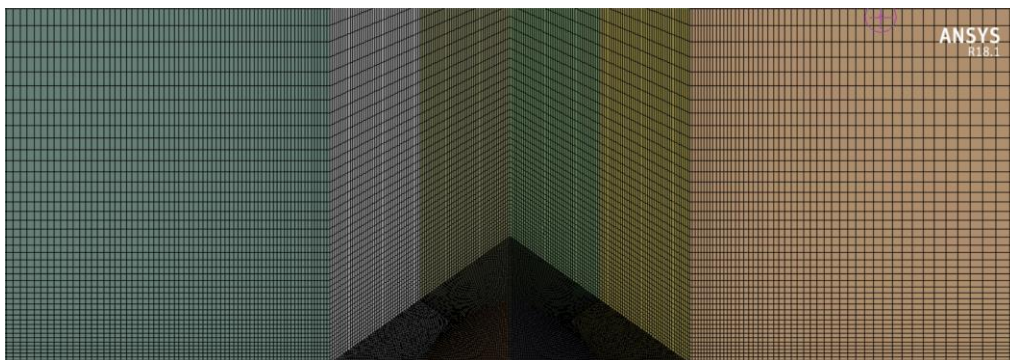


Figura 3.17 Mallado del modelo para incidencia diagonal del fluido. Vista lateral.

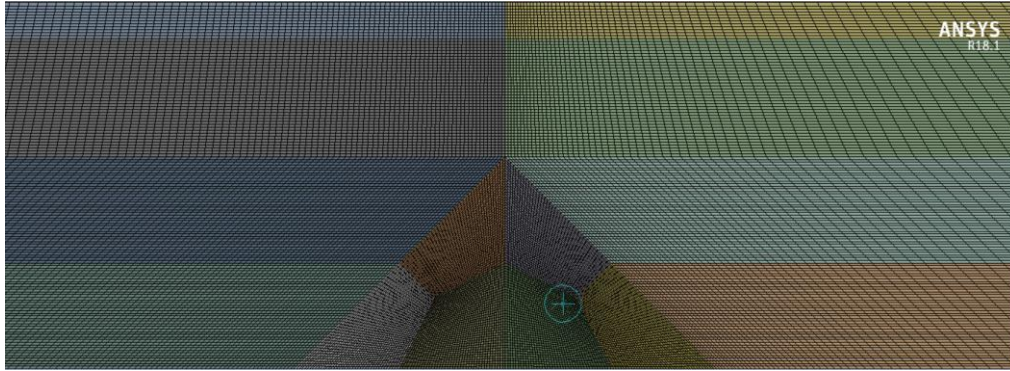


Figura 3.18 Mallado del modelo para incidencia diagonal del fluido. Vista en planta. Con el tipo de mallado antes mencionado se generaron 2,928,000 elementos. Ya que se utilizó una tasa de crecimiento igual en cada dirección, todos los nodos coincidieron, por lo que se utilizaron elementos de orden lineal, obteniendo 3,086,234 de nodos (Figura 3.19). Estos parámetros fueron determinados como aceptables, debido a que se realizó un análisis de sensibilidad y se obtuvo que a partir de este número de elementos y nodos la solución ya no variaba.

Details of "Mesh"	
+	Display
-	Defaults
	Physics Preference CFD
	Solver Preference Fluent
	<input type="checkbox"/> Relevance 0
	Export Format Standard
	Element Order Linear
+	Sizing
+	Quality
+	Inflation
+	Assembly Meshing
+	Advanced
-	Statistics
	<input type="checkbox"/> Nodes 3086234
	<input type="checkbox"/> Elements 2928000

Figura 3.19 Detalles del mallado.

3.2.3 Configuración del solucionador (FLUENT).

En esta etapa se realizó la configuración de los parámetros y ecuaciones que permiten determinar el comportamiento del fluido en la simulación (Figura 3.20). Se utilizó la misma configuración para los dos casos estudiados.

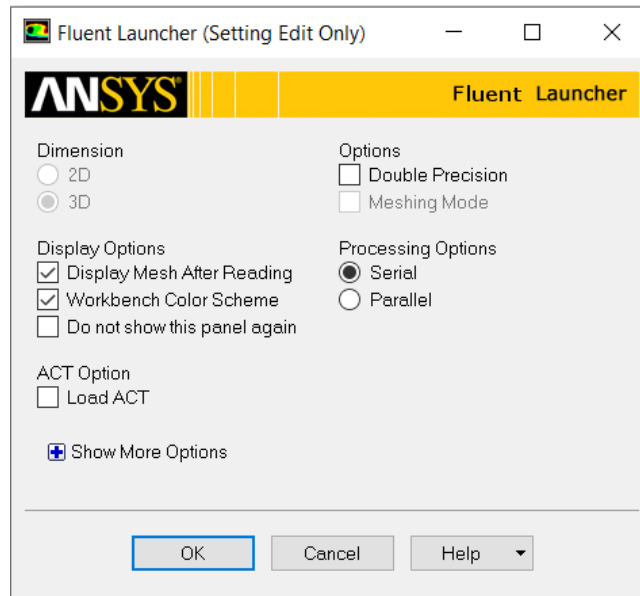


Figura 3.20 Ajustes iniciales del solucionador (FLUENT).

3.2.3.1 General.

La Figura 3.21 muestra la configuración que se utilizó para el tipo de solucionador, la formulación de la velocidad, el estado en el que el flujo se consideró y la revisión de la calidad del mallado que se utilizó para la simulación (ANSYS INC., 2009).

- Se utilizó el solucionador “Pressure-based” ya que desde su creación fue destinado para flujos de baja velocidad en fluidos incompresibles.
- Se consideró velocidad absoluta, puesto que el fluido en el dominio no se encuentra rotando debido a una fuerza externa y para obtener una solución con una mejor aproximación debido a la reducción de la difusión numérica.
- Se optó por seleccionar un flujo estacionario ya que las ecuaciones de gobierno suponen un caso estable donde el tiempo pasa hasta que una solución estacionaria es alcanzada.

- Por último, se realizó una comprobación del mallado, para verificar que no existiera una deformidad significativa en los elementos que causara algún tipo de error en la simulación.

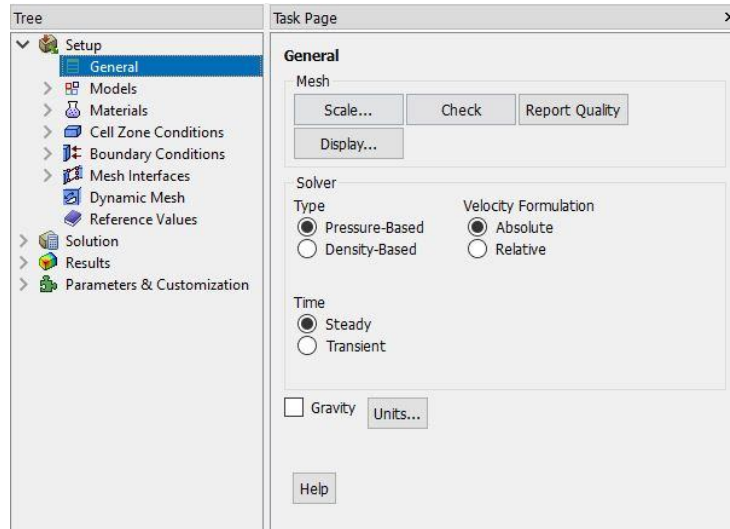


Figura 3.21 Configuración general del solucionador (ANSYS).

3.2.3.2 Modelos.

En la Figura 3.22 se muestra la configuración del modelo viscoso “ $\kappa - \epsilon$ Realizable” con “Non-Equilibrium Wall Functions”, la cual se seleccionó ya que sólo es necesario fijar las condiciones iniciales y de contorno para obtener resultados satisfactorios. Lo anterior se debe a la simpleza de esta estrategia al manejar sólo dos ecuaciones que relacionan la viscosidad de remolinos con dos valores escalares que son representativos de la turbulencia en el flujo.

El modelo utiliza una ecuación para obtener la energía cinética de turbulencia designada con la variable “ κ ” y otra para obtener la disipación de la turbulencia, designada con la variable “ ϵ ”. Ambas ecuaciones son utilizadas para determinar la viscosidad de vórtices asociados a los esfuerzos de Reynolds (Pérez, 2017).

Dentro de los tipos de modelo, fue utilizado “Realizable” debido a que es un fluido incompresible externo en el que se espera un desprendimiento en la cúspide de la pirámide y vórtices a lo largo de las aristas con un buen grado de convergencia y

bajos requerimientos computacionales, lo que lo hace más preciso que los otros modelos.

Ya que los modelo requieren determinar el comportamiento del fluido cercano a los sólidos, se optó por manejar “Non-Equilibrium Wall Functions”, que determina el comportamiento de las ecuaciones de energía cinética de turbulencia a través de la capacidad de las ecuaciones de considerar la separación, reconexión e impacto donde el flujo medio y la turbulencia están sujetos a gradientes de presión y cambios rápidos (ANSYS INC., 2009).

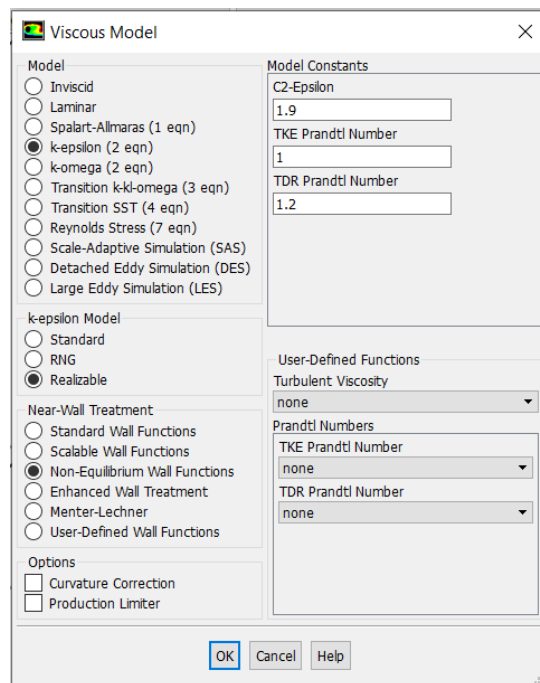


Figura 3.22 Configuración del modelo viscoso (Fluent).

3.2.3.3 Material del fluido.

Un paso importante en la configuración de los modelos es la definición física del material para el fluido que se emplea en la simulación, en esta investigación se utilizaron las propiedades estándar del aire (Figura 3.23), ya que la simulación contempla la localización del estudio en una situación sin variaciones importantes en la composición del aire.

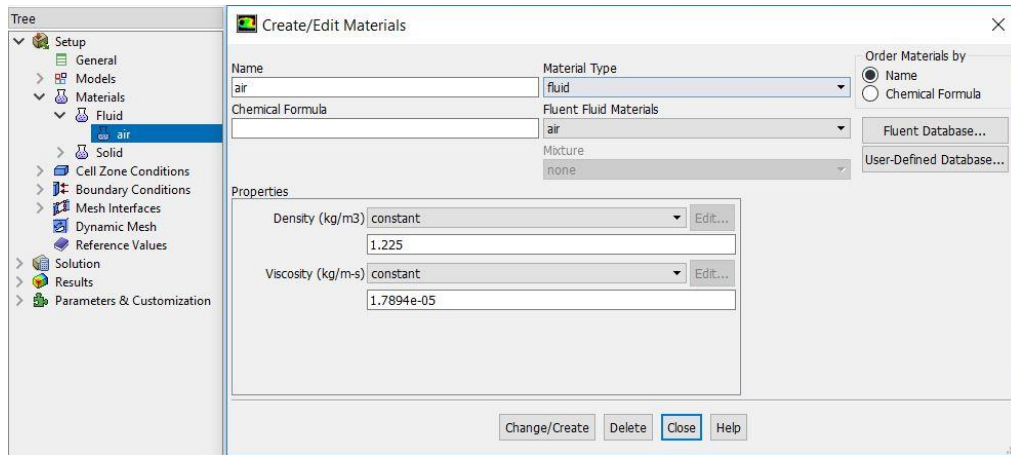


Figura 3.23 Propiedades estándar del fluido, aire (Fluent).

3.2.3.4 Condiciones de celdas.

Para que las ecuaciones se puedan resolver en el volumen que se generó, es necesario asignarles a las celdas que conforman el dominio, las propiedades del fluido a utilizar, el cual, para esta investigación, es aire (Figura 3.24). Debido a que en la simulación no existen objetos en movimiento, los cuales requieran un eje rotacional no es necesario definirlo (ANSYS INC., 2009).

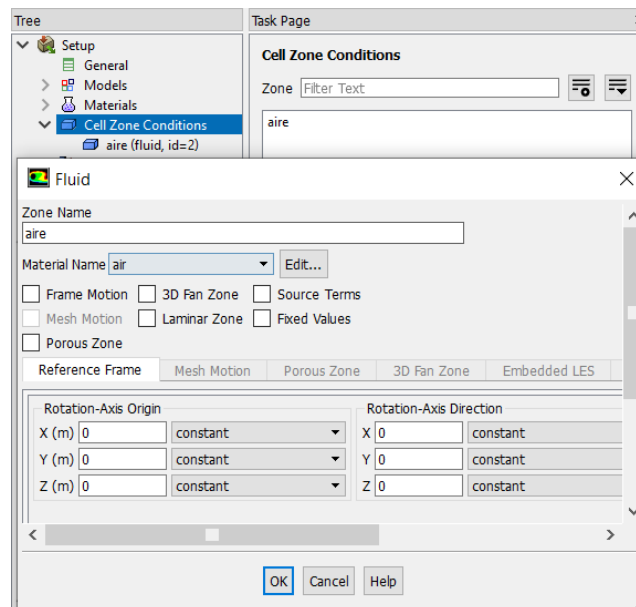


Figura 3.24 Condiciones de celdas que conforma el dominio (Fluent).

3.2.3.5 Condiciones de frontera.

Para la realización de la simulación se requiere introducir valores conocidos en las fronteras, que actúan como condiciones de inicio para la solución de las ecuaciones que gobiernan el fluido. Las condiciones que se asignaron fueron las que se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Condiciones de frontera usados en el modelo.

Nombre	Contorno	Propiedad
Entrada	Velocity inlet	Contorno de entrada de flujo a una velocidad definida.
Salida	Outflow	Salida de flujo. Se aplica cuando se desconocen propiedades a la salida.
Techo	Wall	Velocidad cero en su superficie, de modo que el flujo no lo atraviese.
Piso	Wall	
Pared	Wall	
Pirámide	Wall	
Simetría	Symmetry	Plano de simetría.

3.2.3.6 Valores de referencia.

Como se puede observar en la Figura 3.25, es necesario definir el punto de partida para el cálculo, ingresar valores de referencia y tipo de zona de referencia. Para esta investigación se consideró un fluido con densidad y temperatura constante (flujo incompresible sin gradientes por temperatura) por lo que fueron utilizadas las propiedades estándar del aire (ya que no influyen en gran magnitud en el resultado), de igual manera no es necesario una presión de operación por lo que se dejó en cero y una velocidad de inicio de 18 m/s que es considerada una velocidad de prueba baja, en cuanto a compresibilidad del aire, de acuerdo con su número de Mach, pero lo suficientemente alta para obtener estabilidad en la turbulencia generada.

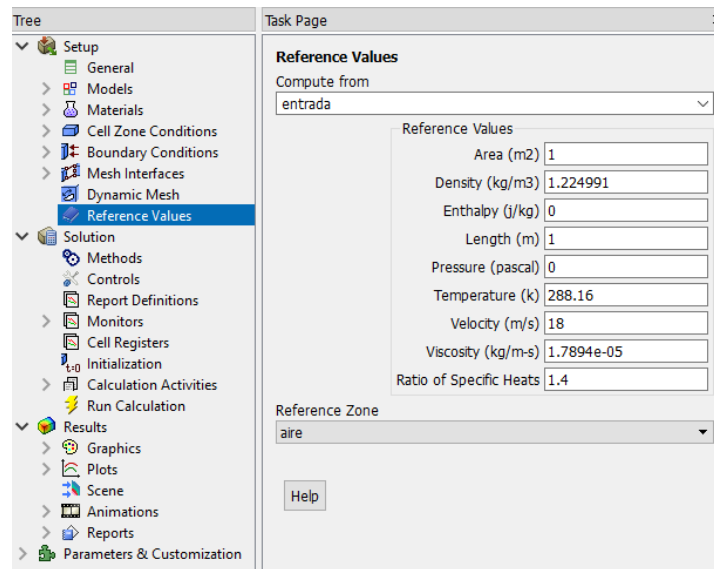


Figura 3.25 Definición de valores iniciales de referencia (Fluent).

3.3 Proceso.

En esta etapa se eligieron los parámetros utilizados para resolver las ecuaciones que rigen el fluido en el que se encuentra la estructura, en la Figura 3.26 se observan estos parámetros.

3.3.1 Métodos para la solución.

Se seleccionó el método con el cual se resolvieron las ecuaciones del fluido. Para esta investigación, se eligió el método de solución “Pressure-based”, con el esquema “Coupled” que emplea un proceso de discretización de volúmenes finitos “Green-Gauss Node based”.

3.3.1.1 Esquema.

El esquema “Coupled” es utilizado para flujos incompresibles a baja velocidad, el cual emplea un algoritmo, donde la restricción del campo de velocidades se logra resolviendo la ecuación de presión que se deriva de la continuidad (Conservación de la masa) y las ecuaciones de impulso en una distancia tal que, el campo de velocidad corregido por la presión satisface la continuidad. Dado que las ecuaciones de gobierno no son lineales y están acopladas, el proceso de solución implica

iteraciones en las que todo el conjunto de ecuaciones de gobierno se resuelve repetidamente hasta que la solución llegue a la convergencia (ANSYS INC., 2009).

3.3.1.2 Discretización espacial.

Se utilizó un cálculo basado en los nodos de los volúmenes, que construye los valores de cada uno a partir de los valores promedio de las celdas que los rodean, esto conlleva a una mejor aproximación por la cantidad de puntos en los que se resuelven las ecuaciones, el esquema utilizado fue “Green-Gauss Node based” (Figura 3.26).

Al resolver las ecuaciones, el software por defecto almacena los resultados en el centro de las celdas de cada volumen, los cuales se interpolan para obtener los valores en las caras de cada celda, esto se logra mediante un esquema de alta resolución.

El esquema “Upwind” consiste en la discretización de los términos diferenciales de dichas ecuaciones, de forma que el valor de la variable en un nodo determinado es función únicamente de los valores de dicha variable en el nodo situado justo arriba (corriente arriba).

Si bien la discretización de “First order” (primer orden) generalmente produce una convergencia más rápida que el esquema de “Second order” (segundo orden), generalmente producirá resultados menos precisos. Debido a que el flujo deja de estar alineado con el mallado, al tener una estructura dentro del fluido; se decidió utilizar un esquema “Second order” para evitar una difusión numérica en dichas secciones y evitar pérdidas significativas de precisión (ANSYS INC., 2009).

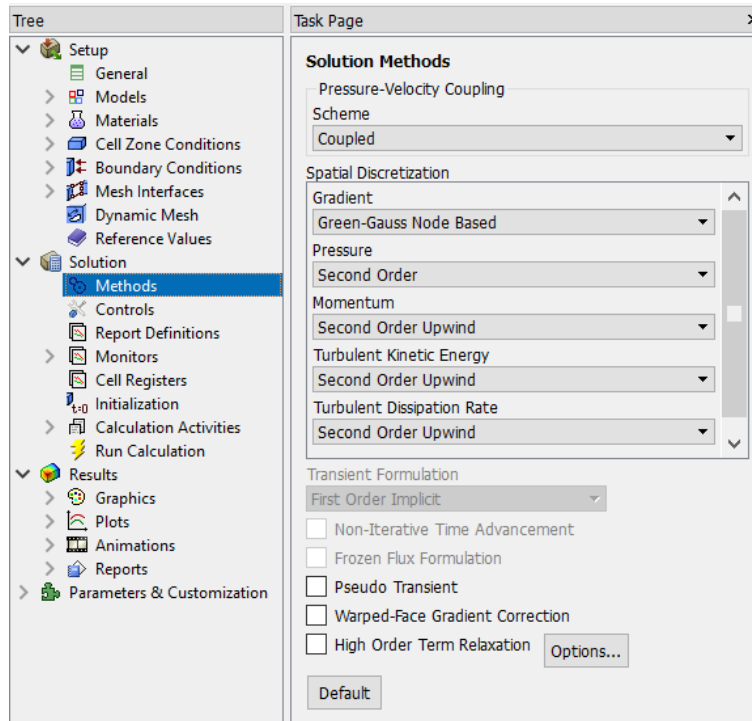


Figura 3.26 Configuración del método para la solución (Fluent).

3.3.2 Control de parámetros.

Para poder monitorear que la simulación se encuentre acercándose a la solución, es importante tomar en consideración los parámetros que pueden modificar la convergencia.

El número de Courant-Friedrich-Lewy (CFL), o número de Courant, define el tamaño de un intervalo de tiempo (Time step) para problemas de flujo estacionario. Expresa la relación entre la distancia recorrida por una turbulencia y la longitud de un intervalo de distancia (Distance step) computacional. Se calcula por medio de la ecuación 3.1.

$$CFL = \Delta t \cdot \sum_{i=1}^n \frac{U_{xi}}{\Delta_{xi}} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde:

CFL = Número de Courant

Δt = Intervalo de tiempo

Δ_{xi} = Intervalo de distancia

U_{xi} = Velocidad del flujo

Debido a que se desconocía como iba a ir variando la solución durante las iteraciones, se decidió utilizar CFL = 5, valor aceptable para el nivel de complejidad del problema y, debido a que el comportamiento de los resultados llevo a la convergencia, se consideró una buena aproximación, de haberse dado el caso en el que la solución no convergiera, la solución consiste en incrementar el valor de CFL.

Los factores “Under-relaxation” (sub-relajación) nos ayudan a corregir la tendencia de que los resultados hallados por cada iteración se alejen de la solución, esto se logra haciendo una media de las soluciones anteriores y dándoles mayor peso, lo que genera un proceso más estable, pero en el que se requieren más iteraciones para llegar a la solución. Se utilizaron los valores por defecto del software (Figura 3.27), ya que se consideran adecuados para la mayoría de los casos de flujos, y, al obtenerse la convergencia, no fue necesario disminuir los valores para aumentar la estabilidad del resultado.

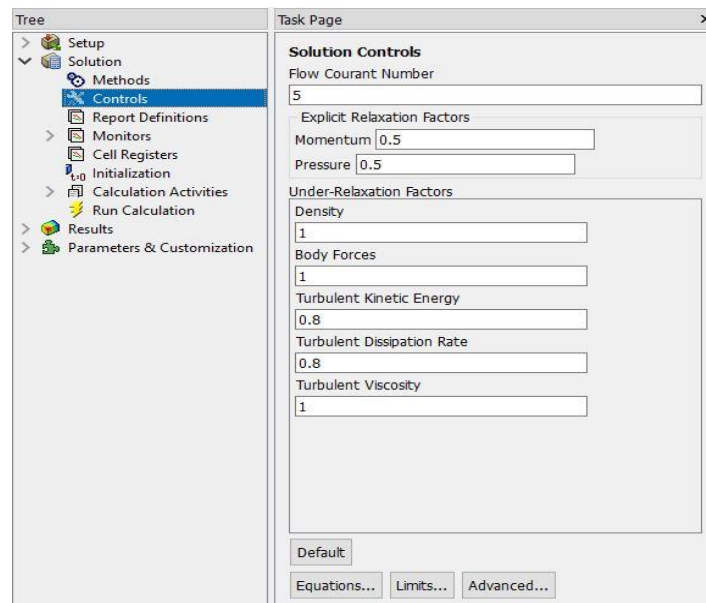


Figura 3.27 Configuración del control de parámetros (Fluent).

3.3.3 Monitoreo de residuos.

Otro parámetro importante para revisar si el resultado de la simulación se encuentra aproximándose correctamente, es delimitar la precisión del resultado por medio de los residuos. Los residuos son las magnitudes de error para las soluciones de las ecuaciones que gobiernan el fluido, a medida que avanzan las iteraciones de la simulación, la diferencia entre el resultado anterior y el actual va cambiando, dependiendo si disminuyen o aumentan en magnitud, se dice que el resultado se encuentra convergiendo o divergiendo, respectivamente.

En un caso ideal, estos errores deberían hacerse cero, pero debido a que las computadoras tienen precisión finita es necesario fijar el criterio de convergencia para la simulación. Esto dependerá de la precisión y complejidad del modelo.

La Figura 3.28 muestra los valores de residuos utilizados para las ecuaciones de continuidad y componentes de velocidad en las tres direcciones principales (10^{-4}), así como para las ecuaciones del modelo de turbulencia κ - ϵ (10^{-3}). La selección de estos valores se basó en que, al alcanzar los residuos entre iteraciones estos valores, los resultados se mantenían constantes, por lo que se consideraron en un rango aceptable.

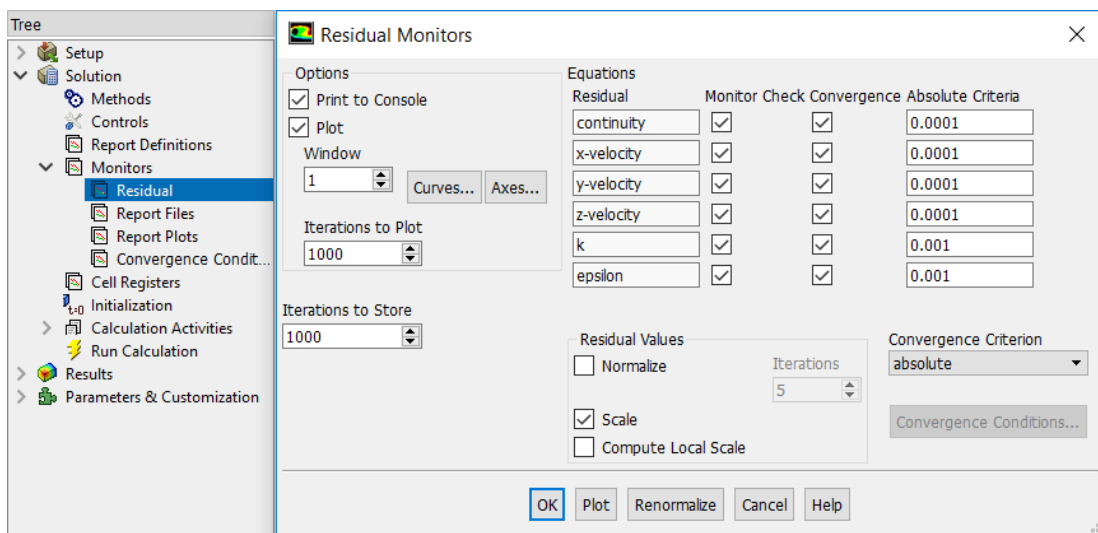


Figura 3.28 Configuración del monitoreo de residuos (Fluent).

3.3.4 Inicialización.

Para comenzar la simulación, se proporcionó al programa un valor supuesto lo más próximo posible a la solución para empezar a iterar (Figura 3.29). Esto es de suma importancia en la mayoría de los casos, ya que, al ingresar valores cercanos a la solución, disminuye el tiempo y capacidad computacional requerida para resolverlo.

En esta investigación se consideró para inicializar la simulación lo siguiente:

- Como “Solution Initialization” (método de inicialización), se utilizó el método “Standard”, el cual define las condiciones de inicio de la simulación.
- En la sección de “Compute from” (Calcular a partir de), se seleccionó la condición de entrada que automáticamente nos despliega los valores antes ingresados.
- Se optó como “Reference frame” (marco de referencia), la opción de “Relative to Cell Zone” (relativo a todo el dominio) para considerar las velocidades del fluido en cada celda del dominio.

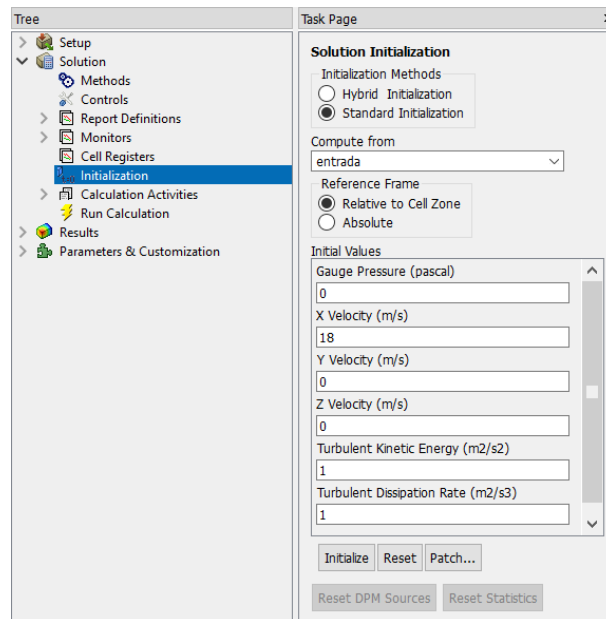


Figura 3.29 Configuración para la inicialización de la solución (Fluent).

Una vez inicializado, el programa crea el espacio de memoria necesario para guardar los valores de las variables en todas las celdas y pone en ellas los valores de inicialización. Cuando se itera, en este espacio se van guardando las sucesivas soluciones hasta que se alcanza la solución definitiva (Pacheco, 2012).

3.3.5 Inicio del cálculo.

Antes de iniciar la simulación, es necesario dar un “Check Case” (Comprobar caso) el cual enlista posibles errores o problemas que pudieran dificultar el cálculo de las ecuaciones.

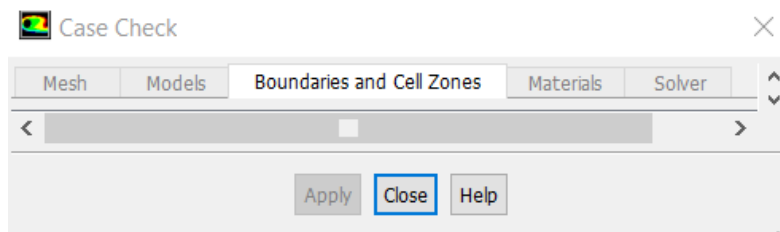


Figura 3.30 Panel de posibles errores (Fluent).

Después de realizar el “Check Case” y obtener un resultado positivo (Figura 3.30), es decir, sin ninguna situación a resolver, se procede a fijar el número de iteraciones que el software realizará para encontrar la solución (Figura 3.31). Este proceso se puede repetir varias veces hasta que la solución tenga convergencia. Para los dos casos de incidencia del viento se llegó a una respuesta estable a partir de las 2000 iteraciones.

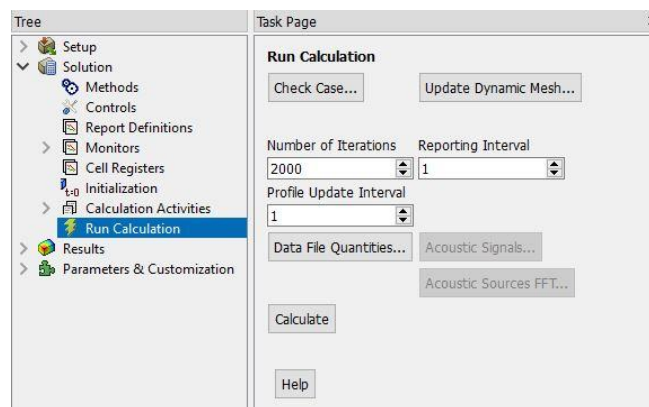


Figura 3.31 Configuración de inicio de cálculo (Fluent).

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS

En el presente capítulo, se incluyen los resultados obtenidos en la simulación mediante CFD, los datos experimentales del túnel aerodinámico y una comparación entre ambos para validar un comportamiento cercano a la realidad.

La comparación antes mencionada corresponde a todos los puntos instrumentados (APÉNDICE A) en el modelo utilizado en el túnel de viento y los puntos correspondientes pertenecientes a la modelación en CFD. Todos los puntos se presentan en coordenadas cartesianas para su localización y comparación (APÉNDICE B).

Para representar los resultados obtenidos en las Figuras del presente capítulo, se utilizó una escala de color rojo que hace referencia a los coeficientes de mayor magnitud, mientras que una escala de azul representa los coeficientes de menor magnitud.

A continuación, se presentan los coeficientes de presión obtenidos utilizando la simulación con CFD. Mismos que posteriormente se compararon, como validación para determinar el grado de precisión de la simulación, con los coeficientes obtenidos en el túnel de viento.

4.1 Postproceso.

El postproceso es la última etapa en la simulación mediante CFD, la cual nos permite definir cómo se visualizarán los resultados. Para esta investigación se optó por utilizar contornos de distribución de coeficientes de presión obtenidos en la modelación. Los resultados se dividieron en dos casos particulares de acuerdo con la dirección del viento. Los resultados presentados corresponden a coeficientes de presión externa (C_{pe}).

4.1.1 Dirección 0° (Incidencia Frontal).

En las Figura 4.2, Figura 4.2 y Figura 4.3 se presentan las distribuciones de los C_{pe} sobre la superficie de la cara C1 (Barlovento), caras C2 y C3 (Laterales), y la cara de C4 (Sotavento) de la estructura piramidal, respectivamente. Los resultados presentados fueron obtenidos de la simulación con viento incidiendo a 0° (Incidencia Frontal). Debido a que la estructura es un cuerpo romo, se puede observar que la cara C1 primeramente bloqueó el transcurso del flujo produciendo un coeficiente de empuje máximo de 0.70, lo que conllevó al desprendimiento de la capa límite en las aristas formadas por la unión de ésta con las caras C2 y C3.

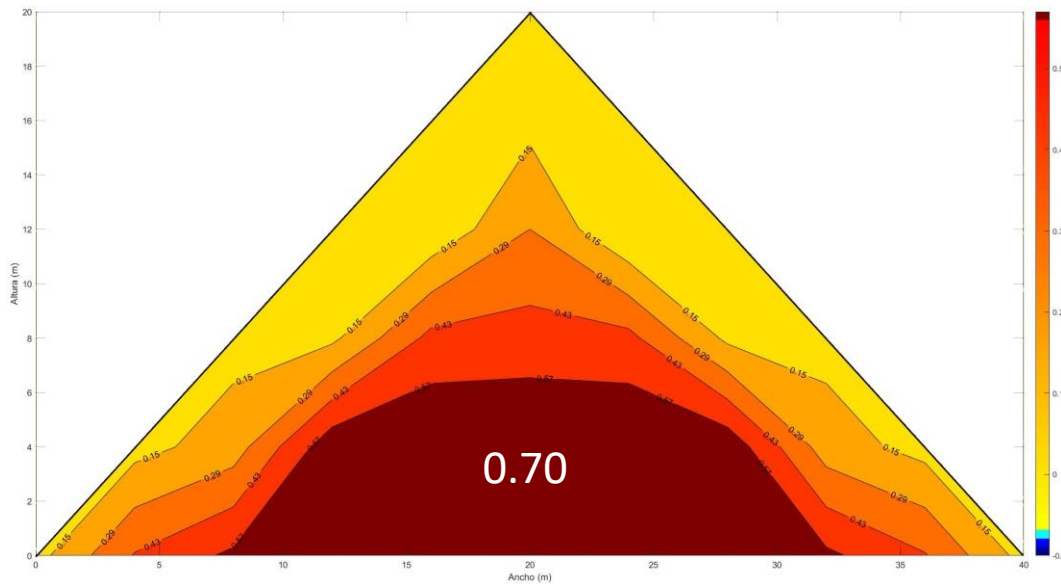


Figura 4.1 Contornos de C_{pe} en C1, mediante CFD con dirección 0° (Incidencia Frontal).

Esto causó que se desarrolle la turbulencia y se generen coeficientes de succión en las caras C2 y C3, donde se registró un coeficiente máximo de -0.70 cercano a la unión con C1 y disminuyendo en magnitud a lo largo de dichas caras.

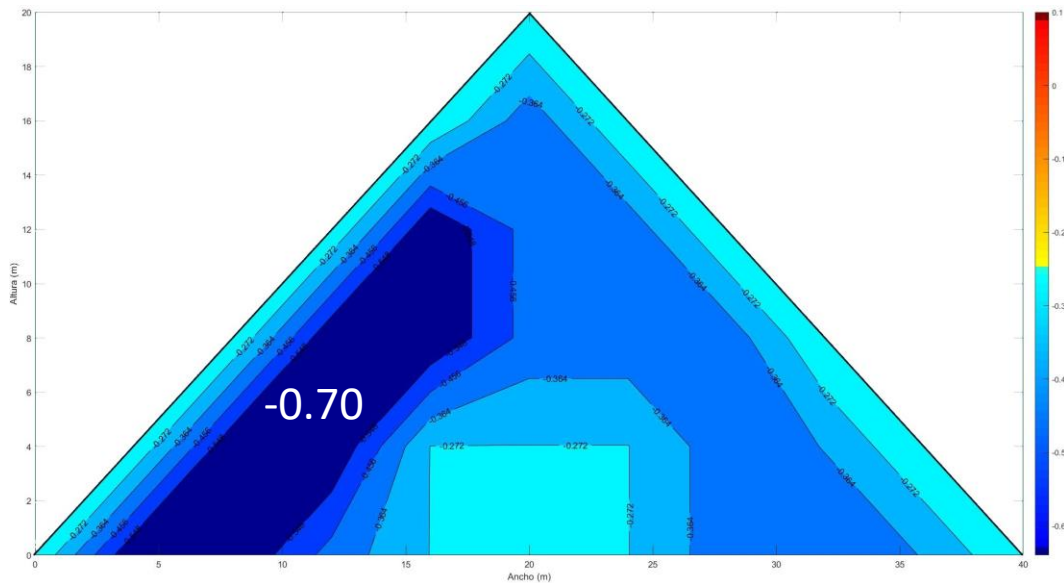


Figura 4.2 Contornos de C_{pe} en C2 y C3, mediante CFD con dirección 0° (Incidencia Frontal).

Posteriormente se generó recirculación del flujo en la parte posterior de la estructura, obteniéndose un coeficiente máximo de -0.40 al centro de la cara C4.

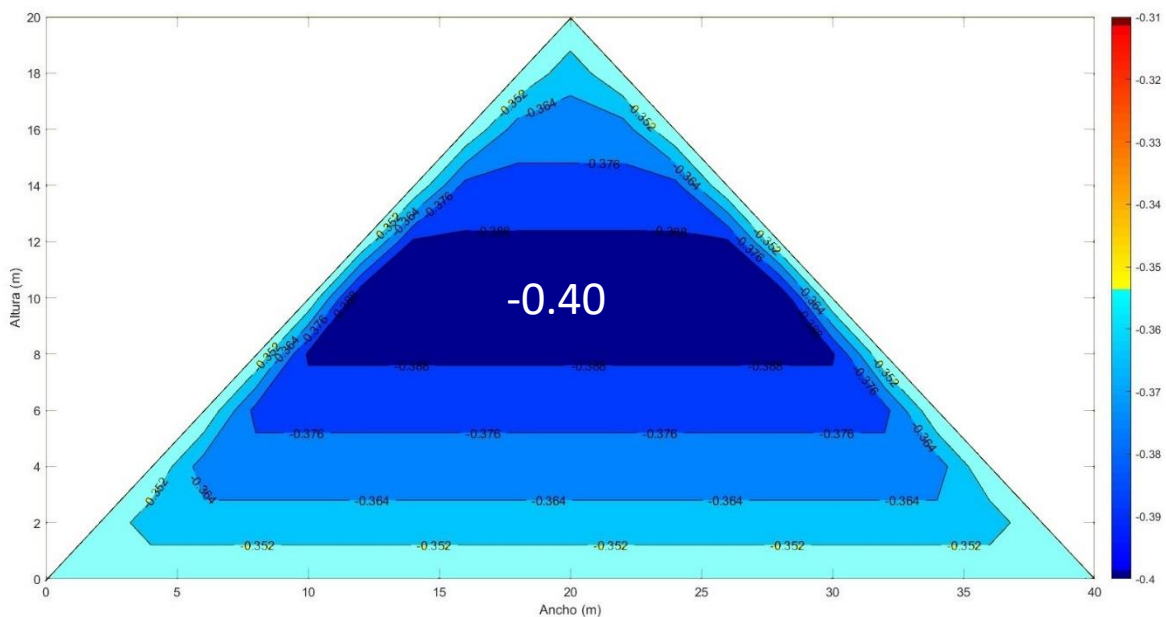


Figura 4.3 Contornos de C_{pe} en C4, mediante CFD con dirección 0° (Incidencia Frontal).

4.1.2 Dirección 45° (Incidencia Diagonal).

En las Figura 4.4 y Figura 4.5 se presentan las distribuciones de los C_{pe} sobre la superficie de la estructura piramidal, resultado de la simulación con viento incidiendo a 45° (Incidencia Diagonal). Debido a que la estructura es un cuerpo romo de base cuadrada, al incidir el viento a 45° (diagonalmente), se puede observar que las caras a Barlovento, son las caras C1 y C3 y las que se encuentran a Sotavento, C2 y C4; esto ocasionó que el viento que incide se haya dividido en la arista que se encuentra a barlovento entre las caras C1 y C3, de modo que en estas caras se produce un coeficiente de empuje máximo de 0.45, disminuyendo a lo largo de su recorrido hasta las aristas laterales (entre las caras C1 y C2 y las caras C3 y C4) donde ocurre el desprendimiento del viento.

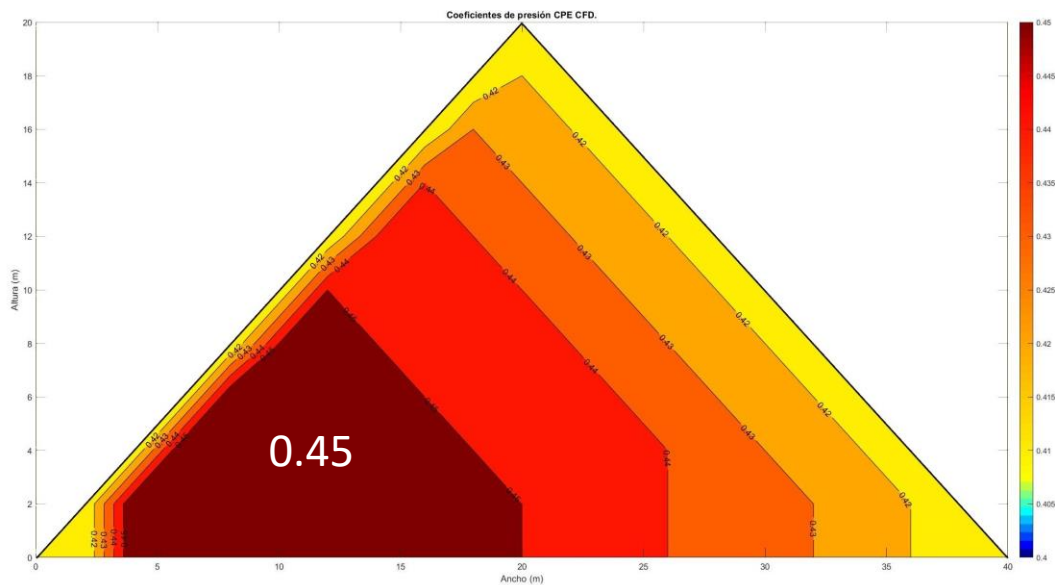


Figura 4.4 Contornos de C_{pe} en C1 y C3, mediante CFD con dirección 45° (Incidencia Diagonal).

Debido a la presencia de la arista en la que se produce el desprendimiento del viento, se produjo un coeficiente de succión máximo de -0.40 en la parte inferior de las caras a sotavento.

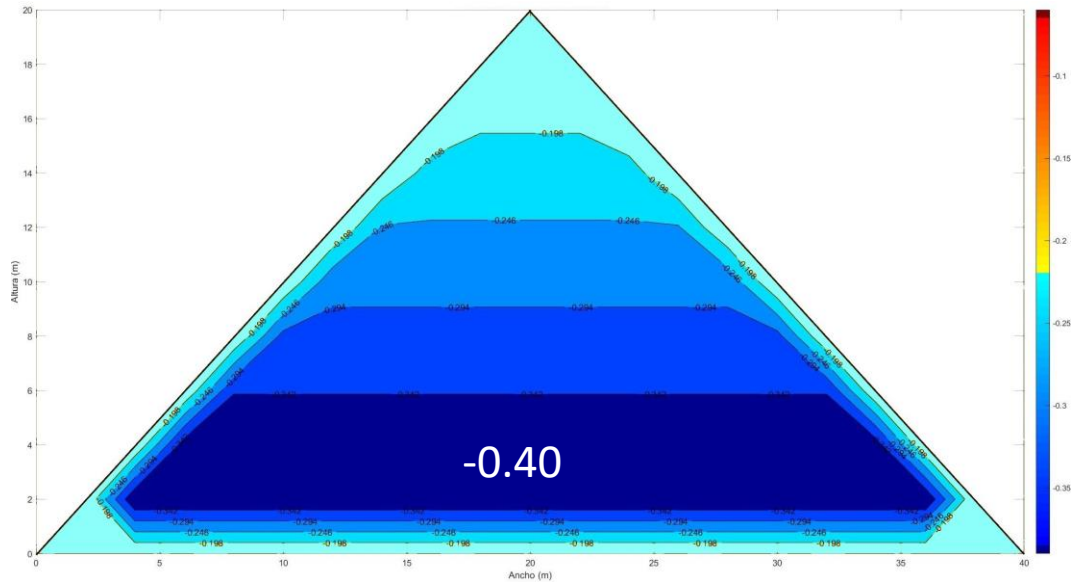


Figura 4.5 Contornos de C_{pe} en C2 y C4, mediante CFD con dirección 45° (Incidencia Diagonal).

4.2 Validación con el túnel de viento.

Para realizar una validación de los datos obtenidos en la simulación mediante CFD, se realizaron ensayos de un modelo a escala de la estructura prototipo. Estas pruebas se realizaron en el túnel de viento perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán. La metodología que se llevó a cabo se presenta en el APÉNDICE A.

En las siguientes secciones se presentan los contornos de la distribución de coeficientes de presión obtenidos en los ensayos realizados en el túnel de viento para cada incidencia del viento y gráficas de comparación entre dichos valores y los resultados obtenidos mediante CFD.

4.2.1 Resultado en el túnel de viento, dirección 0° (Incidencia Frontal).

Se puede observar que la distribución de presiones obtenida en el túnel de viento con incidencia frontal del viento se asemeja a los contornos obtenidos mediante CFD. En las Figuras 4.6, 4.7 y 4.8 se presentan las magnitudes de los C_{pe} en los que se obtuvieron como coeficientes de presión máximos: empuje de 0.45, en la

cara de barlovento y succiones de -1.1, en las caras laterales y de -0.5 en la cara de Sotavento.

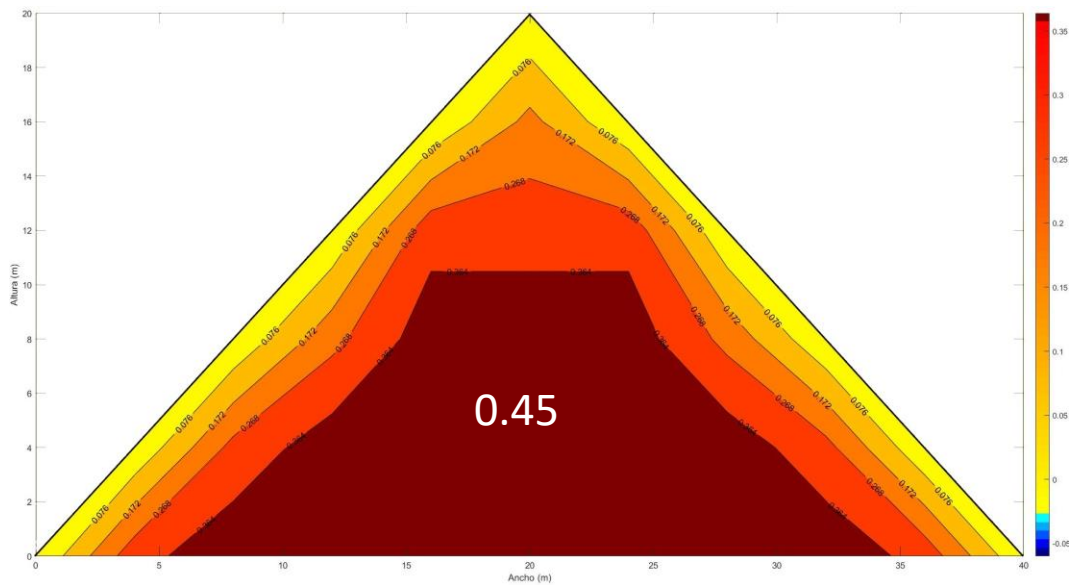


Figura 4.6 Contornos de C_{pe} en C1, en Túnel de viento con dirección 0° (Incidencia Frontal).

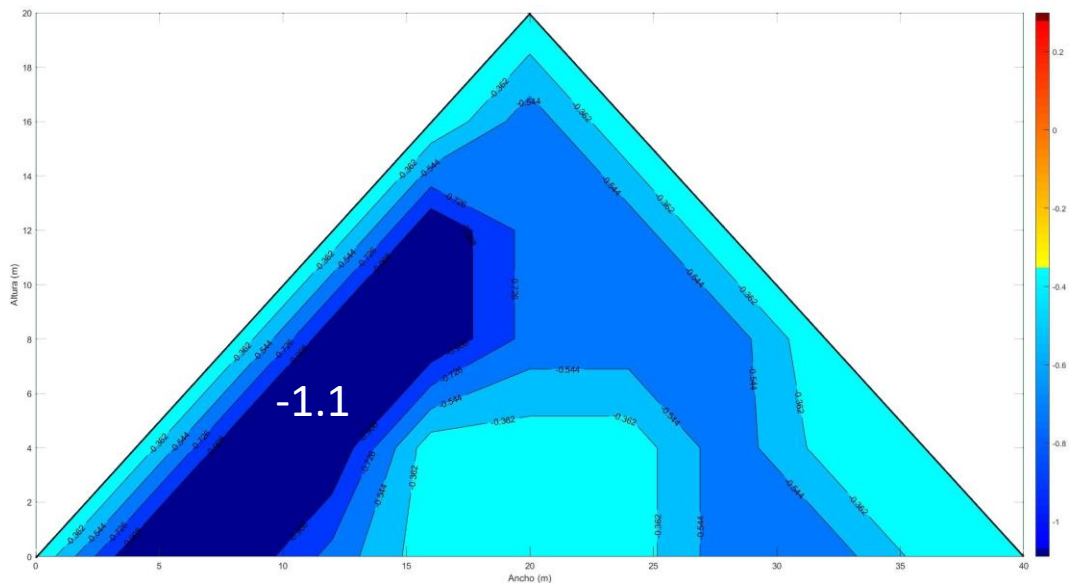


Figura 4.7 Contornos de C_{pe} en C2 y C3, en Túnel de viento con dirección 0° (Incidencia Frontal).

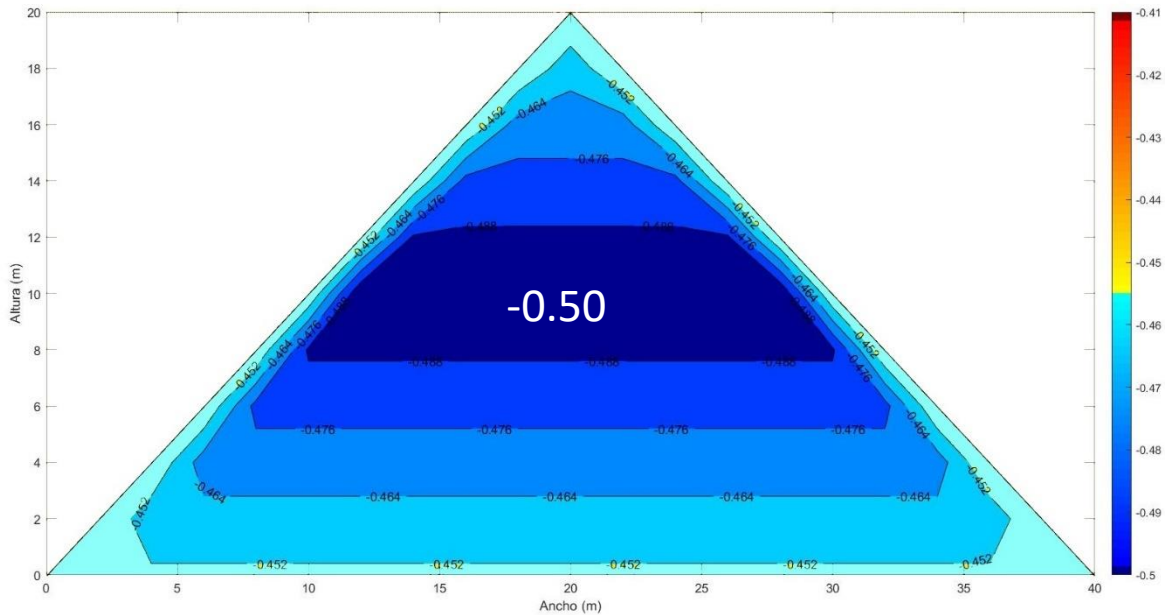


Figura 4.8 Contornos de C_{pe} en C4, en Túnel de viento con dirección 0° (Incidencia Frontal).

4.2.2 Resultados en el túnel de viento, dirección 45° (Incidencia Diagonal).

Se puede observar que la distribución de presiones obtenida en el túnel de viento con incidencia diagonal del viento se asemeja a los contornos obtenidos mediante CFD. En las Figura 4.9 y Figura 4.10 se presentan las magnitudes de los C_{pe} en los que se obtuvieron como presiones máximas: empuje de 0.27, en las caras a barlovento y una succión de -0.6 en las caras a Sotavento.

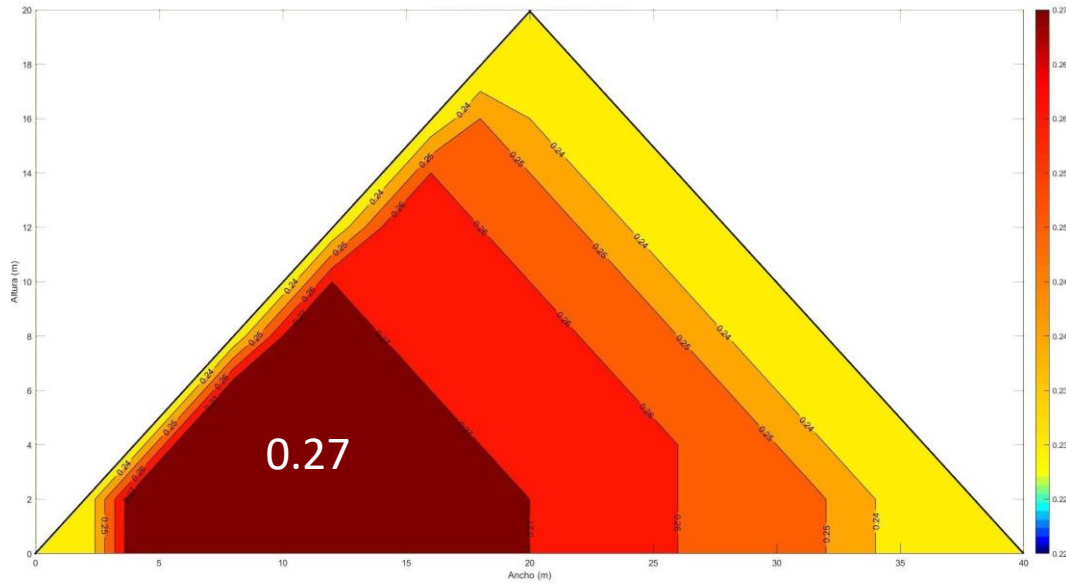


Figura 4.9 Contornos de C_{pe} en C1 y C3, en Túnel de viento con dirección 45° (Incidencia Diagonal).

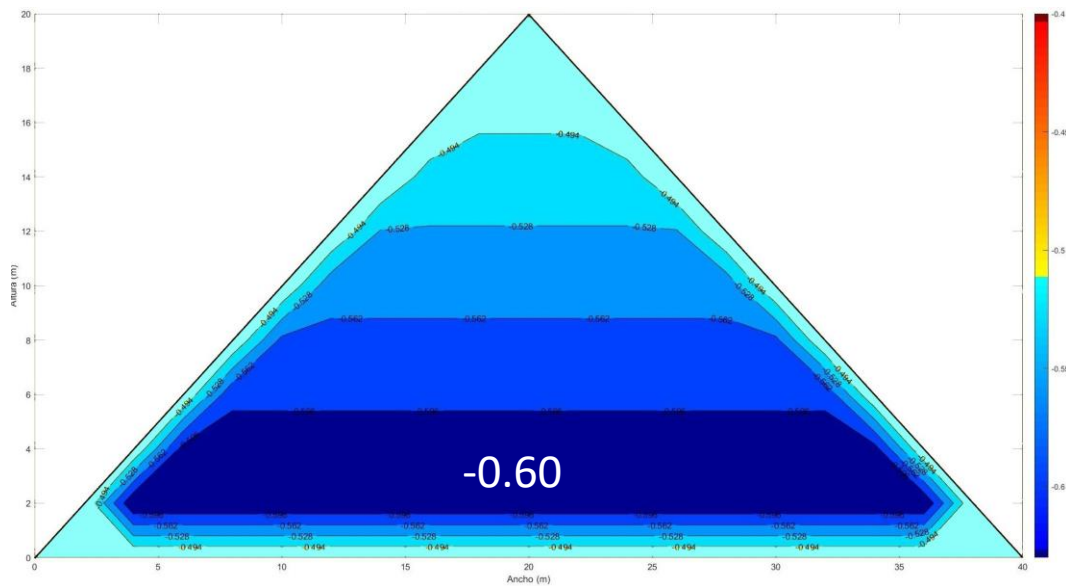


Figura 4.10 Contornos de C_{pe} en C2 y C4, en Túnel de viento con dirección 45° .

4.2.3 Comparación entre CFD y Túnel de viento.

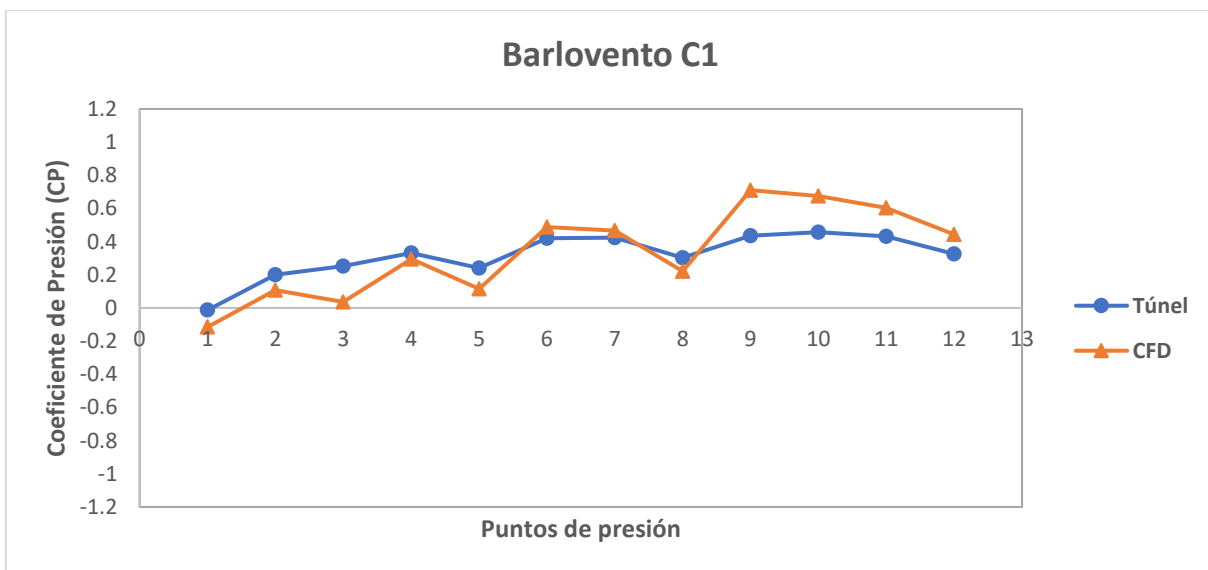
En este apartado, se incluye la comparación de los coeficientes de presión obtenidos experimentalmente y mediante un método numérico por CFD. Los valores mostrados son los puntos de las caras de Barlovento, Laterales y Sotavento para

los dos casos de incidencia del viento (Dirección 0° -Incidencia Frontal- y 45° -Incidencia Diagonal-).

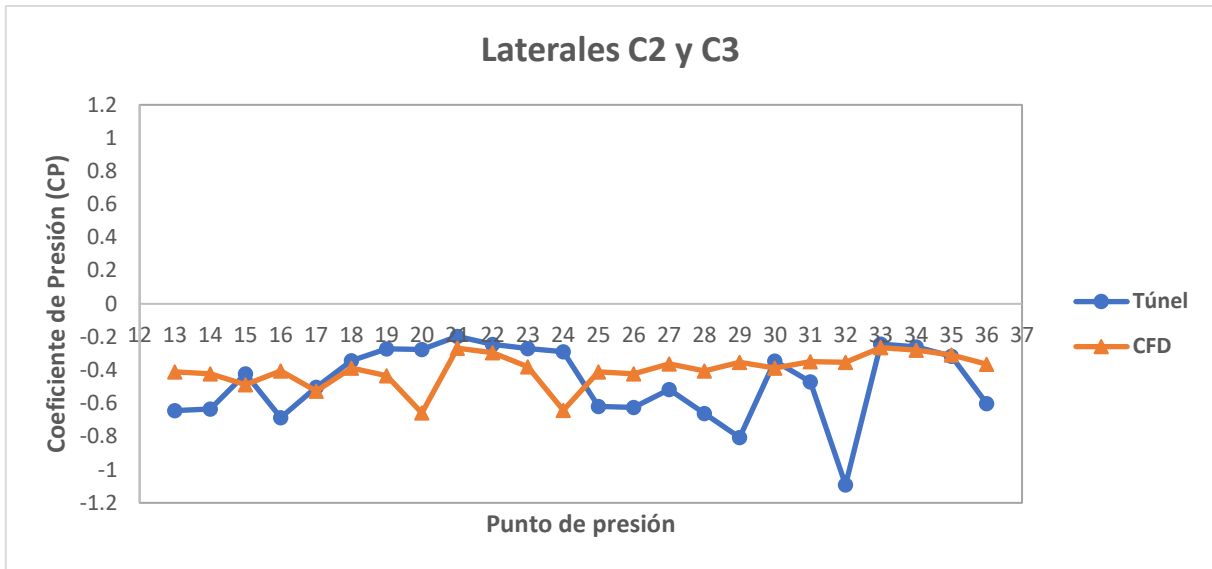
Para poder determinar la validez del método numérico se decidió utilizar la “Prueba Ji Cuadrada de bondad de ajuste”, la cual es utilizada para analizar si existe una diferencia significativa entre un número observado de respuestas y un número esperado basado en la hipótesis nula. Es decir, la Ji Cuadrada evalúa el grado de correspondencia entre los valores observados y esperados en cada categoría (Siegel, 2015).

4.2.3.1 Dirección 0° (Incidencia Frontal).

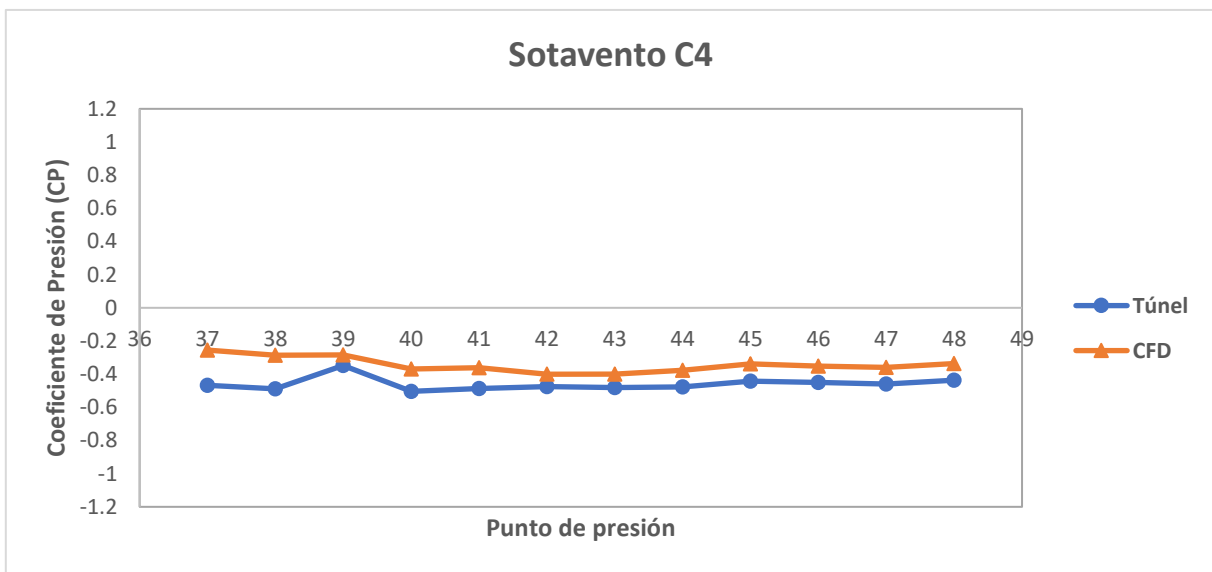
En la Gráfica 4.1, 4.2 y 4.3 se observa un comportamiento similar entre los resultados obtenidos con ambos métodos (CFD y experimental -Túnel de Viento-). Para la prueba de bondad de ajuste se analizaron 48 puntos en total de la estructura y se utilizó este número de tomas de medición como los grados de libertad para la prueba de Ji Cuadrada. De este modo, a partir de estos valores se calculó una $\chi^2 = 6.30$ y una $\chi^2_{Crítica} = 84.58$, lo que indica un 0.09% de probabilidad de discrepancia entre valores, por lo que no existe una diferencia significativa entre los valores experimentales y los calculados por CFD.



Gráfica 4.1 Coeficientes de presión externa experimentales y mediante CFD en la cara C1, dirección 0° (Incidencia Frontal).



Gráfica 4.2 Coeficientes de presión externa experimentales y mediante CFD en cara C2 y C3, dirección 0° (Incidencia Frontal).

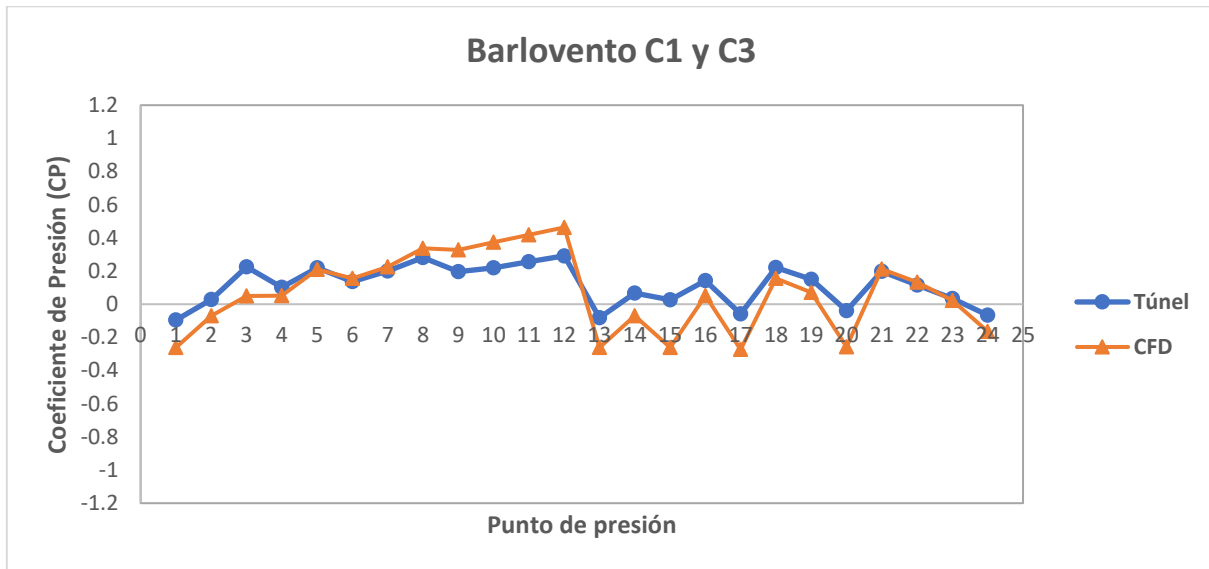


Gráfica 4.3 Coeficientes de presión externa experimentales y mediante CFD en cara C4, dirección 0° (Incidencia Frontal).

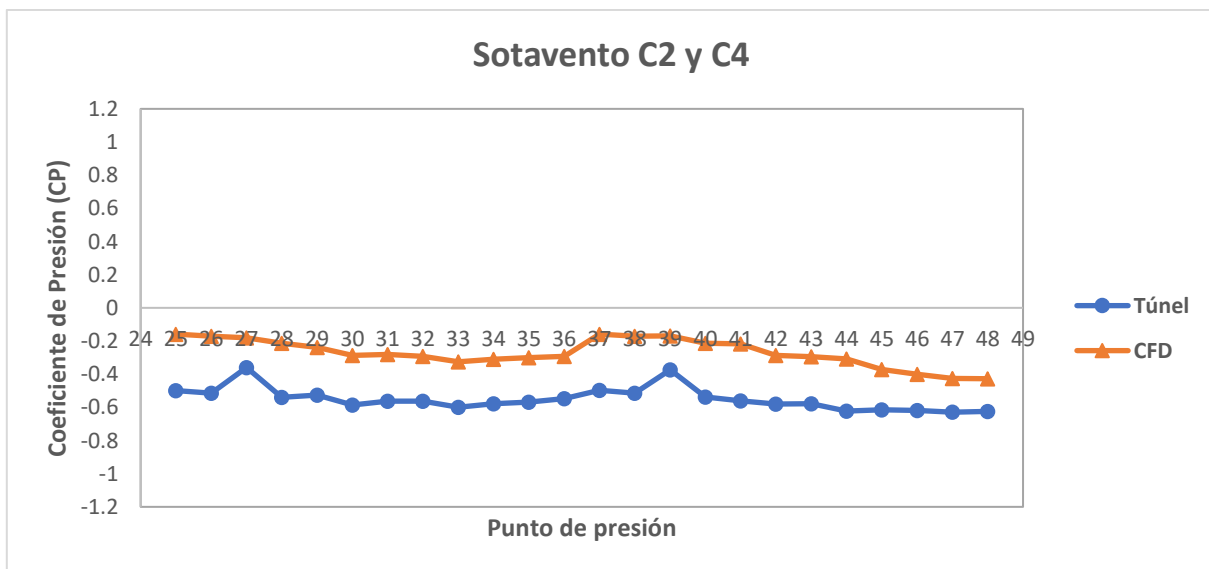
4.2.3.2 Dirección 45° (Incidencia Diagonal).

En la Gráfica 4.4 y 4.5 se observa un comportamiento similar entre los resultados obtenidos con ambos métodos (CFD y experimental -Túnel de Viento-). Para la prueba de bondad de ajuste se analizaron 48 puntos en total de la estructura y se utilizó este número de tomas de medición como los grados de libertad para la prueba

de Ji Cuadrada. De este modo, a partir de estos valores se calculó una $\chi^2 = 10.85$ y una $\chi^2_{Crítica} = 84.58$, lo que indica un 0.09% de probabilidad de discrepancia entre valores, por lo que no existe una diferencia significativa entre los valores experimentales y los calculados por CFD.



Gráfica 4.4 Coeficientes de presión externa experimentales y mediante CFD en cara C1 y C3, dirección 45° (Incidencia Diagonal).



Gráfica 4.5 Coeficientes de presión externos experimentales y mediante CFD en cara C2 y C4, dirección 45° (Incidencia Diagonal).

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo, se incluyen las conclusiones y recomendaciones de la investigación realizada sobre la obtención de los coeficientes de presión por acciones de viento, en una estructura tipo piramidal por medio de la simulación CFD y su validación por medio de ensayos realizados en el túnel de viento de la FIUADY.

5.1 Conclusiones.

Esta investigación presenta el impacto de la geometría de la estructura ante la acción del viento y la distribución de presiones que se generan en su superficie. Se utilizó el software ANSYS FLUENT para generar los resultados de la simulación en CFD que se presentaron mediante contornos de coeficientes de presión y gráficas. Las principales conclusiones derivadas de esta investigación se comentan a continuación:

- Se observó que las caras perpendiculares a la dirección del viento tendrán los coeficientes de presión más altos a comparación con los coeficientes de presión en las caras paralelas.
- El estudio demostró que cuando la unión de dos caras se encuentra perpendicular a la dirección del viento, las presiones sobre toda la superficie serán de menor magnitud.
- La dirección más desfavorable fue a 0° (incidencia frontal), en la cual se presentaron los coeficientes de presión externos de mayor magnitud tanto para succión como para empuje. Los valores fueron -1.1 (succión) en la cara C4 y 0.70 (empuje) obtenido en la cara C1.
- La validación en el túnel de viento, mostro que los parámetros seleccionados para la simulación mediante CFD, proporcionaron resultados similares con 0.09% de probabilidad de discrepancia entre valores

- De forma general, para cualquier dirección y configuración de estudio, decir con exactitud la causa de la diferencia entre métodos resulta difícil, ya que ésta pudo ser originada por diversos factores y harían falta otras experimentaciones y simulaciones para explicarlas.
- Se distinguió que, las diferencias se presentan en magnitud mas no en la interacción viento estructura, pues contaban con distribuciones de presiones parecidas sobre toda su superficie al emplear ambos métodos.
- Las diferencias pueden explicarse debido a que la resolución numérica de las ecuaciones, utilizadas por el CFD en un punto de desprendimiento del flujo, tienden a valores infinitos y los programas de cómputo compensan este problema requiriéndose un mayor refinamiento de las mallas en estas áreas.

5.2 Recomendaciones.

Debido a la geometría atípica de la estructura modelada, se recomienda que, en investigaciones próximas o similares se varíen sus características volumétricas, ya sea en la forma de la base o el ángulo de inclinación de las caras.

En esta investigación sólo se consideran las presiones externas, por lo que se sugiere se consideren aberturas en la superficie, para determinar las presiones internas a la que podría estar sometida la estructura.

Ya que la configuración de los parámetros utilizados en la simulación mediante CFD arrojaron resultados aceptables, se aconseja se usen como base para la investigación de estructuras piramidales, considerando las diferentes características antes mencionadas.

Además, se recomienda que, para la validación en el túnel de viento, se coloquen puntos de medición en las aristas de la estructura. Lo anterior, para tener datos experimentales de los cambios de presión originados al desprenderse el flujo, esto con el fin de comparar que tan cercano a la realidad se encuentra el método numérico en esos puntos.

6 REFERENCIAS

- Amarante, Bedon, & Sacadura. (2015). Adaptive Glass Panels using shape Memory Alloys. *Springer International Publishing Switzerland*.
- ANSYS INC.:. (2009). *ANSYS FLUENT Theory Guide*.
- Avelar, C. (2006). *Daños ocasionados por el huracán Wilma en Cancún*. Puerto Vallarta Jalisco: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- Casabona, Vidal, Ibañez, & Zapater. (2007). *Arquitectura popular: Las barrachinas*.
- Casey, M., & Wintergerste, T. (2000). *Best Practice Guidelines*. ERCOFTAC.
- Chulin, A. (2007). Estudio aerodinámico en túnel de viento de los muros de casa-maya, casa económica convencional y de una propuesta de vivienda económica. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
- Fox, R., & McDonald, A. (1995). *Introducción a la mecánica de fluidos*. McGraw.Hill.
- Franke, et al. (2005). *Best Practice guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment*.
- Lajo Pérez, R. (1990). *Léxico de arte*. pág. 55.
- M. Ikhwan, B. R. (2006). Flow and pressure field characteristics around pyramidal buildings. *Journal of Wind Engineering and industrial Aerodynamics*, 745-765.
- Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento de la Comisión Federal de Electricidad*. (2008).
- Martinez. (2009). *Simulación numérica del flujo cuasi-estacionario de fluidos no-newtonianos en tubos con elementos insertados dinámicos*. Cartagena, España: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Massey. (1984). *Mecánica de Fluidos*. México, DF: Van Nostrand Reinhold Company LTD.
- Meseguer Ruiz, et al. (2001). *Aerodinámica Civil, Cargas de viento en las edificaciones*. Madrid, España: McGraw Hill Interamericana.

- Pacheco, A. (2012). *Determinación de los coeficientes de presión externa en una estructura empleando la simulación CFD*. Mérida, Yucatán: Universidad Autónoma de Yucatán.
- Pérez, O. (2017). *Obtención y validación de presiones medias sobre una estructura inflable mediante CFD*. Mérida, Yucatán: Universidad Autónoma de Yucatán.
- Prandtl, L. (1904). Fluid Motion with Very Small Friction. *Proceedings of the Third International Congress on Mathematics*. Heidelberg.
- Siegel, S. (2015). *Estadística No Paramétrica*. Ciudad de México: Trillas.
- Simiu E., H. S. (1996). Wind Effects on Structures. E.U.A: A. Wiley Interscience Publication.
- TEMPLAGLASS S.A. (2017). *Vidrio laminado*. Santiafo, Chile: TEMPLAGLASS S.A.

APÉNDICE A

A.1 Ensaye en el túnel de viento.

El procedimiento del ensaye fue dividido en tres fases: (1) modelación, (2) instrumentación y (3) ensaye en túnel aerodinámico.

1) Modelación

La modelación es la fase en la cual se definen los parámetros a emplear en la experimentación, con el fin de trasladar el fenómeno observado a un laboratorio de estudio. En una experimentación donde se involucran los efectos de las fuerzas de viento, es importante que las características físicas del modelo sean lo más próximas a las de la estructura prototipo, de igual forma, las características dinámicas del flujo en cuestión deben ser semejantes al entorno en estudio.

De acuerdo con los principios del análisis dimensional y de las semejanzas, habituales en la Mecánica de Fluidos, la realización de un ensayo en túnel aerodinámico con un modelo a escala de la estructura prototipo, requiere la existencia entre éstos de semejanza geométrica, semejanza cinemática y semejanza dinámica (Meseguer Ruiz, et al., 2001). A continuación, se describen estos tipos de semejanza.

- Semejanza geométrica.

La semejanza geométrica es la similitud de forma. La propiedad característica de los sistemas geoméricamente similares es que la relación de cualquier longitud en un sistema (modelo) con respecto a la longitud correspondiente en el otro sistema (prototipo), es en todas partes igual. Esta relación se conoce por lo general como el factor de escala (Massey, 1984).

Para establecer el factor de escala en este trabajo, se consideró un valor aceptable del coeficiente de bloqueo, que es la relación entre el área transversal del modelo y el de la cámara de ensayos utilizada, en cada dirección de viento estudiada; dicho coeficiente debe ser igual o menor al 10% del área transversal de la cámara de ensayos (Meseguer Ruiz, et al., 2001). El área transversal de la cámara de ensayos

del túnel de viento de la FIUADY es de $1m^2$. De acuerdo con las direcciones de estudio del flujo de viento, 0° y 45° , ésta última fue en la que se presentó la mayor área transversal del modelo, por lo que la escala seleccionada para esta investigación fue de 1:100.

En la Tabla A 1 se presenta un resumen de las dimensiones de la estructura prototipo y del modelo de acuerdo con el factor de escala seleccionado. Adicionalmente, se muestra el coeficiente de bloqueo expresado en porcentaje. Se observa que éste fue menor al 10%, tal como se recomienda en la literatura.

Tabla A 1 Parámetros para cumplir con la semejanza geométrica.

Escala 1:100	Medidas				Área de bloqueo	
	Prototipo		Modelo		Bloqueo a 0°	Bloqueo a 45°
Base	4000	cm	40	cm	400.00	565.69
Ancho	4000	cm	40	cm	Coeficiente de bloqueo	
Altura	2000	cm	20	cm	4%	6%
Longitud diagonal	5656.854	cm	56.57	cm		
Espesor	110	cm	1.10	cm		

Debido a la geometría del modelo, se optó por elaborarlo a través de la impresión en 3D. El dibujo y diseño se realizó por medio de un programa CAD. La impresora utilizada fue una Duplicator 4 marca Wanhao con una resolución de 0.25 mm (altura de capa) y un porcentaje de relleno del 15%. Dicha impresora utilizó como material de impresión el PLA (Poliácido láctico). Además, para lograr una superficie completamente lisa, se aplicaron capas de pintura acrílica.

En la Figura A 1 se muestra la idealización del modelo dentro de la cámara de ensayos del túnel de viento.

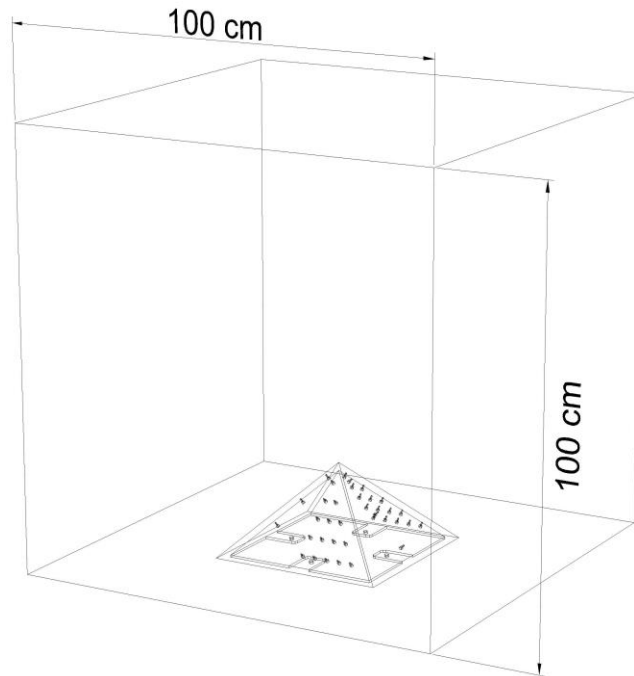


Figura A 1 Idealización del modelo dentro de la cámara de ensayos del túnel de viento.

En el diseño del modelo se consideraron los orificios para medir presiones externas. Para la distribución de los puntos de medición de presiones sobre el modelo, se consideraron dos aspectos importantes: una distribución que posibilite la instrumentación práctica en el modelo, y que, además, permita la interpolación entre valores proporcionados en el modelo ensayado. Por lo tanto, los puntos no deben estar muy distantes en la estructura prototipo. La Figura A 2 muestra el espaciamiento de los orificios que se colocaron en una pared del modelo; debido a que existe simetría y el espacio para instrumentar era limitado, se decidió colocar los orificios de tal manera que se puedan medir todas las caras rotando el modelo (Figura A 3).

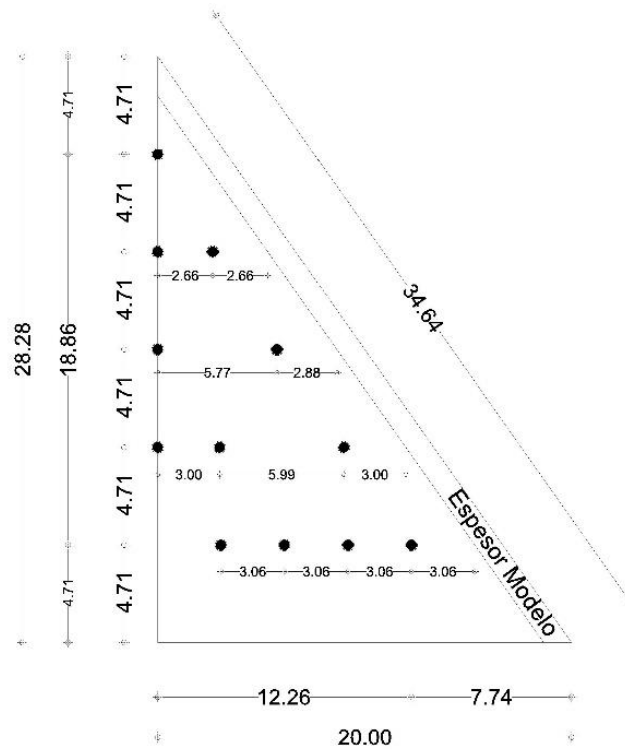


Figura A 2 Espaciamento entre puntos de medición en el modelo.

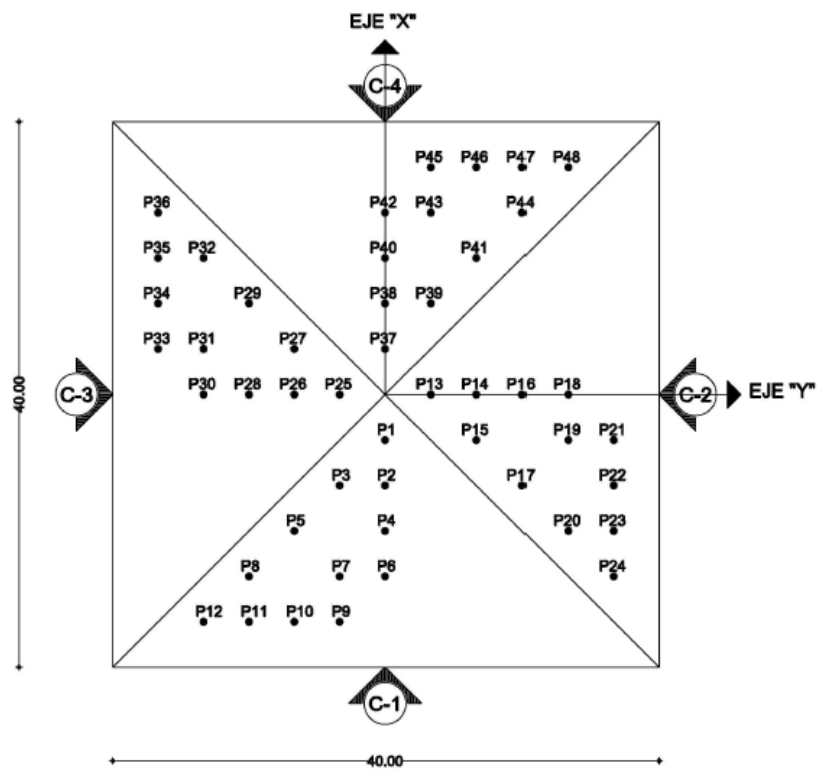


Figura A 3 Distribución de puntos de medición en el modelo.

- Semejanza cinemática.

La semejanza cinemática es la similitud de movimiento. Establece que las velocidades de las partículas en el sistema prototipo y el modelado deben mantener una relación de magnitud en el tiempo correspondiente (Massey, 1984).

La semejanza cinemática se obtuvo de acuerdo con el comportamiento del flujo alrededor del modelo. Se consideraron velocidades de viento en las cuales se generará turbulencia alrededor del modelo y que además ésta fuera constante. Debido a lo anterior, los coeficientes de presión obtenidos a partir de las presiones medidas en el túnel de viento fueron estables.

Con el modelo en dirección de 0° , se realizó un análisis de sensibilidad para la cara de sotavento (C4), la cual se consideró ser la más desfavorable debido a la turbulencia que se genera a partir del desprendimiento del fluido alrededor de la estructura, esto para definir el tiempo y la frecuencia de muestreo. Se tomaron intervalos de tiempo: 60, 90 y 120 segundos. De igual forma, se midió a tres diferentes frecuencias de muestreo, 10, 15 y 20 Hz (lectura de datos por segundo). Las velocidades del viento utilizadas fueron 18 y 20 m/s, realizando un par de pruebas con cada una de éstas.

El análisis consistió en que, para cada velocidad, variar el tiempo y frecuencia de toma de datos. Se realizaron dos pruebas para cada variante ensayada. En la Tabla A 2 y Tabla A 3 se presentan los datos obtenidos en el túnel de viento para todos los puntos instrumentados en la cara C4.

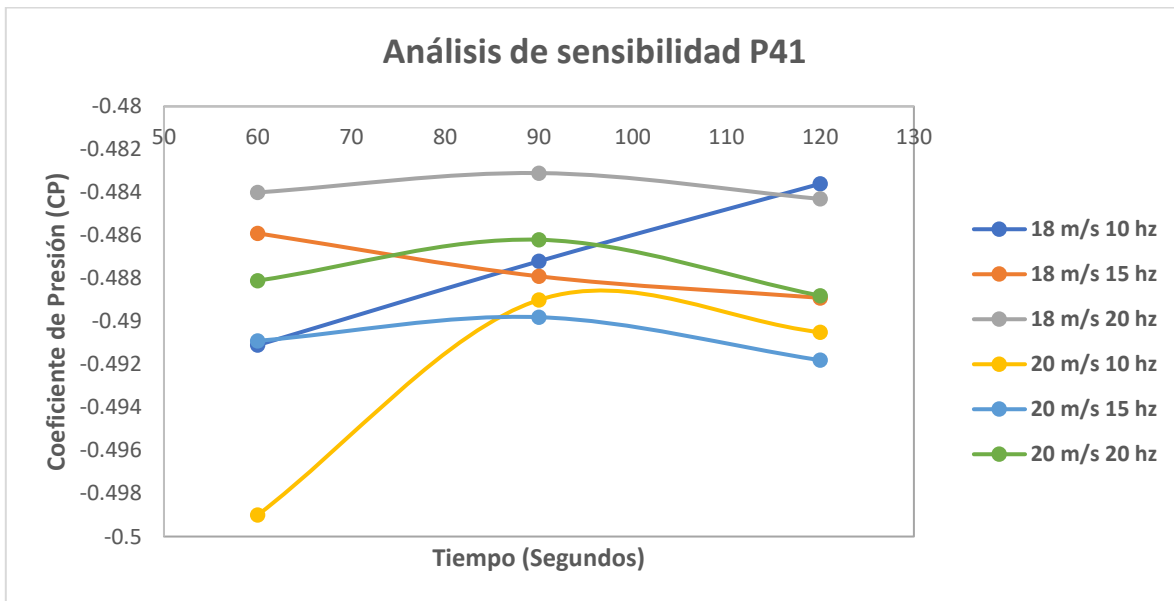
Tabla A 2 Resumen de datos obtenidos en el análisis con 18 m/s.

Velocidad	18 m/s								
Frecuencia	10 Hz			15 Hz			20 Hz		
Tiempo	60 s	90 s	120 s	60 s	90 s	120 s	60 s	90 s	120 s
Puntos									
37	-0.4826	-0.4739	-0.4733	-0.4664	-0.4696	-0.4783	-0.4689	-0.4696	-0.4748
38	-0.4831	-0.4776	-0.4794	-0.4829	-0.4772	-0.4795	-0.4749	-0.4754	-0.4776
39	-0.5071	-0.505	-0.5054	-0.5099	-0.5036	-0.5044	-0.5036	-0.5009	-0.5061
40	-0.4989	-0.4943	-0.4983	-0.5022	-0.4926	-0.4993	-0.4964	-0.4973	-0.4971
41	-0.4911	-0.4872	-0.4836	-0.4859	-0.4879	-0.4889	-0.484	-0.4831	-0.4843
42	-0.5324	-0.5347	-0.5324	-0.5353	-0.5314	-0.5314	-0.533	-0.5301	-0.5309
43	-0.4835	-0.4813	-0.4781	-0.481	-0.478	-0.4789	-0.4742	-0.4771	-0.4767
44	-0.4355	-0.4267	-0.4259	-0.4281	-0.4288	-0.4345	-0.4316	-0.4245	-0.4266
45	-0.4757	-0.4682	-0.4676	-0.4752	-0.4676	-0.4707	-0.4711	-0.465	-0.4661
46	-0.4587	-0.4556	-0.4568	-0.4578	-0.454	-0.4575	-0.4606	-0.4548	-0.457
47	-0.475	-0.4639	-0.4696	-0.4671	-0.4695	-0.4706	-0.4725	-0.4688	-0.4727
48	-0.4595	-0.447	-0.4488	-0.4488	-0.4505	-0.4569	-0.4533	-0.4463	-0.4554

Tabla A 3 Resumen de datos obtenidos en el análisis con 20 m/s.

Velocidad	20 m/s								
Frecuencia	10 Hz			15 Hz			20 Hz		
Tiempo	60 s	90 s	120 s	60 s	90 s	120 s	60 s	90 s	120 s
Puntos									
37	-0.4839	-0.4802	-0.4735	-0.4743	-0.4729	-0.4742	-0.4779	-0.4699	-0.4726
38	-0.4833	-0.4737	-0.4754	-0.482	-0.4789	-0.477	-0.4795	-0.4784	-0.4812
39	-0.5145	-0.5052	-0.5029	-0.5087	-0.5099	-0.5058	-0.5021	-0.5049	-0.5065
40	-0.4998	-0.4887	-0.4929	-0.4945	-0.4954	-0.4944	-0.4953	-0.4967	-0.4978
41	-0.499	-0.489	-0.4905	-0.4909	-0.4898	-0.4918	-0.4881	-0.4862	-0.4888
42	-0.5445	-0.54	-0.5347	-0.5366	-0.5374	-0.5362	-0.5364	-0.535	-0.5384
43	-0.4832	-0.4794	-0.4781	-0.4767	-0.4786	-0.4785	-0.4817	-0.477	-0.4801
44	-0.4351	-0.4321	-0.4396	-0.4311	-0.4382	-0.4322	-0.4326	-0.4292	-0.4327
45	-0.4808	-0.4772	-0.472	-0.472	-0.4712	-0.4705	-0.4764	-0.4715	-0.473
46	-0.4598	-0.4596	-0.4587	-0.4581	-0.4572	-0.4613	-0.4616	-0.4596	-0.4592
47	-0.49	-0.4923	-0.485	-0.4788	-0.4785	-0.4786	-0.4793	-0.4767	-0.4742
48	-0.4541	-0.4539	-0.4587	-0.4563	-0.454	-0.4547	-0.4585	-0.4572	-0.4547

De los datos obtenidos en los ensayos, se pudo determinar que el punto más desfavorable fue el P41. Esto se calculó sacando la desviación estándar de todos los datos para cada punto. Logrando un resultado de 99 % de coeficiente de variación en ese punto. De lo anterior se tomaron los datos del punto 41 para determinar los parámetros a utilizar en las pruebas. En la Grafica A 1 se puede observar la tendencia de los resultados obtenidos para cada variación de los parámetros, donde las lecturas para la frecuencia de 20 Hz y 18 m/s tiene un coeficiente de variación del 12%.



Grafica A 1 Coeficientes de presión del punto 41.

Por lo que se decidió que para esta investigación los experimentos se realizarían con una frecuencia de 20 Hz, velocidad del viento de 18 m/s y una duración de 120 segundos, teniéndose éstos como parámetros aceptables.

- Semejanza dinámica.

La semejanza dinámica corresponde a la similitud entre fuerzas. Si dos sistemas son dinámicamente similares, entonces las magnitudes de las fuerzas en los puntos similarmente localizados en cada sistema se encuentran en una relación fija (Massey, 1984).

La semejanza dinámica se logró una vez cumplidas la similitud geométrica y cinemática. A partir de esto, con las lecturas de presiones obtenidas por la instrumentación de los transductores de presión en el modelo, se obtuvieron los coeficientes de presión (C_p). Los coeficientes de presión son valores adimensionales y de acuerdo con Meseguer (2001) (Ecuación A.1), se definen como la diferencia entre la presión en un punto considerado (p) y la presión dinámica de la corriente incidente, ($\rho U_\infty^2/2$) es decir:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad \text{Ec. A.1}$$

Donde: U_∞ es el valor de la velocidad media del viento de referencia corriente arriba y ρ es la densidad del aire.

Los coeficientes de presión permiten trasladar los resultados experimentales obtenidos del modelo al prototipo y se utilizan para establecer valores de referencia para catalogar las propiedades aerodinámicas de las formas geométricas dadas (Simiu E., 1996)

2) Instrumentación

La instrumentación se refiere a la instalación del equipo de medición que se utiliza en el túnel de viento y en los modelos. Ésta puede ser muy variable dependiendo del tipo de ensaye que se desear realizar. (Chulin, 2007).

Durante los ensayes en el túnel de viento, se instalaron ductos conectados a transductores de presión en los orificios del modelo para obtener lecturas simultáneas de hasta 15 orificios. Por practicidad, en las pruebas se aprovechó la simetría del modelo y se instrumentaron 12 puntos de una cara y se roto para cubrir toda la superficie; ya que se contaba con 3 transductores del mismo equipo sin utilizar, se decidió instrumentar los puntos medios de las tres caras restantes, esto con el fin de tener puntos de referencia para cada vez que se rotara la estructura (Figura A 4).



Figura A 4 Modelo instrumentado por dentro.

3) Ensayes en el túnel de viento.

Las pruebas se hicieron utilizando el túnel de viento de la Facultad de Ingeniería de la UADY. El túnel de viento (Figura A 5) tiene como componentes principales y equipos de medición los siguientes:

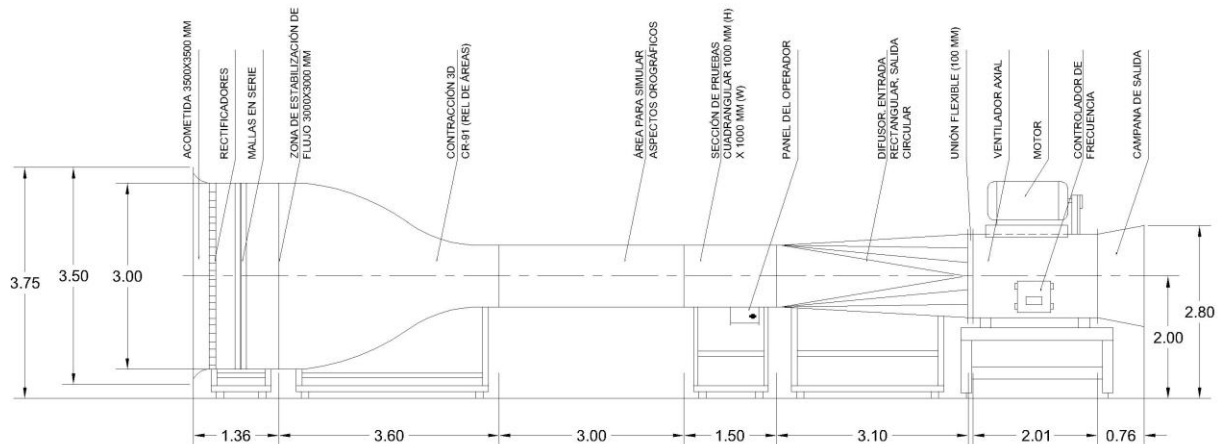


Figura A 5 Esquema del túnel de viento.

- Rectificador de flujo y pantallas correctoras.

Las áreas transversales de los rectificadores de flujo y pantallas correctoras miden aproximadamente 3 m x 3 m, son la primera zona por la cual pasa el flujo exterior al ser succionado por el ventilador, la turbulencia en la cámara de ensayos se reduce

instalando estas pantallas correctoras de flujo antes de la zona de contracción (Figura A 6).



Figura A 6 Zona de rectificación y pantallas correctoras de flujo.

- Zona de contracción.

La zona de contracción conecta a las pantallas correctoras y la cámara de ensayos, su objetivo es cambiar gradualmente el área entre estas y acelerar el flujo succionado, permitiendo alcanzar las velocidades deseadas en la cámara de ensayos (Figura A 7).



Figura A 7 Zona de contracción.

- Zona de simulación de rugosidades.

La adición más nueva al túnel de viento es una sección de 2 m de largo, que se encuentra entre la zona de contracción y la cámara de ensayos, cuyo objetivo es simular las rugosidades del terreno en el cual se encuentra el prototipo de estudio.

Esto con el fin de poder ensayar el modelo a escala con condiciones lo más cercano a la realidad (Figura A 8).



Figura A 8 Zona de simulación de rugosidades.

- Cámara de ensayos.

La cámara de ensayos cuenta con 1 m x 1 m de área transversal y una longitud de 1.5 m. Es la parte donde son colocados los modelos a experimentar, ya que es donde mejor se aprovecha tanto el aumento de velocidad por el cambio de secciones como la zona que simula la capa límite con las rugosidades que se le coloquen. Conocer sus dimensiones es una determinante para la modelación de la experimentación (Figura A 9), ya que, con base en su área transversal, se rigen los parámetros de la similitud geométrica.



Figura A 9 Cámara de ensayos.

- Difusor.

El difusor está localizado entre la cámara de ensayos y el ventilador. Su función es moderar la velocidad del flujo proveniente de la cámara de ensayos al ventilador, en él ocurre un decremento de la velocidad del flujo y se recupera la presión estática (Figura A 10).



Figura A 10 Difusor.

- Ventilador.

El ventilador por succión extrae el aire del medio para hacerlo pasar a lo largo del túnel, haciendo que fluya de manera constante dentro del mismo y posteriormente lo regresa a la atmósfera. Las características del túnel de viento y su motor permiten que se alcancen velocidades de aproximadamente 35 m/s (126 km/hr) en la cámara de ensayos (Figura A 11).



Figura A 11 Ventilador (vista interior).

- Micromanómetro con tubo de pitot.

El micromanómetro con tubo de pitot (Marca PCE Instruments) es utilizado para la medición de la presión diferencial, la velocidad del flujo de aire y la temperatura ambiental durante el desarrollo de las pruebas (Figura A 12).



Figura A 12 Micromanómetro con tubo de pitot.

- Multisensor de presiones.

El Multisensor de presiones marca Esterline, modelo 9116, integra 16 sensores de presión piezorresistivos de silicio, con la capacidad para capturar presiones entre ± 689 kPa (Figura A 13).

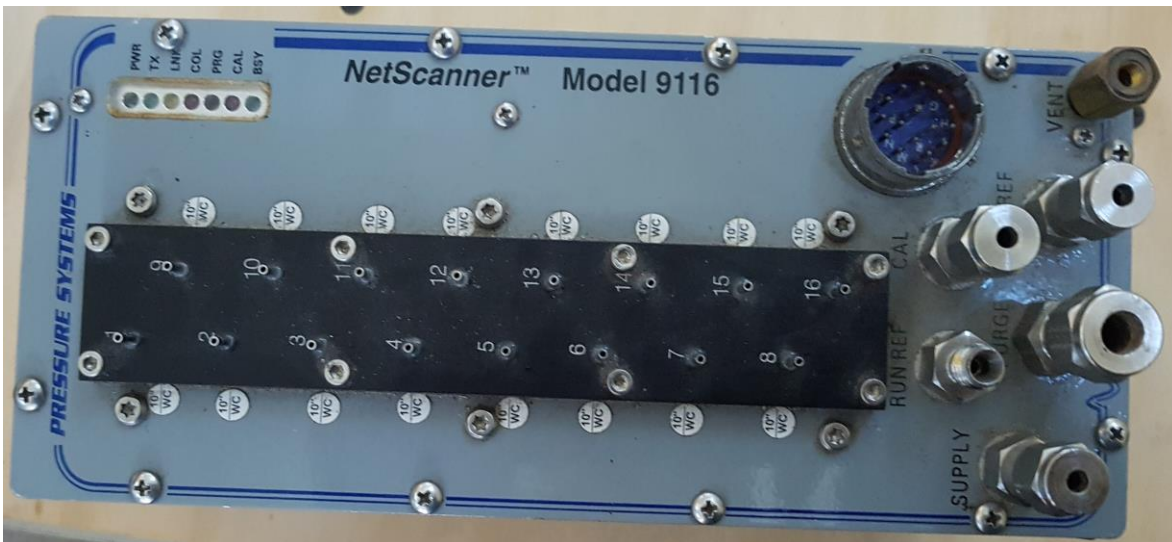


Figura A 13 Multisensor de Presiones marca Esterline, modelo 9116.

Cada prueba se realizó durante 120 segundos con lecturas de presión a razón de 20 Hz (veinte datos por segundo) y velocidad de viento de 18 m/s. Las direcciones

de viento estudiadas en esta investigación fueron 0° y 45° (Figura A 14). La dirección de 0° , fue considerada cuando la cara C1 se encontraba perpendicular al flujo del viento (Figura A 15). La dirección de 45° se asignó cuando el modelo estuvo en diagonal al flujo del viento (Figura A 16).

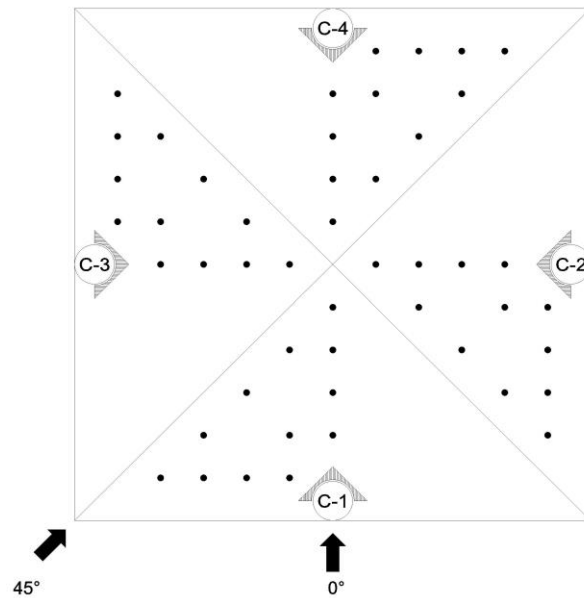


Figura A 14 Direcciones de estudio.

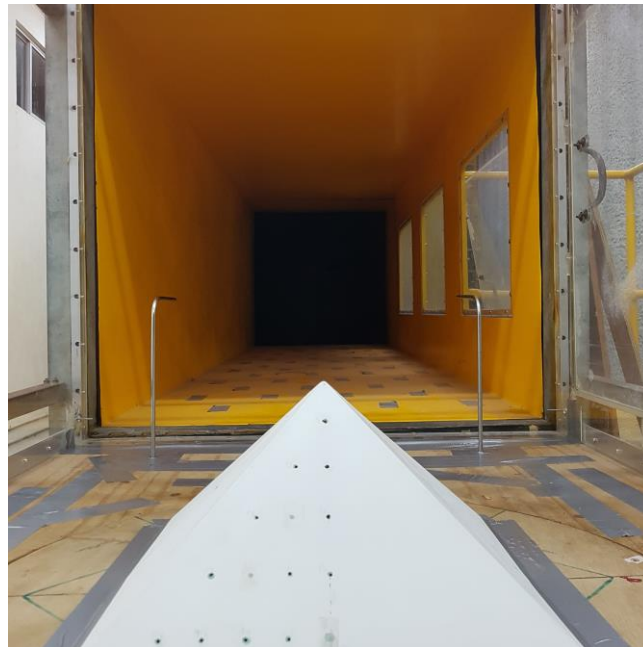


Figura A 15 Prueba del modelo a 0° .

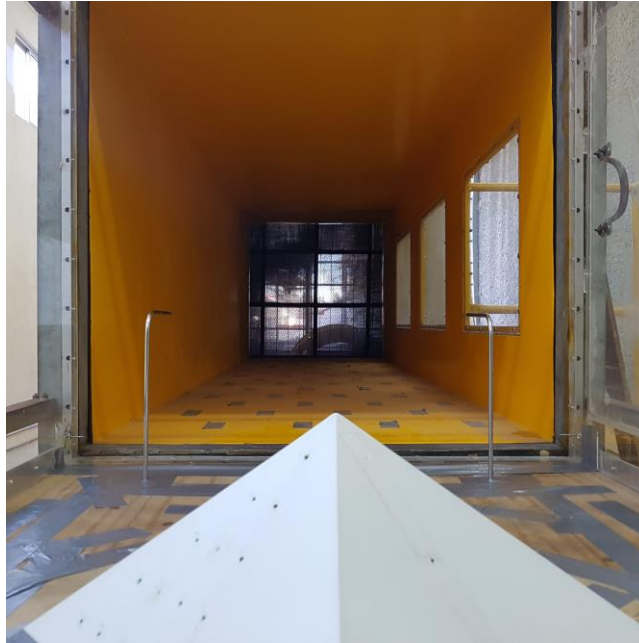


Figura A 16 Prueba del modelo a 45°.

Los coeficientes de presión fueron obtenidos mediante la aplicación de la **Error! Reference source not found.** y con las lecturas registradas durante cada ensaye. El valor $(p - p_\infty)$ y la velocidad promedio del viento (U_∞) durante cada ensaye fueron medidos con el manómetro con tubo de pitot en unidades de Pa y m/s, respectivamente. La densidad del aire (ρ) se consideró igual a 1.23 kg/m³, considerada como la densidad aproximada del aire a presión atmosférica normal y a 15 °C, valores estándar del aire.

APÉNDICE B

B.1 Coordenadas de los puntos instrumentados en el modelo, con base en ejes cartesianos colocados en el centro de la estructura.

El sistema de ejes globales se posicionó al centro del modelo con coordenadas X, Y, Z igual a (0,0,0), tal como se indican en la Figura B 1.

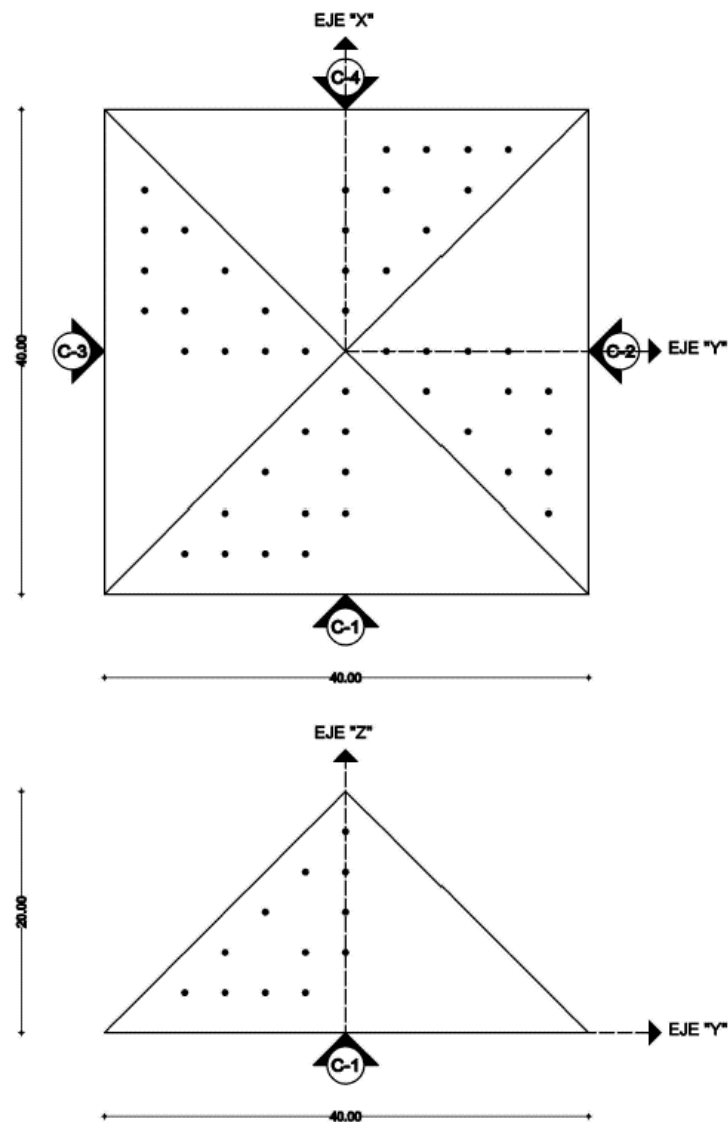


Figura B 1 Coordenadas globales del prototipo en planta y frontal, respectivamente.

- Eje “Z”, representa el ancho del modelo y comprende un intervalo de -20 cm a 20cm.
- Eje “X”, está a lo largo del modelo y va de -20 cm a 20 cm.
- Eje “Y”, se relaciona con la altura del modelo y es de 0 cm a 20 cm.

En la Tabla B 1, Tabla B 2 y **Error! Reference source not found.** se presentan las coordenadas de los puntos en las caras del modelo, enumerados de 1 al 48.

Tabla B 1 Coordenadas de la cara de Barlovento (C1), medidas en cm.

C1			
PUNTO	X	Y	Z
P1	3.3333	33.3333	16.6667
P2	6.6667	36.6667	13.3333
P3	6.6667	36.6667	13.3333
P4	10	40	10
P5	10	40	10
P6	13.3333	43.3333	6.6667
P7	13.3333	43.3333	6.6667
P8	13.3333	43.3333	6.6667
P9	16.6667	46.6667	3.3333
P10	16.6667	46.6667	3.3333
P11	16.6667	46.6667	3.3333
P12	16.6667	46.6667	3.3333

Tabla B 2 Coordenadas de la cara Lateral (C2 y C3), medidas en cm.

C2 y C3			
PUNTO	X	Y	Z
P13	0	33.3333	16.6667
P14	0	36.6667	13.3333
P15	2.6597	36.6667	13.3333
P16	0	40	10
P17	5.7685	40	10
P18	0	43.3333	6.6667
P19	2.9965	43.3333	6.6667
P20	8.9896	43.3333	6.6667
P21	3.0639	46.6667	3.3333
P22	6.1278	46.6667	3.3333
P23	9.1917	46.6667	3.3333
P24	12.2556	46.6667	3.3333

P25	0	33.3333	16.6667
P26	0	36.6667	13.3333
P27	-2.6597	36.6667	13.3333
P28	0	40	10
P29	-5.7685	40	10
P30	0	43.3333	6.6667
P31	-2.9965	43.3333	6.6667
P32	-8.9896	43.3333	6.6667
P33	-3.0639	46.6667	3.3333
P34	-6.1278	46.6667	3.3333
P35	-9.1717	46.6667	3.3333
P36	-12.2556	46.6667	3.3333

Tabla B 3 Coordenadas de la cara de Sotavento (C4), medidas en cm.

C4			
PUNTO	X	Y	Z
P37	-3.3333	33.3333	16.6667
P38	-6.6667	36.6667	13.3333
P39	-6.6667	36.6667	13.3333
P40	-10	40	10
P41	-10	40	10
P42	-13.3333	43.3333	6.6667
P43	-13.3333	43.3333	6.6667
P44	-13.3333	43.3333	6.6667
P45	-16.6667	46.6667	3.3333
P46	-16.6667	46.6667	3.3333
P47	-16.6667	46.6667	3.3333
P48	-16.6667	46.6667	3.3333