



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Obtención de coeficientes de presión y  
velocidades de viento en un conjunto  
de edificios mediante simulación CFD**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Josafat Arturo Piña Gutiérrez

**DIRECTOR(A) DE TESIS**

Dr. Roberto Gómez Martínez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

## **Dedicatorias**

*Le agradezco a Dios por darme la fortaleza para lograr mis metas y objetivos planteados al inicio de este largo camino.*

*A mis padres por su cariño, paciencia, por la formación que he recibido y todo el apoyo incondicional brindado a lo largo de mi vida. Siendo yo consciente del sacrificio que esto representó. Especialmente a mi padre Martin Piña González quién fue pilar importante de apoyo durante el trayecto de mi formación como ingeniero, por aguantar todas las noches de desvelo y el esfuerzo que hacía para apoyarnos a mí y a mi hermana, a él le dedico todo mi esfuerzo y sacrificio.*

*A toda mi familia, por sus enseñanzas y apoyo cuando más lo necesitábamos; A mis hermanos José Miguel y Marian Elena, por ser mis compañeros de vida y por todo su apoyo incondicional que me brindan día con día y a mi madre Ma. Elena Gutiérrez por su comprensión y apoyo.*

*Y a todos mis grandes amigos que durante este largo tiempo fuimos construyendo un lazo de amistad que durará para siempre, a ellos les guardo gran admiración y respeto. Quiero agradecer especialmente a Lisette porque nunca perdió la confianza en mí, ha estado en mis momentos más felices y en los difíciles, siempre me ha motivado a ser mejor cada día, a ella le guardo mucha admiración y amor.*

## **Agradecimientos**

*A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, a las cuales siempre guardaré admiración, respeto y cariño, por mostrarme un panorama distinto, por formarme como un profesional íntegro y por darme una formación privilegiada con los mejores profesores de nuestro país.*

*Al Dr. Roberto Gómez Martínez por invertir su tiempo, paciencia y dedicación, y por brindarme la confianza y conocimiento necesario para desarrollar el presente trabajo, además de guiarme en mi formación como ingeniero y darme los recursos necesarios para solucionar problemas de Ingeniería Civil.*

*Al Ing. Raúl Sánchez García por apoyarme en la elaboración del presente trabajo, por compartirme sus conocimientos y porque es para mí como un maestro a quién admiro y le guardo respeto.*

*Le agradezco al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por permitirme incursionar en el campo de la investigación, por ser parte del programa de becarios y por el apoyo económico brindado.*

*A todos los profesores que han contribuido en mi formación académica y humana, y a todos los amigos que me apoyaron a lo largo de mi carrera universitaria.*

# Contenido

Resumen .....	8
Abstract.....	8
Objetivo General .....	10
Introducción .....	10
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES .....	12
1.1 México y su relación con los huracanes.....	12
1.2 Conceptos básicos .....	14
CAPÍTULO 2. MÉTODOS DE ANÁLISIS Y CRITERIOS PARA DISEÑO POR VIENTO DE ESTRUCTURAS DE EDIFICACIÓN .....	19
2.1 Acciones del viento que deben considerarse .....	19
2.2 Procedimientos para evaluar las acciones generadas por viento .....	20
2.3 Velocidad básica de diseño, <b>VD</b> .....	21
2.4 Velocidad regional, <b>VR</b> .....	21
2.4.1 Velocidad regional para un periodo de retorno fijo .....	22
2.5 Factor de exposición, <b>Frz</b> .....	22
2.6 Factor de topografía, <b>FT</b> .....	23
2.7 Presión dinámica de base, <b>qz</b> .....	23
2.8 Coeficiente de presión, <b>Cp</b> .....	28
2.9 Fuerza actuante en estructuras .....	29
2.10 Método de análisis estático.....	29
2.11 Presión actuante sobre estructuras, <b>pz</b> .....	30
2.12 Métodos experimentales en Túnel de Viento .....	30
CAPÍTULO 3. AERODINÁMICA EN LA INGENIERÍA CIVIL .....	32
3.1 Aspectos generales del viento .....	32
3.2 Variación de la velocidad del viento con la altura .....	32
3.3 Capa Límite .....	33
3.4 Capa Límite Atmosférica.....	34
3.5 Perfil vertical de velocidad del viento.....	35
3.5.1 Fórmula exponencial del perfil vertical del viento.....	35
3.5.2 Fórmula logarítmica del perfil del viento.....	36
3.6 Ecuaciones gobernantes de un fluido en movimiento.....	38
3.7 Ecuaciones de Navier – Stokes .....	39

CAPÍTULO 4. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) EN LA INGENIERÍA CIVIL .....	42
4.1 Aplicaciones de la dinámica de fluidos computacional .....	42
4.2 Componentes de una simulación CFD .....	44
4.3 Proceso de un código CFD .....	45
4.4 Gráficos y resultados obtenidos de una simulación CFD .....	46
4.5 Guía de mejor práctica para simulación CFD “COST Action 732” .....	49
4.5.1 Selección de variables objetivo.....	49
4.5.2 Selección de ecuaciones que describen la física del flujo .....	50
4.5.3 Modelos para simular un flujo.....	50
4.5.4 Dominio computacional .....	51
4.5.5 Selección de condiciones de frontera .....	51
4.5.6 Selección de datos iniciales .....	52
4.5.7 Selección de la malla computacional.....	52
4.5.8 Selección del criterio de convergencia iterativo .....	53
CAPÍTULO 5. ESTUDIO DE VIENTO DE UN CONJUNTO DE EDIFICIOS MEDIANTE SIMULACIÓN CFD .....	54
5.1 Descripción de la estructura .....	55
5.2 Definición de la geometría .....	55
5.2.1 Geometría A (Dominio Computacional).....	56
5.2.2 Geometría B (Modelos con 1, 2, 3 y 4 Torres) .....	59
5.3 Definición de la Velocidad de Diseño, <b>VD</b> , y el perfil vertical de viento .....	61
5.4 Calibración del modelo y preparación previa a la simulación.....	62
5.5 Simulación de la estructura .....	66
5.6 Sensibilidad y validación del enmallado .....	71
5.7 Análisis de resultados .....	72
Conclusiones y recomendaciones .....	91
Referencias.....	93
ANEXO A.....	94
ANEXO B.....	95

## Índice de Figuras

Figura 1.1	Ciclón tropical con ráfagas de viento mayores a 100 km/hr .....	12
Figura 1.2	Colapso del puente Tacoma debido a ráfagas de viento de aproximadamente 68 km/h .....	13
Figura 1.3	Mapa mundial de peligros naturales.....	13
Figura 1.4	Representación visual del flujo laminar y flujo turbulento.....	15
Figura 1.5	Representación del comportamiento de un fluido entre dos superficies paralelas.....	17
Figura 1.6	Ejemplo del flujo de viento a través de edificios mediante simulación CFD con ayuda del software ANSYS FLUENT.....	18
Figura 2.1	Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 200 años (MDOC DV, 2008) .....	25
Figura 2.2	Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 50 años (MDOC DV, 2008) .....	26
Figura 2.3	Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 10 años (MDOC DV, 2008) .....	27
Figura 3.1	Representación de la capa límite.....	33
Figura 3.2	Esquema de la capa límite atmosférica (CLA).....	34
Figura 3.3	Elemento diferencial de fluido .....	39
Figura 4.1	Vectores de velocidad en un cubo de 6x6 m .....	47
Figura 4.2	Contorno de presiones en un cubo de 6x6 m .....	47
Figura 4.3	Campo de velocidades a través de un cubo de 6x6 m .....	47
Figura 4.4	Líneas de flujo del viento a través de un cubo de 6x6 m .....	48
Figura 4.5	Leyenda que muestra el rango de velocidades de una simulación .....	48
Figura 4.6	Perfil de viento que ingresa al dominio computacional .....	48
Figura 5.1	Conjunto de edificios habitacionales.....	54
Figura 5.2	Vista en planta de la orientación de cada una de las torres en conjunto.....	55
Figura 5.3	Partes del dominio computacional para una simulación CFD .....	56
Figura 5.4	Dominio computacional siguiendo las recomendaciones de la COST Action 732 ...	57
Figura 5.5	Dominio computacional optimizado (Geometría A) .....	58
Figura 5.6	Geometría de la Torre 1 idealizada como un prisma rectangular .....	59
Figura 5.7	Modelo de edificios dentro del dominio computacional (Vista lateral) .....	60
Figura 5.8	Modelo de edificios dentro del dominio computacional (Vista en planta) .....	60
Figura 5.9	Coeficientes de presión obtenidos con distintos modelos numéricos .....	63
Figura 5.10	Comparativa del perfil vertical de velocidad del viento vs simulado en CFD .....	64
Figura 5.11	Campo de velocidades del dominio computacional (Geometría A) .....	65
Figura 5.12	Perfiles de viento simulados en CFD .....	65
Figura 5.13	Ventana inicial al ejecutar ANSYS FLUENT .....	66
Figura 5.14	Enmallado para modelo de Torre 1 utilizando Body Sizing .....	68
Figura 5.15	Residuales alcanzados después de la simulación de Torre 1 .....	70
Figura 5.16	Sensibilidad y validación del enmallado .....	71
Figura 5.17	Coeficientes de presión alrededor de Torre 1 (anillo vertical) .....	72

Figura 5.18	Contornos de coeficientes de presión para modelo de Torre 1 .....	73
Figura 5.19	Campo de velocidades y líneas de flujo para modelo de Torre 1 .....	74
Figura 5.20	Líneas de flujo a través de Torre 1 (Vista en planta) .....	74
Figura 5.21	Contornos de coeficientes de presión para modelo de Torre 1 y 2 .....	75
Figura 5.22	Comparación de Cp en Torre 1 para simulación con 1 edificio y con 2 edificios....	76
Figura 5.23	Campo de velocidades y contorno de presiones para modelo de Torre 1 y 2 .....	77
Figura 5.24	Contorno de coeficientes de presión de la Torre 3 para modelo de Torres 1, 2 y 3 .....	78
Figura 5.25	Comparación de Cp en Torre 1, 2 y 3 para simulación con 3 edificios .....	79
Figura 5.26	Campo de velocidades para modelo de Torres 1, 2 y 3 .....	80
Figura 5.27	Líneas de flujo y desprendimiento de vórtices en modelo de Torres 1, 2 y 3 .....	80
Figura 5.28	Desarrollo del perfil de viento para modelo de conjunto de 4 torres .....	81
Figura 5.29	Comparación de Cp en Torres 1, 2, 3 y 4 para simulación con 4 edificios .....	82
Figura 5.30	Campo de velocidades para modelo de conjunto de 4 torres (Viento: 0°) .....	83
Figura 5.31	Comparación de Cp en esquina derecha de Torres 1, 2, 3 y 4 para simulación con 4 edificios .....	84
Figura 5.32	Campo de velocidades para modelo de conjunto de 4 torres (Viento: 45°) .....	84
Figura 5.33	Comparación de Cp en Torres 1, 2, 3 y 4 para simulación con 4 edificios (Viento: 90°) .....	85
Figura 5.34	Campo de velocidades para modelo de conjunto de 4 torres (Viento: 90°) .....	86

## Resumen

El presente trabajo trata sobre la obtención de coeficientes de presión que se presentan en un grupo de edificios a los que se les aplica un flujo de viento turbulento mediante simulación CFD (Computational Fluid Dynamics), bajo criterios y recomendaciones establecidas en diferentes literaturas sobre el tema. Los distintos códigos de CFD cuentan con diferentes modelos de análisis como los modelos de turbulencia RANS (Reynolds Averaged Navier – Stokes) que son utilizados en casos prácticos de simulación de la capa límite atmosférica.

La dinámica de fluidos computacional (CFD) resulta ser una herramienta bastante útil para estudiar el comportamiento del viento a través de las estructuras, lo que nos permitirá comparar resultados experimentales y analíticos con los valores que se recomiendan en la normativa mexicana.

## Abstract

*The present work deals with obtaining pressure coefficients for a structure under turbulent wind flow by means of CFD simulation (Computational Fluid Dynamics), under criteria and recommendations established in different literature on the subject. Different CFD codes have different analysis models such as RANS (Reynolds Averaged Navier - Stokes) turbulence models that are used in practical cases of simulation of the atmospheric boundary layer.*

*Computational fluid dynamics (CFD) turns out to be a very useful tool to study wind behavior on structures, wich will allow us to compare experimental an analytical results with the values recommended in Mexican standards.*

## Nomenclatura

$\rho$	Densidad
$\mu$	Viscosidad dinámica
$F$	Fuerza
$m$	Masa
$a$	Aceleración
$V$	Velocidad
$Re$	Número de Reynolds
$g$	Aceleración de la gravedad
$t$	Tiempo
$V_D$	Velocidad básica de diseño
$V_{ref}$	Velocidad de referencia
$F_T$	Factor de topografía local
$F_{rz}$	Factor de exposición local
$V_R$	Velocidad regional de ráfaga viento
$q_z$	Presión dinámica de base
$p_z$	Presión actuante
$\alpha$	Exponente de rugosidad
$k$	Constante de Von Karman
$u_*$	Velocidad de fricción
$G$	Factor de corrección por temperatura y por altura
$\Omega$	Presión barométrica
$\tau$	Temperatura ambiental
$T$	Periodo de retorno
$C_p$	Coefficiente de presión

## Objetivo General

- Analizar y estudiar el efecto que tiene el viento en estructuras civiles como edificios, haciendo uso de la dinámica de fluidos computacional y estudiar el efecto que generan las estructuras aledañas.

## Objetivos específicos

- Simular la capa límite atmosférica y obtener el perfil de viento medio.
- Desarrollar modelos con uno a cuatro edificios con ayuda de un software de dinámica de fluidos computacional (CFD) y estudiar el efecto que tiene el viento en cada modelo.
- Obtener coeficientes de presión y líneas de flujo en los edificios estudiados con ayuda de la dinámica de fluidos computacional y estudiar las ventajas y desventajas que tiene este tipo de modelación.

## Introducción

En la actualidad es de gran importancia realizar estudios para evaluar los efectos del flujo de viento sobre las estructuras de edificios. En localidades cercanas a las costas, las velocidades del viento llegan a ser tan significativas, que en varios casos el viento rige para el diseño por sobre las demás fuerzas.

La tecnología ha evolucionado y beneficiado a la ingeniería, de tal manera, que ahora se puede contar con distintos softwares enfocados al análisis estructural de edificaciones, y en nuestro caso la dinámica de fluidos aplicada a estructuras civiles.

Dentro de la dinámica de fluidos existen tres tipos de flujos, el primero se conoce como flujo laminar que se refiere al movimiento intensamente ordenado del fluido, caracterizado por capas no alteradas, y el segundo que se conoce como flujo turbulento y que se refiere al movimiento intensamente desordenado de un fluido, donde es común que se generen velocidades altas y se caracteriza por tener fluctuaciones en la velocidad. Existe otro flujo que se alterna entre el flujo laminar y el turbulento y que se conoce como flujo de transición. El presente trabajo se enfoca en el análisis del efecto de flujo turbulento del aire que impacta a una estructura rígida.

La dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD) permite al usuario simular flujos de sustancias (fluidos) como lo es el agua o el aire; siendo este último fluido el que se estudiará en el presente trabajo. También la simulación CFD tiene como objetivo economizar costos en el desarrollo de una investigación en el tema de la dinámica

de fluidos, por lo que se puede realizar un proyecto de investigación con ayuda de la computadora y apoyarse de resultados experimentales realizados en un túnel de viento.

En el Capítulo 1, “Antecedentes” se presentarán algunos conceptos que usaremos a lo largo del trabajo. Estos conceptos son importantes para comprender el presente trabajo de investigación, como lo es el conocer los tipos de flujos de viento que impactan en una estructura durante su vida útil.

Para el Capítulo 2, “Métodos de análisis y criterios para diseño por viento de estructuras de edificación” se describirá el proceso que establece el Manual de Diseño de Obras Civiles de CFE para obtener la velocidad de diseño que será necesaria para nuestras simulaciones, se tienen que considerar parámetros tanto topográficos como geográficos.

En el Capítulo 3, “Aerodinámica en la Ingeniería Civil” se describirá la capa límite atmosférica, así como los perfiles verticales de viento que representan el comportamiento de la velocidad del viento respecto a la altura, también se presentarán las ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos.

En el Capítulo 4, “Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en la Ingeniería Civil” se presentarán las recomendaciones establecidas en diferentes literaturas y que servirán para realizar los modelos. También se discutirán las partes que conforman el dominio computacional y las condiciones de frontera que se deben de considerar para reducir incertidumbres y errores en la solución.

En el Capítulo 5, “Estudio de viento de un conjunto de edificios mediante simulación CFD” se presentará el proceso de simulación realizado con un software comercial de CFD y se analizará el comportamiento del viento a través de un edificio, así como el impacto que se tiene al tener estructuras cercanas. Se presentará de manera visual el flujo de viento (líneas de flujo) y los coeficientes de presión de mayor relevancia.

Al final del trabajo se presentarán conclusiones sobre el comportamiento del viento a través de los edificios modelados, y el uso de nuevas tecnologías para el estudio de viento, así como la importancia del estudio del viento en la ingeniería civil.

## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

### 1.1 México y su relación con los huracanes

Para dar un mejor contexto al actual trabajo, es importante saber en dónde se encuentra ubicado nuestro país; México se encuentra en una zona geográfica del planeta que es altamente vulnerable a fuertes corrientes de viento debido a que se ubica en medio de dos grandes extensiones de agua, por un lado, se tiene la costa del Pacífico y por el otro la costa del Golfo de México. Estas corrientes de viento, en muchas ocasiones, son generadoras de fuertes huracanes y ciclones tropicales que azotan a las regiones costeras del país. A través de los años, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ha estudiado dichos fenómenos naturales; cada año, entre el 15 de mayo y el 30 de noviembre transcurre en México la temporada de huracanes o ciclones tropicales, lluvias torrenciales y tornados.



Figura 1.1 Ciclón tropical con ráfagas de viento mayores a 100 km/hr. <https://bit.ly/3oYnDZm>.

Los huracanes son clasificados según su grado de fuerza (velocidad), ya que pueden producir estragos devastadores, no solo a las poblaciones costeras sino también a zonas interiores, sitios naturales y, de igual manera, a todo tipo de estructuras civiles, casas, hoteles, edificios y espectaculares (ver figura 1.1 y figura 1.2).

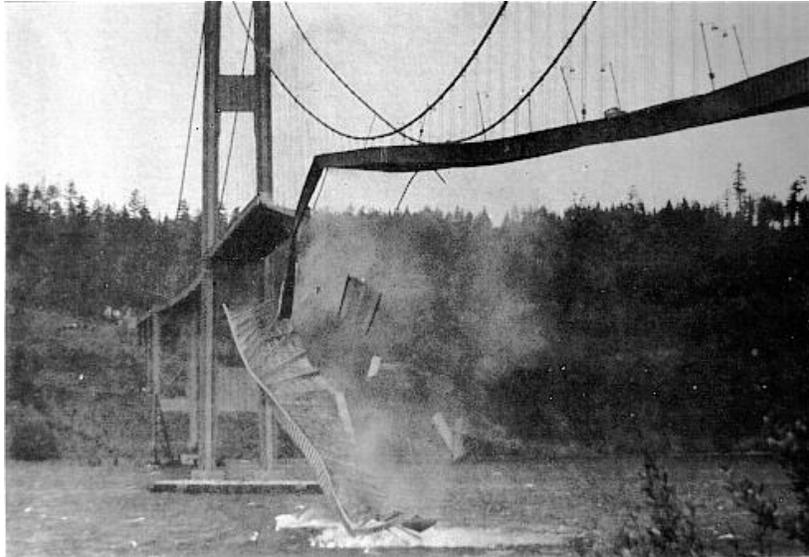


Figura 1.2 Colapso del puente Tacoma debido a ráfagas de viento de aproximadamente 68 km/h.  
<https://bit.ly/3a1RThM>.

En la figura 1.3 se muestra un mapa mundial de los peligros naturales a los que nos encontramos expuestos, en él se muestran las rutas de huracanes y las zonas sísmicas del planeta. Se puede observar que el territorio mexicano se encuentra en una zona geográfica donde frecuentemente se expone a fuertes huracanes, además de una alta actividad sísmica.

NATHAN WORLD MAP OF NATURAL HAZARDS

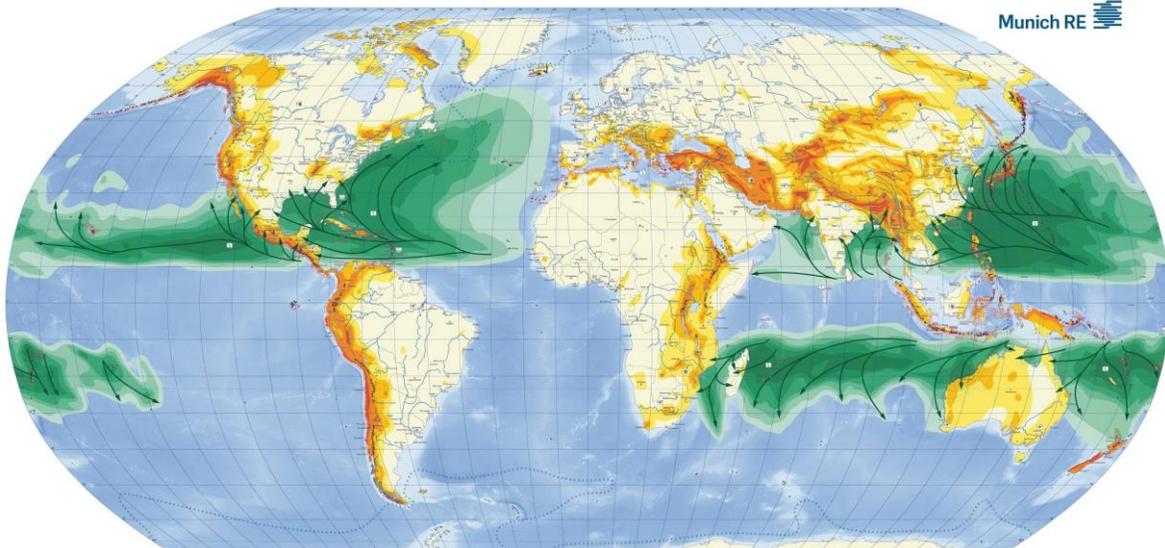


Figura 1.3 Mapa mundial de peligros naturales (Rutas de Huracanes y zona sísmicas del planeta).  
<https://bit.ly/2N90x4X>.

Por lo anterior, es importante considerar las fuerzas ejercidas por el viento en el análisis de una estructura susceptible a grandes velocidades de viento. En muchas ocasiones los fuertes vientos pueden ocasionar daños o la pérdida total de las estructuras, y para esto, es necesario estudiar muy bien el efecto del viento sobre estas.

## 1.2 Conceptos básicos

- **Viento**

El viento es considerado como el movimiento de las masas de aire, el cual es consecuencia de la diferencia en la presión atmosférica entre dos puntos, las fuerzas de desviación producto de la rotación de la tierra, lo que se le conoce como fuerza de Coriolis y las fuerzas centrífugas debidas a la curvatura de la trayectoria del viento. La diferencia de presiones se debe a la diferencia de temperaturas en dos zonas, a su vez, la diferencia de temperatura produce una diferencia de densidades en el aire provocando que el aire se mueva para compensar esas diferencias buscando un equilibrio.

- **Dinámica de Fluidos**

La dinámica de fluidos estudia a los fluidos en movimiento, cuando se estudia el movimiento de las partículas de agua se le llama hidrodinámica y en el caso del aire se le conoce como aerodinámica. El estudio de estos fluidos se basa en las ecuaciones de continuidad, momento, conservación de energía y movimiento.

- **Fluido incompresible**

La incompresibilidad es una aproximación, se dice que un flujo es incompresible si la densidad permanece aproximadamente constante a lo largo de todo el flujo, lo que significa que el volumen de todas las porciones del fluido permanece inalterado sobre el curso de su movimiento. Para nuestro caso de análisis, los flujos de gases se pueden considerar como incompresibles.

- **Regímenes de flujo**

Clasificar el flujo por el tipo de régimen en que se desarrolla es una manera sencilla de entender el comportamiento del flujo generado, algunos flujos son suaves y ordenados en tanto que otros, son considerados caóticos (ver figura 1.4). Un movimiento (flujo)

intensamente ordenado de un fluido, caracterizado por capas no alteradas de éste se le conoce como **flujo laminar** (flujo de partículas en “láminas”).

El movimiento (flujo) intensamente desordenado de un fluido, en donde es común que se presenten velocidades altas y fluctuaciones en la velocidad se le conoce como **flujo turbulento**. El aire a velocidades altas es común que se presente en un flujo turbulento.

Un flujo que se alterna entre laminar y turbulento se le conoce como **flujo de transición**.

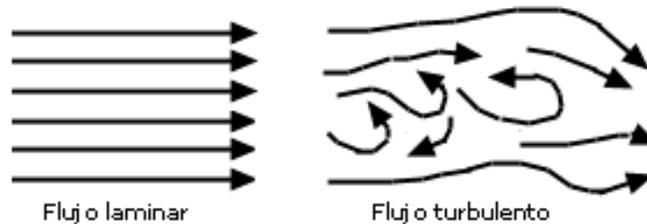


Figura 1.4 Representación visual de flujo laminar y flujo turbulento. <https://bit.ly/3q62v4K>.

- **Número de Reynolds**

El régimen de flujo depende principalmente de la razón de *fuerzas inerciales* a *fuerzas viscosas* en el fluido, esta razón se llama **número de Reynolds** (cantidad adimensional).

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{V_{prom}L}{v}$$

Ecuación 1-1

donde:

$V_{prom}$  Velocidad de flujo promedio (m/s).

$L$  Longitud característica de la geometría (m).

$v = \mu/\rho$  Viscosidad cinemática del fluido (m<sup>2</sup>/s).

El número de Reynolds es uno de los parámetros principales que determinan el comportamiento de los fluidos newtonianos. Un número de Reynolds relativamente bajo indica un movimiento del flujo lento y viscoso en el que las fuerzas inerciales son despreciables. A los flujos laminares se les asocia un número de Reynolds moderado y en el que se presentan pequeñas variaciones. En flujos turbulentos pasa lo opuesto, se les asocia un número de Reynolds elevado y se presentan fuertes variaciones en el flujo.

Hay ciertos valores en el número de Reynolds que aproximan el comportamiento de un fluido en sus diferentes tipos de regímenes.

$0 < Re < 2,300$	Flujo laminar
$2,300 < Re < 4,000$	Flujo de transición
$4,000 < Re$	Flujo turbulento

Los estudios sobre el comportamiento de los fluidos y su relación con el número de Reynolds han logrado establecer algunas simplificaciones. Se puede considerar que para valores demasiado altos en el número de Reynolds las fuerzas viscosas resultan pequeñas y el fluido se puede considerar como un fluido no viscoso, por lo tanto, si el número de Reynolds es bajo (flujo laminar) las fuerzas viscosas deben ser consideradas.

- **Viscosidad**

La viscosidad es la medida que determina la resistencia al flujo de un fluido, puede considerarse como el rozamiento interno de las partículas de un fluido, es decir, la resistencia que tienen las moléculas de un fluido para separarse unas de otras. En los gases, la viscosidad es causada por colisiones moleculares. La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a la deformación por corte.

La viscosidad dinámica o viscosidad absoluta es la resistencia interna entre las moléculas de un fluido en movimiento. Esta resistencia resulta cuando un fluido se somete a un esfuerzo cortante provocando que la capa inmediata al esfuerzo cortante se deforme a una cierta velocidad, generando movimiento entre las capas subsecuentes y desarrollando una fuerza de fricción entre ellas (ver figura 1.5).

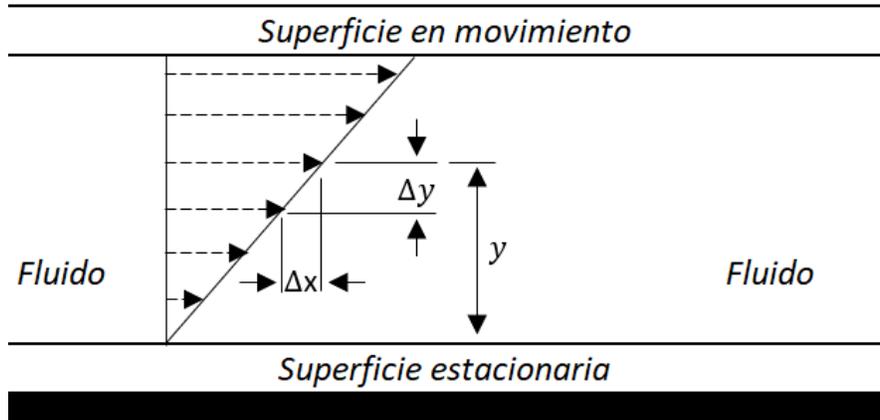


Figura 1.5 Representación del comportamiento de un fluido entre dos superficies paralelas.

- **Presión estática, dinámica y total**

La presión se define como una fuerza normal ejercida por un fluido por unidad de área. Se habla de presión solo cuando se trata de un gas o un líquido y su unidad de medida es newtons por metro cuadrado ( $N/m^2$ ), la cual se denomina Pascal (Pa), es decir:

$$1 Pa = 1 N/m^2$$

La presión estática es la presión en un punto nominal dentro de un fluido, y siempre puede ser definida si el fluido está en movimiento o no. La presión dinámica es la energía cinética por unidad de volumen de una partícula de fluido. La presión total es la suma de la presión estática y la presión dinámica.

$$P_{dinámica} = \frac{1}{2} \rho V^2$$

Ecuación 1-2

- **Simulación CFD (Computational Fluid Dynamics)**

La dinámica de fluidos computacional es el campo de estudio dedicado a solucionar con computadora las ecuaciones del flujo de fluidos. Se emplean simulaciones CFD para obtener detalles acerca del campo de flujo, como los esfuerzos de cortante, líneas de corriente, velocidades y coeficientes de presión por mencionar algunos (ver figura 1.6).

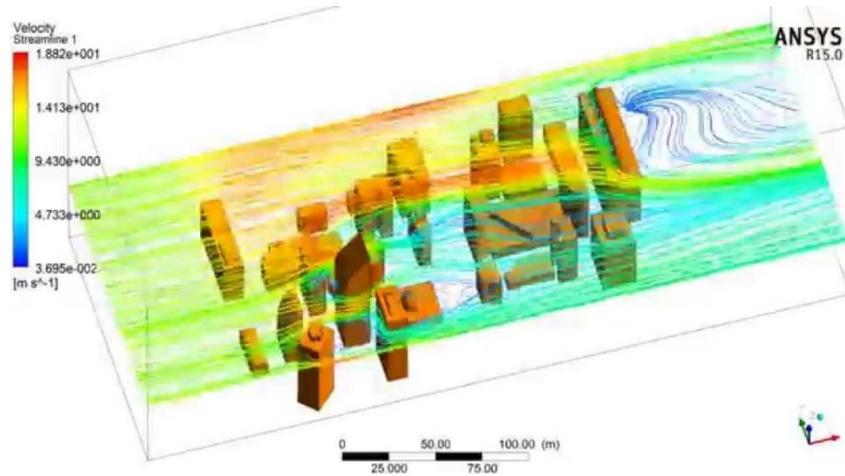


Figura 1.6 Ejemplo del flujo de viento a través de edificios mediante simulación CFD con ayuda del software ANSYS FLUENT. <https://bit.ly/2FTcl3V>.

- **Modelos de turbulencia Reynolds Averaged Navier – Stokes (RANS)**

Los modelos RANS se basan en el promedio de las ecuaciones de fluido, para lo cual todas las magnitudes se sustituyen por la suma de su valor medio y una componente fluctuacional. Después de promediarlas se obtienen términos adicionales que requieren la consideración de otras ecuaciones para cerrar el sistema.

Existen diferentes modelos de turbulencia RANS, siendo los más conocidos el modelo  $\kappa - \epsilon$  y el modelo  $\kappa - \omega$ . Para las simulaciones del actual trabajo se usará el modelo de turbulencia RANS  $\kappa - \epsilon$  standard.

El modelo  $\kappa - \epsilon$  incorpora dos ecuaciones de balance en derivadas parciales en las que se relacionan la energía cinética del fluido turbulento  $\kappa$  y su velocidad de disipación  $\epsilon$  con el sistema de ecuaciones del fluido.

## CAPÍTULO 2. MÉTODOS DE ANÁLISIS Y CRITERIOS PARA DISEÑO POR VIENTO DE ESTRUCTURAS DE EDIFICACIÓN

Los reglamentos y manuales de diseño por viento que existen se caracterizan por ser un medio en el que se unifican criterios respecto a determinadas materias y en el que se hace uso de un lenguaje común. Tienen como propósito garantizar la seguridad física y estructural, la habitabilidad, la durabilidad y calidad necesaria para cumplir con la estabilidad aeroelástica y los estados límite de resistencia y servicio, desplazamientos y aceleraciones que se mencionan en dichos documentos.

El estudio del comportamiento del viento y su impacto ha tomado demasiada importancia en el diseño de las estructuras capaces de resistir las acciones del viento. La importancia de considerar las acciones del viento surge principalmente a partir de la necesidad creciente de construir obras de tamaño considerable, tales como puentes colgantes de grandes longitudes, edificios altos y esbeltos para uso habitacional u oficinas y naves industriales de grandes claros. Las estructuras antes mencionadas suelen ser muy sensibles a los efectos generados por el viento y son las que más se han visto afectadas en las catástrofes producidas por altas velocidades del flujo del viento.

En el Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento, de la CFE (MDOCDV, 2008), se presentan dos métodos de análisis para evaluar las fuerzas inducidas por el viento, el primer método analítico es el **análisis estático** que se aplica a estructuras o elementos estructurales suficientemente rígidos (Tipo 1). Para los tipos restantes, debe utilizarse el segundo método analítico conocido como **análisis dinámico**.

Existe un tercer tipo de procedimiento para evaluar la acción del viento sobre las estructuras, y se recomienda consultar a un experto en la materia. Este método recurre a pruebas experimentales de modelos de túnel de viento.

### 2.1 Acciones del viento que deben considerarse

A continuación, se mencionan las acciones del viento que se deben considerar para el diseño, según el tipo de construcción (MDOC DV, 2008).

**ACCIÓN I** – Empujes estáticos: Causados por presiones y succiones del flujo medio del viento, tanto exteriores como interiores. Se considera que no varían con el tiempo.

**ACCIÓN II** – Vibraciones generadas por ráfagas turbulentas en la dirección del viento: las generan fuerzas variables, paralelas al flujo medio, causadas por la turbulencia del viento y cuya fluctuación en el tiempo influye en la respuesta estructural.

**ACCIÓN III** – Vibraciones transversales al flujo y torsión: la obstrucción de estructuras cilíndricas o prismáticas dentro del flujo de viento genera el desprendimiento de vórtices alternantes que provocan fuerzas y vibraciones transversales a la dirección del flujo. Es posible que se presenten fuerzas de torsión debido a la distribución asimétrica de presiones.

**ACCIÓN IV** – Inestabilidad aerodinámica: generada por la amplificación dinámica de la respuesta estructural causadas por: la geometría de la construcción, los distintos ángulos de incidencia del viento y las propiedades dinámicas de la estructura.

Por otro lado, para construcciones que resultan sensibles a los efectos dinámicos del viento, se recomienda que su análisis se base en los resultados obtenidos de las pruebas de prototipos o de modelos de túnel de viento.

## 2.2 Procedimientos para evaluar las acciones generadas por viento

Los procedimientos habituales para evaluar las acciones de viento se basan en obtener las presiones y fuerzas actuantes sobre la estructura mediante una serie de pasos que se describen de manera detallada en el Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento de la CFE, (MDOC DV, 2008). En ambos procedimientos, tanto el análisis estático como dinámico, se debe obtener la velocidad básica de diseño con la que se procede a realizar el análisis correspondiente.

La velocidad básica de diseño,  $V_D$ , es la velocidad del flujo de viento con la que se diseñará la estructura. Esta velocidad depende de la topografía del terreno, la categoría del terreno según su rugosidad y la velocidad regional en donde se encuentra ubicada nuestra estructura a analizar.

A continuación, se describen las variables involucradas en la obtención de la velocidad básica de diseño,  $V_D$ .

### 2.3 Velocidad básica de diseño, $V_D$

La velocidad básica de diseño,  $V_D$ , es la velocidad a partir de la cual se calculan los efectos del viento sobre la estructura o sobre un componente de esta. Se obtiene con la siguiente ecuación:

$$V_D = F_T F_{r_z} V_R$$

*Ecuación 2-1*

donde:

$F_T$	Factor que depende de la topografía local, adimensional.
$F_{r_z}$	Factor que toma en cuenta el efecto de las características de exposición local, adimensional.
$V_R$	Velocidad regional de ráfaga que le corresponde al sitio en donde se construirá la estructura, en km/h.

### 2.4 Velocidad regional, $V_R$

La velocidad regional de ráfaga para diseño se obtiene de dos maneras. La primera hace uso del enfoque tradicional para el diseño de estructuras, empleando la importancia de la estructura que está relacionada con un periodo de retorno fijo, como se indica en el inciso 2.4.1; y la segunda manera, utilizando un enfoque óptimo desde el punto de vista económico, que se asocia con el costo relativo aceptable de las consecuencias en caso de producirse una falla estructural.

La velocidad regional recomendada que se muestra en cada mapa de isotacas regionales se obtuvo bajo condiciones homogéneas preestablecidas: categoría del terreno 2 (ver tabla 4.2.1 del MDOC DV, CFE 2008), velocidades asociadas con ráfagas de 3 segundos y evaluadas a 10 m de altura del terreno.

### 2.4.1 Velocidad regional para un periodo de retorno fijo

La velocidad regional de ráfaga del viento,  $V_R$ , es la velocidad máxima que puede presentarse en un cierto periodo de retorno,  $T$ , en una zona o región determinada del país. (ver figuras 4.2.1 a 4.2.3 del MDOC DV, CFE 2008 en las que se muestran los mapas de isotacas regionales correspondientes a los periodos de retorno de 200 años para estructuras del Grupo A, de 50 años para estructuras del Grupo B y de 10 años para estructuras del Grupo C).

La velocidad regional de ráfaga,  $V_R$ , en km/h, se determina tomando en consideración tanto la importancia de la estructura como la localización geográfica de su sitio de desplante.

### 2.5 Factor de exposición, $F_{rz}$

El factor de exposición local,  $F_{rz}$ , establece la variación de la velocidad del viento con la altura en función de la categoría del terreno. Para obtener este factor se utilizan las siguientes expresiones:

$$F_{rz} = c \quad \text{si} \quad z \leq 10 \quad \text{Ecuación 2-2}$$

$$F_{rz} = c \left( \frac{z}{10} \right)^\alpha \quad \text{si} \quad 10 < z < \delta \quad \text{Ecuación 2-3}$$

$$F_{rz} = c \left( \frac{\delta}{10} \right)^\alpha \quad \text{si} \quad z \geq \delta \quad \text{Ecuación 2-4}$$

donde:

- $z$  es la altura por encima del terreno natural, a la cual se desea conocer la velocidad de diseño, en m.
- $\alpha$  exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura, adimensional.
- $\delta$  altura medida a partir del nivel del terreno de desplante, por encima de la cual la variación de la velocidad del viento no es importante y puede suponerse constante; a esta altura se le conoce como altura gradiente, en m.
- $c$  coeficiente de escala de rugosidad, adimensional.

Las variables  $\alpha$ ,  $\delta$  y  $c$  están en función de la rugosidad del terreno, los valores recomendados se presentan en la tabla 4.4.3 del MDOC DV, 2008.

## 2.6 Factor de topografía, $F_T$

Este factor toma en cuenta el efecto topográfico local del sitio en donde se desplantará la estructura. De acuerdo con las características topográficas del sitio, en la tabla 2.1 se presentan los valores para determinar el valor del factor de topografía.

Tabla 2.1 Factor de topografía local,  $F_T$  (MDOC DV, 2008).

Sitios	Ejemplos de topografía local	$F_T$
Protegidos	Valles cerrados	0.9
Normales	Terreno prácticamente plano: Campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores de 5%.	1.0
Expuestos	Promontorios: Montes, cerros, lomas, cimas, colinas, montañas.	Véanse las ecuaciones (2.6) a (2.8)
	Terraplenes: Peñascos, acantilados, precipicios, diques, presas.	

Nota: Para más información consultar Tabla 4.2.4 del MDOC DV 2008 de la CFE.

## 2.7 Presión dinámica de base, $q_z$

Cuando el viento actúa sobre una construcción, genera presiones sobre sus superficies. Estas presiones varían según la intensidad de la velocidad y la dirección del viento. La presión que ejerce el flujo del viento sobre una superficie plana perpendicular a él, se denomina presión dinámica de base y se determina con la siguiente ecuación:

$$q_z = 0.047 G V_D^2 \text{ (Pa)}$$

$$q_z = 0.0048 G V_D^2 \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

Ecuación 2-5

donde:

$V_D$  Velocidad básica de diseño (km/h).

$q_z$  Presión dinámica de base (kg/m<sup>2</sup>).

$G$  Factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar, adimensional.

El valor de  $G$  se obtiene de la siguiente expresión:

$$G = \frac{0.392 \Omega}{273 + \tau}$$

*Ecuación 2-6*

donde:

$\Omega$  Presión barométrica, en mm de Hg.

$\tau$  Temperatura ambiental, en °C.

En la tabla 2.2 se presenta la relación entre los valores de la altitud,  $h_m$ , en metros sobre el nivel del mar (msnm), y la presión barométrica,  $\Omega$ , en mm de Hg.

*Tabla 2.2. Relación entre la altitud y la presión barométrica.*

Altitud, $h_m$ (msnm)	Presión barométrica, $\Omega$ (mm de Hg)
0	760
500	720
1000	675
1500	635
2000	600
2500	565
3000	530
3500	495

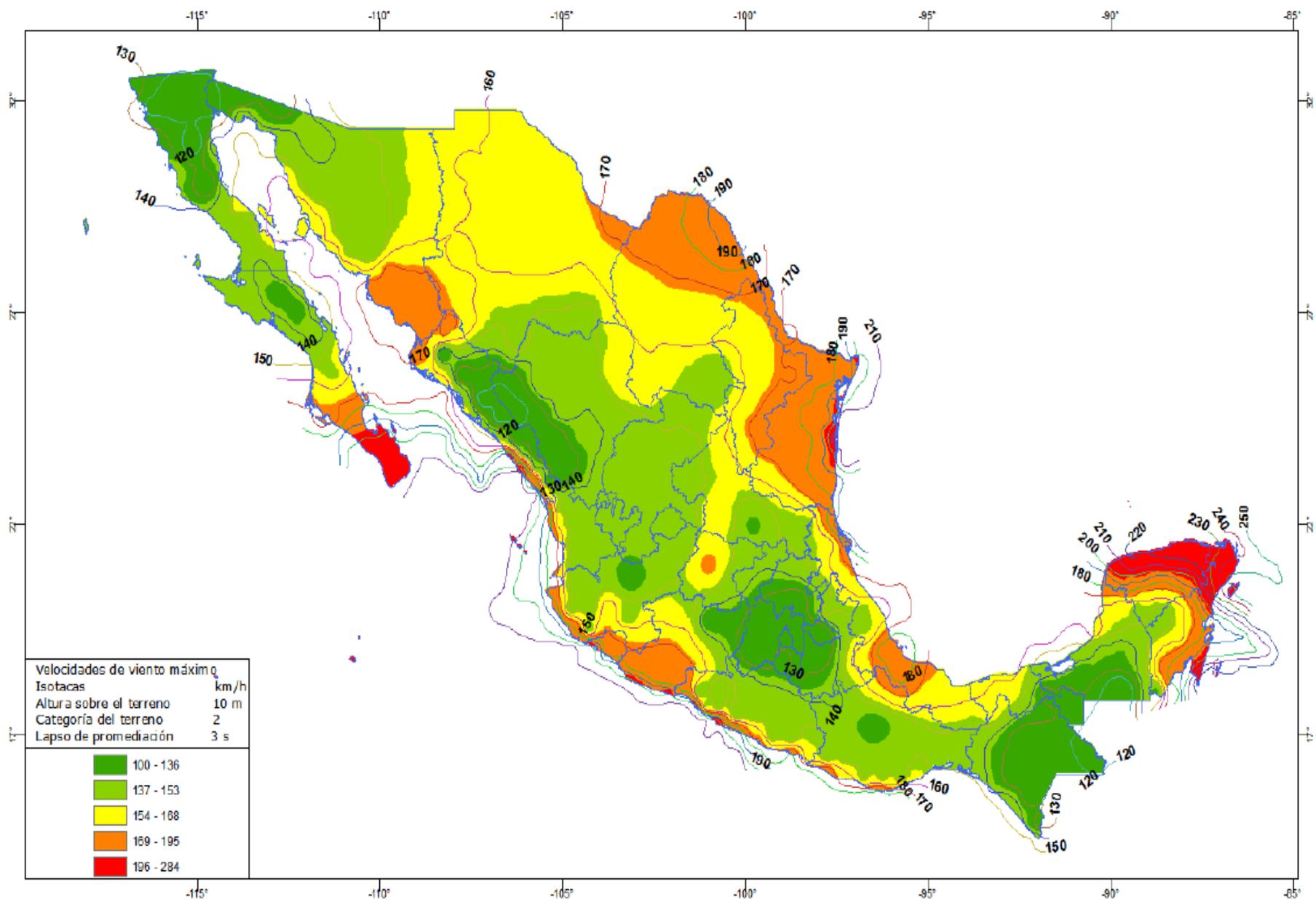


Figura 4.2.1 Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 200 años.

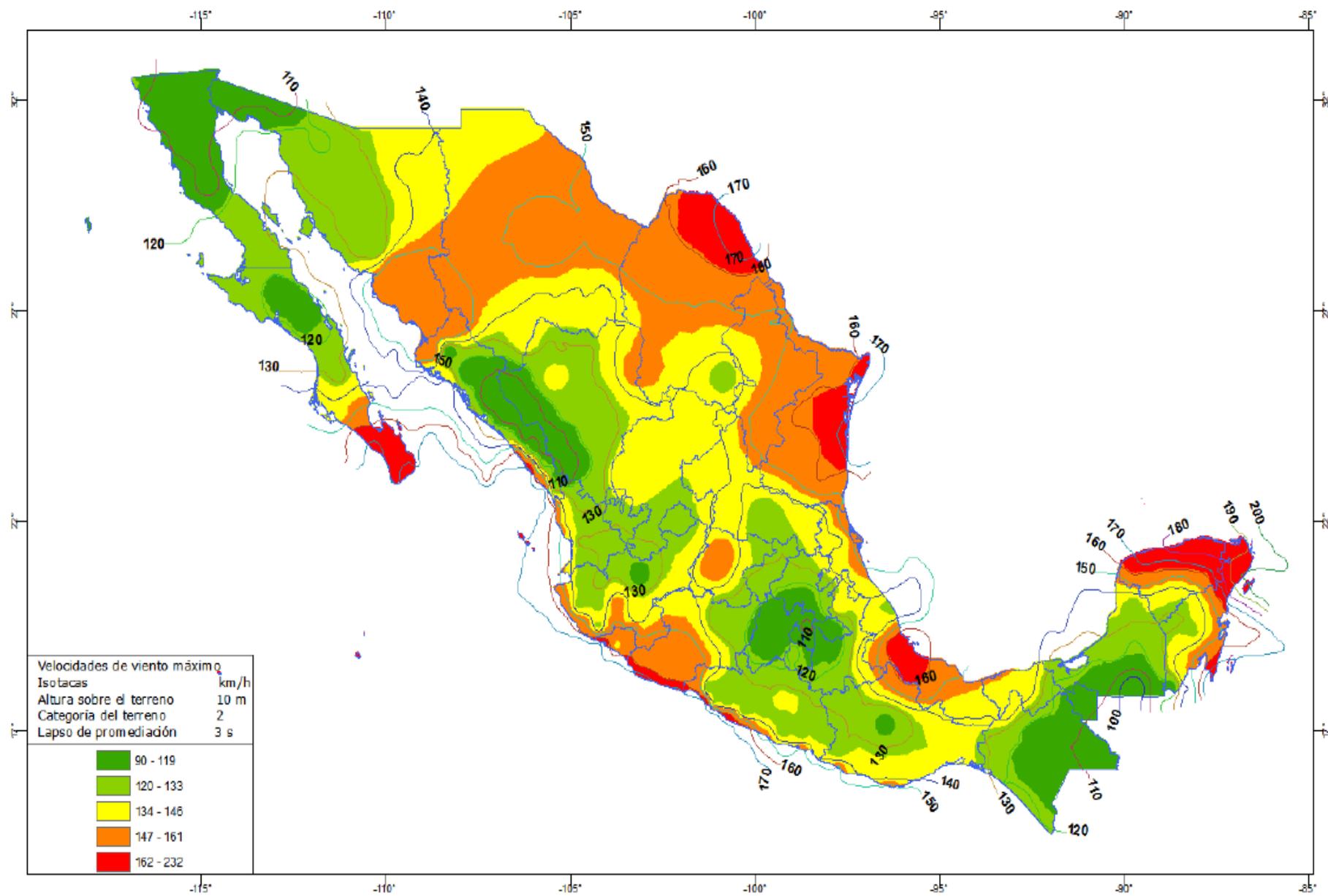


Figura 4.2.2 Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 50 años.

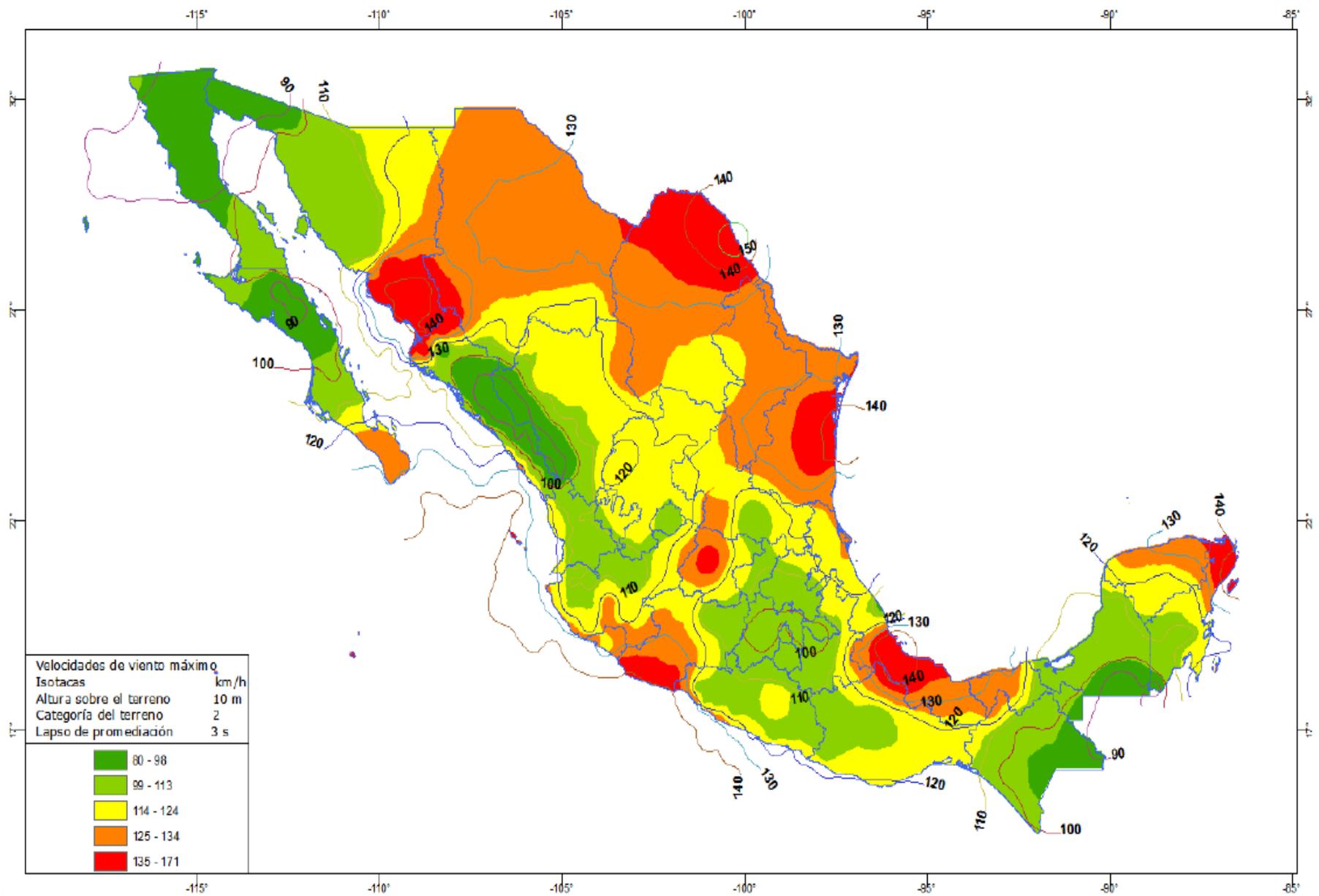


Figura 4.2.3 Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 10 años.

## 2.8 Coeficiente de presión, $C_p$

El coeficiente de presión se define como la relación de la presión actuante sobre la construcción o sobre una de sus superficies, con la presión dinámica base, para una altura dada. Este coeficiente determina el efecto de la variación de la presión, según la geometría o forma de construcción, así como la intensidad de la velocidad y la turbulencia del flujo del viento.

$$C_p = \frac{p_z}{q_z}$$

*Ecuación 2-7*

donde:

$p_z$  Presión actuante sobre una construcción determinada (Pa).

$q_z$  Presión dinámica de base ( $\text{kg/m}^2$ ).

De acuerdo con su aplicación, los coeficientes de presión se dividen en los siguientes tipos:

- Coeficientes de presión sobre superficies, determinan las presiones exteriores o interiores (empuje o succión).
- Coeficientes de arrastre sobre un cuerpo, determinan la fuerza de arrastre sobre construcciones o elementos estructurales.
- Coeficientes de presión neta sobre superficies, determinan el efecto combinado de empujes y succiones para evaluar las fuerzas resultantes.
- Coeficientes de fuerza sobre cuerpos, determinan las fuerzas generales (fuerzas o momentos) sobre un cuerpo.
- Coeficientes de presión local sobre superficies, determinan el efecto local pico de las presiones en zonas críticas de las construcciones.

## 2.9 Fuerza actuante en estructuras

La respuesta estructural, ante la acción del viento, se puede dividir en tres tipos de respuesta diferente:

- Respuesta estática, que ocurre en estructuras no sensibles a efectos dinámicos con frecuencias naturales de vibración considerablemente mayores que el intervalo de las frecuencias de la turbulencia.
- Respuesta dinámica, ocurre en estructuras sensibles a los efectos dinámicos, con una o más frecuencias naturales dentro del intervalo de las frecuencias de la turbulencia.
- Respuesta aeroelástica, ocurre cuando la respuesta estructural interactúa con la generación de las cargas del viento, produciendo fenómenos de inestabilidad aeroelástica.

Por tratarse de modelos considerados como infinitamente rígidos, en este trabajo de tesis solo se considerará la respuesta estática de los modelos, relacionadas con las presiones y succiones del flujo medio del viento, tanto exteriores como interiores que generan presiones globales y locales. Se considera que estos empujes no varían con el tiempo.

## 2.10 Método de análisis estático

El análisis estático se aplica en el diseño de construcciones y elementos estructurales que pertenecen al Tipo 1, así como en elementos de recubrimiento y anclajes que se emplean en las construcciones Tipo 1, 2 y 3, cuando sean poco sensibles a la acción turbulenta del viento.

Las fuerzas producidas por la interacción del viento y la respuesta estructural se determinan considerando la respuesta estática o dinámica que se presente.

La fuerza estática se calculará con la siguiente expresión:

$$F_{es} = \sum (q_z C_p A_{ref})$$

*Ecuación 2-8*

donde:

- $q_z$  Presión dinámica de base, en Pa, sobre una superficie de referencia,  $A_{ref}$ , a una altura  $z$ .
- $C_p$  Coeficiente de presión, adimensional, actuando sobre una construcción o un área de ésta.
- $A_{ref}$  Área de referencia, en  $m^2$ , sobre la que actúa la presión.

## 2.11 Presión actuante sobre estructuras, $p_z$

La presión actuante sobre la estructura,  $p_z$ , en Pa, se obtiene con la ecuación:

$$p_z = C_p q_z$$

*Ecuación 2-9*

donde:

- $C_p$  Coeficiente de presión que depende de la forma de la estructura, adimensional.
- $q_z$  Presión dinámica de base, en Pa, a una altura  $z$  sobre el nivel del terreno.

## 2.12 Métodos experimentales en Túnel de Viento

Los métodos experimentales fueron primeramente desarrollados para estudiar problemas en el campo de la aeronáutica y posteriormente para el estudio práctico de las estructuras localizadas en la capa atmosférica más cercana a la superficie de la tierra ante la interacción con el flujo de viento. En la actualidad, se desarrollan un gran número de pruebas en túneles de viento que simulan el flujo atmosférico.

Las pruebas en túnel de viento tienen como objetivo reproducir físicamente el comportamiento dinámico de la estructura y simular las características de su entorno, para realizar este tipo de simulaciones es necesaria la participación de especialistas en la materia, pues las simulaciones se desarrollan a una escala geométrica reducida por cuestiones económicas y por conveniencia. Al hablar de escala es necesario considerar aquellas características que ayudarán a obtener una similitud física del objeto a analizar;

estas características no son solo aplicadas al modelo (puente, edificio o estructura) sino también son aplicables en el desarrollo del flujo de viento.

La semejanza entre el modelo y el prototipo se logra reproduciendo a escala las características del flujo atmosférico que afecta a la estructura en estudio y para lograr esto, es necesario incluir lo siguiente:

- La variación de la velocidad media del viento con la altura.
- La variación de las intensidades de turbulencia y las escalas integrales con la altura.
- El espectro de turbulencia y espectro-transversal (“cross-spectra”) a lo largo del flujo y transversalmente al viento y direcciones verticales.

## CAPÍTULO 3. AERODINÁMICA EN LA INGENIERÍA CIVIL

La aerodinámica civil es la rama de la aerodinámica que se encarga de estudiar el efecto del viento en estructuras y construcciones de la Ingeniería Civil. Para estimar las cargas aerodinámicas sobre estas estructuras se dispone de normativas, códigos o recomendaciones de cálculo que permiten evaluar con confiabilidad las distribuciones de presión y las cargas globales sobre las distintas estructuras.

### 3.1 Aspectos generales del viento

El viento es considerado como el movimiento de las masas de aire, el cual es consecuencia de la diferencia de presión atmosférica entre dos puntos, las fuerzas de desviación producto de la rotación de la tierra, lo que se le conoce como fuerza de Coriolis y las fuerzas centrífugas debidas a la curvatura de la trayectoria del viento. La diferencia de presión se debe a la diferencia de temperatura en dos puntos, a su vez, la diferencia de temperatura produce una diferencia de densidades en el aire provocando que el aire se mueva para compensarlo buscando un equilibrio.

### 3.2 Variación de la velocidad del viento con la altura

La variación de la velocidad del viento con respecto a la altura se define con base en una velocidad de referencia registrada a 10 m de altura, a la cual se colocan instrumentos de medición de velocidades de viento, conocidos como anemómetros. Para establecer un perfil de velocidad del viento con respecto a la altura se toma como velocidad base la medida por los anemómetros. En la Ingeniería de Viento es muy común emplear la función de potencia o ley logarítmica para representar el perfil de velocidad del viento.

La altura gradiente es la altura a la cual la influencia de la fricción debida al terreno o a construcciones aledañas es nula. A esta altura, el aire se mueve únicamente por la influencia de la presión gradiente, es decir, las partículas de aire circulan de una zona de alta presión hacia una zona de baja presión para compensar las diferencias de presión.

### 3.3 Capa Límite

En un flujo a través de un obstáculo existe una zona cercana al cuerpo en la que los efectos viscosos e inerciales son dominantes. A esta zona delgada se le conoce como capa límite y se puede presentar tanto flujo laminar como turbulento. El número de Reynolds,  $Re$ , es usado como un parámetro adecuado para caracterizar los flujos dentro de la capa límite. En la región fuera de la capa límite los efectos viscosos son despreciables y el flujo puede analizarse como no viscoso, como se muestra en la figura 3.1.

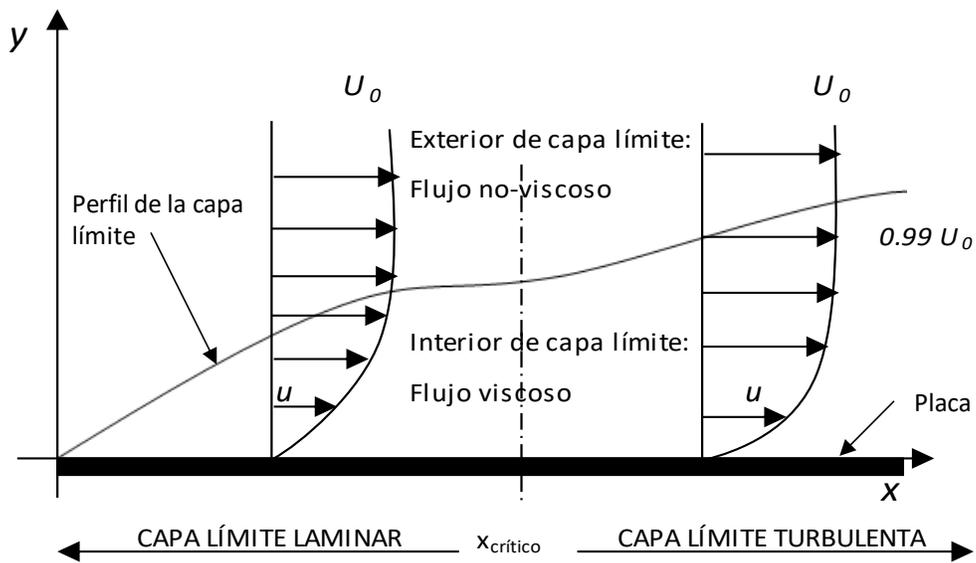


Figura 3.1. Representación de la capa límite.

En la figura 3.1 se presenta esquemáticamente el crecimiento de flujo a través de la capa límite sobre una placa plana. En un inicio se presenta una región laminar a lo largo de una distancia corta y posteriormente llega a un punto crítico o de transición, para después pasar a una región turbulenta de la capa límite. El espesor de la capa límite se puede definir como la distancia perpendicular desde la superficie hasta el punto donde la velocidad del flujo es igual al 99% de la velocidad de corriente libre ( $0.99U$ ).

### 3.4 Capa Límite Atmosférica

La estructura de la Capa Límite Atmosférica (CLA) está constituida, de manera general, por dos regiones, una región interna y una externa. En la región externa, el flujo depende muy poco de la naturaleza de la superficie, mientras que la fuerza de Coriolis debida a la rotación de la tierra puede ser importante. En la capa interna, conocida también como capa superficial, el flujo es altamente dependiente de las características de la superficie y se ve poco afectado por los efectos de rotación.

En la CLA se considera que el flujo es completamente turbulento, de manera que, en cualquier punto de ella, se observan típicamente variaciones bruscas en el valor de la velocidad, la presión, la temperatura o la humedad del aire. Efectos como la fricción superficial, el calentamiento del suelo y la evaporación se transmite a toda la CLA de forma rápida y eficiente, como consecuencia del mecanismo de mezcla turbulenta.

La CLA abarca solo una fracción de la atmosfera, su espesor se encuentra típicamente entre 0 a 30 m hasta 3,000 m (ver figura 3.2), dependiendo de varios factores como el calentamiento del suelo, la fuerza del viento, la rugosidad del terreno, entre otros.

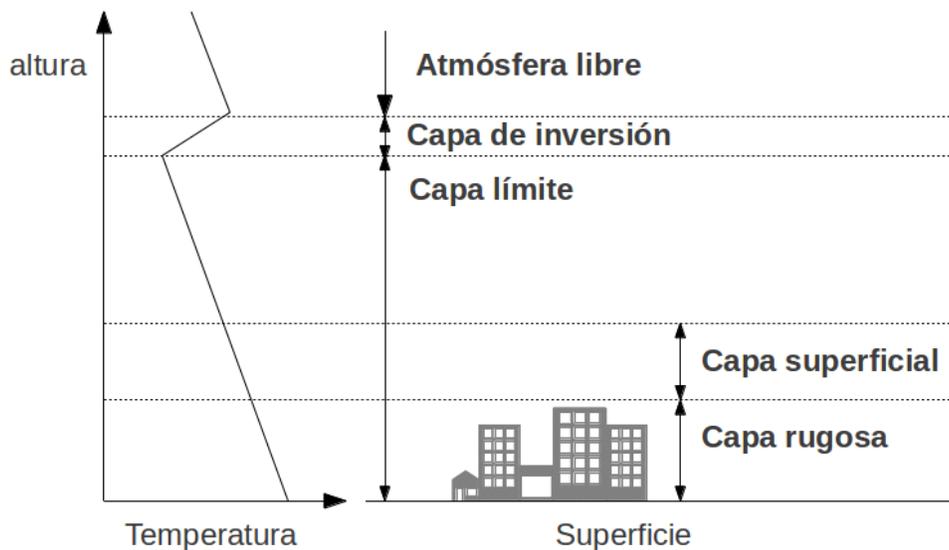


Figura 3.2. Esquema de la capa límite atmosférica, el espesor de la CLA varía entre 0 a 30 m y hasta 3,000 m. <https://bit.ly/3rIKdHj>.

### 3.5 Perfil vertical de velocidad del viento

Al estudiar el viento que fluye a través de las estructuras civiles es necesario identificar la porción de la atmosfera en donde existe una alta interacción de flujo de calor, de humedad y de momento entre la atmosfera y la superficie. Es en la parte inferior de la capa límite atmosférica donde ocurre lo anterior y se le conoce como capa atmosférica superficial, varía entre 0 a 60 m hasta 100 m de altura sobre la superficie del suelo, agua o hielo. En esta capa es donde los modelos de perfil vertical de velocidad del viento son válidos.

Se define como perfil vertical de velocidad del viento (ecuación 3.1) a la representación del comportamiento de la velocidad del viento con la altura, donde la velocidad del viento tiende a incrementarse a medida que asciende y la superficie terrestre ejerce una acción de fricción o de retardo sobre la velocidad del viento. El perfil del viento es expresado mediante fórmulas matemáticas, como los modelos exponencial y logarítmico del viento (modelos empíricos).

En perfiles de viento donde existan superficies más irregulares o rugosas se presentará una mayor influencia de fricción sobre la velocidad del viento que en las superficies lisas. A elevaciones superiores cercanas a los 1,000 m, la influencia de la superficie se considera nula y el viento se comporta como un viento geostrófico, es decir, que no lo afecta la fuerza de fricción que ejerce la superficie de la tierra, y por ello, estos vientos fluyen paralelos a las isobaras y a gran velocidad.

Los modelos logarítmico y exponencial son adecuados en condición de estabilidad atmosférica neutra, es decir, cuando la temperatura de la superficie del suelo no difiere significativamente de la temperatura del aire y no hay movimientos convectivos característicos de la atmosfera inestable.

#### 3.5.1 Fórmula exponencial del perfil vertical del viento

La función exponencial del perfil vertical del viento se representa como:

$$U_z = V_{ref} \left( \frac{Z}{Z_{ref}} \right)^\alpha$$

*Ecuación 3-1*

donde:

$\alpha$                     exponente de rugosidad (*wind shear exponent* o exponente de Hellmann).

$U_z$	velocidad del viento a estimar a una altura $Z$ sobre el nivel del suelo, en m/s.
$V_{ref}$	velocidad de referencia, en m/s, velocidad del viento observada a una altura preestablecida denominada altura de referencia, $Z_{ref}$ , generalmente se emplea una altura de 10 m.

En la tabla 3.1 se muestran los exponentes de rugosidad ( $\alpha$ ) o exponente de Hellmann en función de la rugosidad del terreno.

Tabla 3.1. Valores del exponente de Hellmann en función de la rugosidad del terreno.

Tipo de terreno	Valor de $\alpha$
Lugares llanos con hielo o hierba	0.08 a 0.12
Lugares llanos (mar, costa)	0.14
Terrenos poco accidentados	0.13 a 0.16
Zonas rústicas	0.2
Terrenos accidentados o bosques	0.2 a 0.26
Terrenos muy accidentados y ciudades	0.25 a 0.4

### 3.5.2 Fórmula logarítmica del perfil del viento

Baldocchi (2010) describe los modelos de perfil del viento como “una función logarítmica de la relación entre la altura y la rugosidad de la superficie y es proporcional a la transferencia de movimiento cuantificada por la velocidad de fricción”.

La función logarítmica del perfil vertical del viento se representa como:

$$U_z = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{Z}{Z_0} \right)$$

Ecuación 3-2

donde:

- $U_z$  velocidad del viento en m/s a estimar en la altura  $Z$ , en m, y en condiciones de estabilidad neutra
- $Z_0$  altura de rugosidad en m (o rugosidad aerodinámica).
- $k$  constante adimensional de Von Karman, que suele ser igual 0.41.
- $u_*$  velocidad de fricción (*wind shear velocity*, velocidad dinámica) en m/s. Altos valores de  $u_*$  indican alta turbulencia.

Si se conoce una velocidad del viento a una altura,  $Z_{ref}$ , el perfil se calcula en función de  $V_z$  y  $Z_0$ , ya que  $u_*$  se estima por:

$$u_* = V_z \frac{k}{\ln\left(\frac{Z_{ref}}{Z_0}\right)}$$

*Ecuación 3-3*

La altura de rugosidad,  $Z_0$ , es la altura desde el suelo donde la velocidad del viento es teóricamente cero y varía desde 0.0001 m en superficies acuáticas hasta más de 2 metros. En la tabla 3.2 se muestra la clasificación de la rugosidad ( $Z_0$ ) de Davenport.

Tabla 3.2. Clasificación de la rugosidad de Davenport revisada por Wieringa.

Clases	Rugosidad $Z_0$ , en m	Rasgos del paisaje
Sup. Acuáticas	0.0002	Aguas abiertas (mar, lago, embalse, nieve sobre terreno plano, desiertos, concreto), varios km sin obstáculos desde el sitio de medición del viento.
Suave	0.005	Superficie sin obstáculo notable y sin vegetación: playas, hielo, pantanos.
Abierto	0.03	Terreno llano con gramíneas o muy poca vegetación. Obstáculos aislados con separación de al menos 50 veces la altura, h.
Aprox. Abierto	0.10	Área cultivada o natural con cobertura vegetal baja. Obstáculos ocasionales (edificaciones o árboles) con distancia de al menos 20h el obstáculo.
Rugoso	0.25	Área natural o cultivada con cultivos altos, obstáculos porosos escasos separados por 12h o 15h, o con objetos sólidos, (edificaciones) con distancia de 8h a 12h.
Muy rugoso	0.50	Zona de cultivos intensos con obstáculos en grupos (granjas, bosque, etc.), separados por 8h; plantaciones, frutales, bosques jóvenes, zonas urbanas de baja altura con separación de 3 a 4 edificaciones y sin árboles altos.
Skimming	1.00	Zonas con obstáculos altos de altura similar y separación de igual distancia que la altura, como bosques adultos y zonas urbanas densas.
Caótico	=2.0	Centros de las ciudades con mezcla de edificaciones de alturas diversas, bosques de altura irregular con zonas deforestadas.

### 3.6 Ecuaciones gobernantes de un fluido en movimiento

Las ecuaciones gobernantes que rigen un flujo se obtienen aplicando las leyes de conservación:

- Conservación de la masa de un fluido.
- Conservación de la cantidad de movimiento.
- El cambio de momento es igual a la suma de las fuerzas de una partícula de fluido (segunda ley de Newton).
- El cambio de energía es igual a la suma del calor adicionado y el trabajo realizado en una partícula de fluido (primera ley de la termodinámica).

En el análisis del flujo de fluidos en escalas macroscópicas, el fluido se considera como un medio continuo y se puede ignorar la estructura molecular de la materia y los movimientos moleculares. El comportamiento del fluido se describe en términos de propiedades macroscópicas como velocidad, presión, densidad y temperatura, y sus derivadas en espacio y tiempo. El elemento del fluido más pequeño será una partícula o un punto en el fluido (ver figura 3.3).

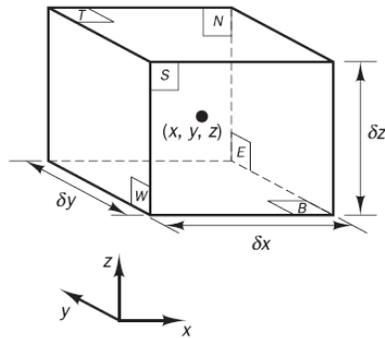


Figura 3.3. Elemento diferencial de fluido.

Las propiedades del fluido se encuentran en función del espacio y tiempo, por lo que se utilizan las siguientes variables:  $\rho(x, y, z, t)$ ,  $p(x, y, z, t)$ ,  $T(x, y, z, t)$  y  $u(x, y, z, t)$ .

donde:

$\rho$  = Densidad.

$p$  = Presión.

$T$  = Temperatura.

$u$  = Vector de velocidad.

### 3.7 Ecuaciones de Navier – Stokes

Las formas más útiles de las ecuaciones de conservación para flujos de fluidos se obtienen mediante la introducción de un modelo adecuado para las tensiones viscosas  $\tau_{ij}$ . En la mayoría de los flujos de fluidos, las tensiones viscosas se pueden expresar como funciones de la velocidad de deformación local. En flujos tridimensionales, la tasa de deformación local se compone de la tasa de deformación lineal y la tasa de deformación volumétrica.

En un fluido Newtoniano, los esfuerzos viscosos son proporcionales a la tasa de deformación. La Ley de Newton de viscosidad para flujos incompresibles en tres dimensiones involucra dos constantes de proporcionalidad: la viscosidad dinámica, ( $\mu$ ), que relaciona los esfuerzos con las deformaciones lineales y la segunda viscosidad, ( $\lambda$ ), que relaciona los esfuerzos con la deformación volumétrica. Las nueve componentes de los esfuerzos viscosos son:

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} u & \tau_{yy} &= 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \operatorname{div} u & \tau_{zz} &= 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \operatorname{div} u \\ \tau_{xy} &= \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \tau_{yx} &= \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \tau_{xz} &= \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \tau_{zx} &= \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & \tau_{zy} &= \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & \tau_{yz} &= \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

*Ecuaciones 3-4*

Para efectos prácticos, el valor de la segunda viscosidad, ( $\lambda$ ), es despreciable. Sustituyendo los esfuerzos cortantes (ecuaciones 3.4) en las ecuaciones de cantidad de movimiento en forma diferencial se obtienen las ecuaciones de Navier – Stokes, las que se utilizan en el desarrollo del método de volumen finito.

$$\begin{aligned} \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{du}{dt} \\ \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dv}{dt} \\ \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dw}{dt} \end{aligned}$$

*Ecuaciones 3-5*

Éstas son las ecuaciones de Navier – Stokes para flujos incompresibles, llamadas así en honor a C.L.M.H. Navier (1785-1836) y Sir George G. Stokes (1819-1903), que fueron los primeros en deducirlas. Son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales no lineales de segundo orden.

Las ecuaciones de Navier – Stokes tienen cuatro incógnitas:  $p$ ,  $u$ ,  $v$  y  $w$ . Deben de combinarse con la ecuación de la continuidad para flujos incompresibles para tener una cuarta ecuación y poder resolverlas.

Aunque solo se conoce un número limitado de soluciones analíticas de las ecuaciones de Navier – Stokes, estas ecuaciones se pueden discretizar en mallas finas para simular el comportamiento de los fluidos usando un ordenador. En la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se pueden obtener resultados aproximados, pero realistas, del comportamiento de los fluidos, como se verá más adelante.

## CAPÍTULO 4. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) EN LA INGENIERÍA CIVIL

*“La dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD) se ha convertido en una herramienta útil en el análisis de sistemas de interés práctico, que incluyen fenómenos físicos y químicos involucrados con el movimiento de fluidos; con tales fenómenos se puede transferir masa, cantidad de movimiento, energía y especie química (que puede reaccionar o no) de una región a otra, o de un tiempo inicial a otro tiempo. Este auge se ha debido en parte, a que cada día se tienen equipos de cómputo cada vez más grandes en capacidad (memoria y rapidez) y con menor costo, así como de algoritmos y modelos que pueden representar de manera confiable los fenómenos presentes en el flujo de fluidos del sistema a analizar. Además, de que el análisis con esta herramienta puede ser más económico que el trabajo experimental, tanto en tiempo como en recursos económicos. Sin embargo, su uso sigue siendo mayoritariamente complementario, ya que, en determinado momento, se tiene que validar las predicciones con datos experimentales o hacer una verificación con datos de correlaciones, ya que no siempre se puede tener mediciones detalladas de parámetros físicos y químicos del sistema.”*

Dr. Salinas Martín y Dr. Vicente William,

Investigadores del Instituto de Ingeniería de la UNAM

### 4.1 Aplicaciones de la dinámica de fluidos computacional

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés), es un campo de estudio de la dinámica de fluidos que se encarga de analizar numéricamente aquellos sistemas que involucran el movimiento de fluidos, transferencia de calor y otros fenómenos, mediante la solución de distintas ecuaciones de flujo y algoritmos computacionales.

En muchas ocasiones, las simulaciones realizadas mediante CFD se calibran con resultados obtenidos de análisis experimentales, es decir, se complementan entre sí. Por ejemplo, algunas propiedades globales, como desplazamientos, fuerzas de arrastre, caída de presión o potencia y sustentación, son obtenidas mediante análisis experimentales; y con ayuda de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se obtienen detalles acerca del campo de flujo, como los esfuerzos de corte, velocidad, perfiles de presión y líneas de corriente.

La Dinámica de Fluidos Computacional tiene un amplio campo de aplicaciones entre las que destacan:

- Aerodinámica – aviones y automóviles.
- Hidrodinámica de embarcaciones.
- Motores.
- Turbomáquinas – bombas y turbinas.
- Transferencia de calor – sistemas de calentamiento o enfriamiento.
- Combustión.
- Ingeniería de procesos – mezclas y reacciones químicas.
- Cargas de viento – fuerzas y respuesta dinámica de estructuras.
- Ingeniería medioambiental – transporte de efluentes líquidos y gaseosos.
- Ingeniería costera – cargas en estructuras costeras y “offshore”.
- Hidráulica – redes de tuberías, depósitos, canales y presas.
- Oceanografía – corrientes oceánicas y maremotos.
- Meteorología – predicción numérica del tiempo.
- Ingeniería biomédica – flujo de la sangre en el corazón, venas y arterias.
- Electrónica – refrigeración de circuitos.

Algunas de las ventajas de CFD contra otras técnicas experimentales usadas en la industria para el diseño de sistemas de flujo son:

- Los costos de inversión por licencias de software y el hardware requerido para CFD son altos, pero no se comparan con los de unas instalaciones para desarrollar estudios experimentales.
- Reducción en los tiempos de diseño y experimentación.
- Capacidad para estudiar sistemas donde es imposible realizar experimentos controlados.
- Capacidad para estudiar sistemas en situaciones de peligro o que excedan los límites de seguridad.
- Resultados con gran nivel de detalle.

Por otro lado, la CFD tiene ciertas desventajas (*Versteeg & Malalasekera, 2007*):

- Requiere computadoras con gran capacidad.
- Los operadores deben de tener experiencia y completo entendimiento del fenómeno.
- Las licencias de los simuladores son costosas.
- Tener gran sensibilidad al ingresar los parámetros de entrada.
- El flujo multifásico sigue siendo difícil de analizar.
- Requiere verificar los resultados en flujos complejos.

## 4.2 Componentes de una simulación CFD

Dentro de la interfaz de un software comercial de CFD se encuentran cinco componentes generales, que se consideran como básicos en el desarrollo de una simulación, los cuales se describen a continuación:

**Geometría:** En esta parte de la simulación se ingresa información básica relacionada con la geometría del modelo a simular, información como dimensiones de fronteras, modelo a analizar (edificio, puente, estructura, etc.), las fronteras del dominio, y las caras de entrada y salida del flujo de viento (inlet y outlet).

**Enmallado:** En esta parte se selecciona el dominio espacial y se divide en diminutos elementos de volumen o volúmenes de control (cubos, tetraedros, prismas rectangulares) conformando así las mallas.

**Configuración inicial:** En esta parte del proceso de simulación se pueden realizar configuraciones previas a la solución del modelo de análisis. Las propiedades del aire, dirección del flujo de viento, velocidad del flujo, rugosidad del terreno, perfiles de flujo, modelos de análisis de viento turbulento y condiciones de frontera son ingresadas en este apartado.

**Solver:** Para esta parte se ingresan las variables que se consideran dentro del análisis, también se indica al programa que genere graficas de comportamiento de cada una de las variables seleccionadas. En esta parte de la simulación se indica dónde va a ser el inicio de la simulación, usualmente se selecciona como punto de partida la frontera “inlet”. También, se configura todo lo relacionado a la solución de la simulación como la discretización espacial, control de límites y el monitoreo de los residuos.

**Resultados:** En esta parte del proceso de simulación se reportan los resultados obtenidos del proceso de solución, aquí se indica al programa que muestre vectores de velocidad, contornos de presión, líneas de flujo para un plano en especial y curvas de comportamiento

de las variables seleccionadas. También se puede ver de manera visual la interacción del flujo de viento a través del modelo analizado.

### 4.3 Proceso de un código CFD

Los códigos CFD están estructurados por algoritmos numéricos que pueden resolver los problemas de flujo. Todos los programas comerciales de CFD tienen una interfaz donde el usuario introduce los parámetros de entrada y posteriormente visualiza los resultados. El proceso consta de tres etapas principales:

#### ***Pre – proceso***

Las actividades que se realizan en esta etapa son:

- Definir la geometría de la región de interés (dominio computacional).
- Subdividir el dominio en subdominios (volúmenes de control).
- Elegir el fenómeno a modelar.
- Definir las propiedades del fluido.
- Especificar las condiciones de frontera apropiadas en los volúmenes de control que se encuentran en los límites del dominio.

La solución de un problema de flujo (velocidad, presión, temperatura, etc.) se encuentra definida en los nodos de cada celda, la precisión de esta solución depende del número de celdas en la malla. Al incrementar el número de celdas se incrementa el tiempo de cálculo y los requerimientos de capacidad del hardware.

Las mallas óptimas son aquellas que no son uniformes, siendo más finas en regiones donde existen grandes variaciones. Mas del 50% del tiempo en un proyecto CFD es invertido en la definición de la geometría de la zona de estudio y la generación de la malla.

#### ***Solución***

Existen tres clasificaciones de técnicas para la solución numérica: diferencias finitas, elemento finito y métodos espectrales. El método de volumen finito es una formulación especial derivada de las diferencias finitas, y es el de mayor uso en la mayoría de los códigos de CFD. En general, los algoritmos numéricos consisten en lo siguiente:

- Integración de las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluidos sobre todos los volúmenes de control del dominio.
- Conversión de las ecuaciones integrales resultantes en un sistema de ecuaciones algebraicas (discretización).
- Solución de las ecuaciones algebraicas mediante un proceso iterativo, ya que los fenómenos físicos analizados son complejos y resultan no lineales.

### ***Post – proceso***

La visualización de las soluciones numéricas usando vectores, curvas u otro tipo de gráficos es importante para la interpretación de los resultados, ya que es la manera más efectiva de analizar la enorme cantidad de información producto de los cálculos.

Debido a la capacidad gráfica de los equipos computacionales actuales, la visualización de los datos es más versátil, algunos softwares incluyen herramientas que permiten visualizar los resultados como:

- Gráficos de los vectores.
- El dominio de la geometría y el mallado.
- Gráficos de superficies en 2D y 3D.
- Trayectoria de la partícula.
- Vistas manipulables.
- Paleta de colores relacionada con los valores.
- Resultados animados para la visualización de datos dinámicos.

#### **4.4 Gráficos y resultados obtenidos de una simulación CFD**

Al realizar una simulación CFD se puede estudiar de manera visual el comportamiento del viento en comparación con una simulación en túnel de viento. En la actualidad, los distintos softwares de CFD ofrecen una interfaz muy cómoda que facilita obtener imágenes gráficas sobre el modelo de estudio. Entre los resultados que se pueden obtener de una simulación por computadora están:

- Vectores de velocidad.
- Contornos de presión.
- Líneas de Flujo.
- Perfil de Viento a la entrada.
- Gráficas de comportamiento de alguna variable (velocidad, presión, energía, etc.).
- Contornos de coeficientes de presión.
- Disipación de calor.

Además, el software permite personalizar colores, tamaño de vectores, modificar la leyenda de acotaciones, entre otros.

A manera de ejemplo y con el fin de entender mejor lo antes mencionado, en las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos después de realizar una simulación del flujo a través de un cubo de 6x6 m.

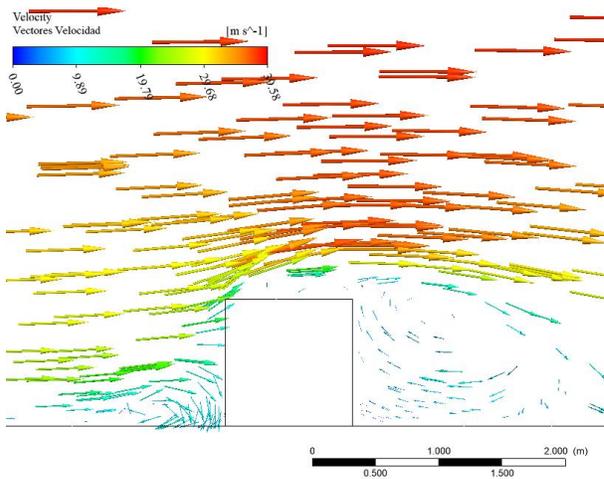


Figura 4.1. Vectores de velocidad en un cubo de 6x6 m.

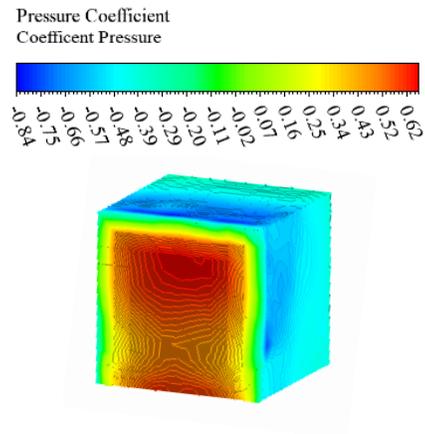


Figura 4.2. Contorno de presiones en un cubo de 6x6 m.

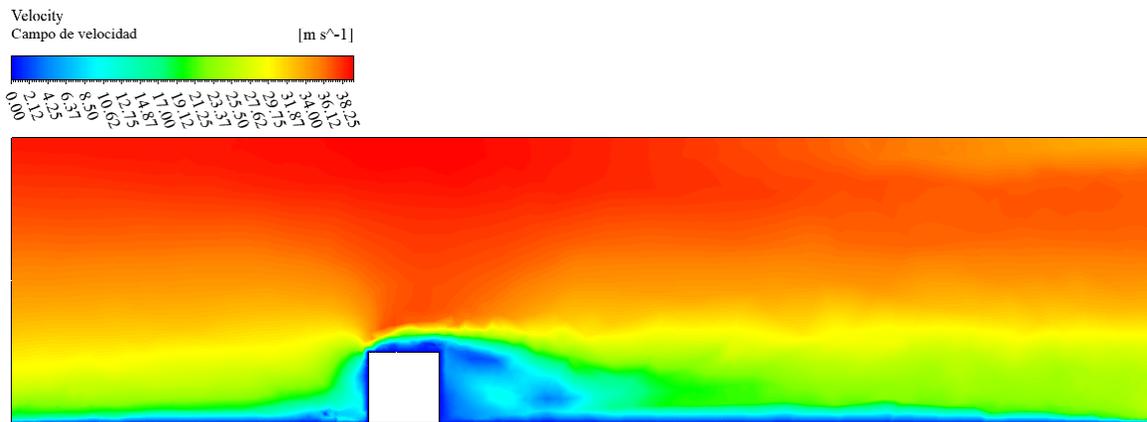


Figura 4.3. Campo de velocidades a través de un cubo de 6x6 m.

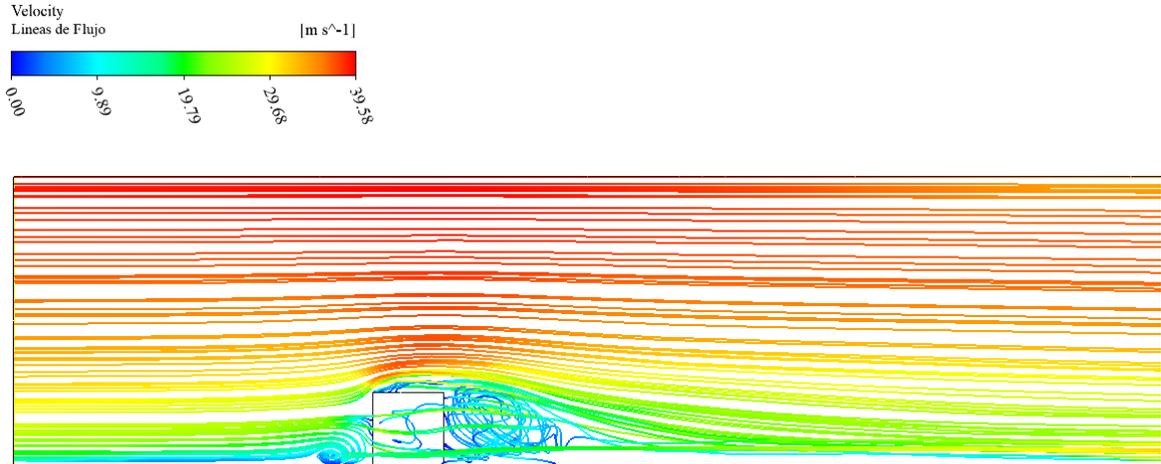


Figura 4.4 Líneas de flujo del viento a través de un cubo de 6x6 m.

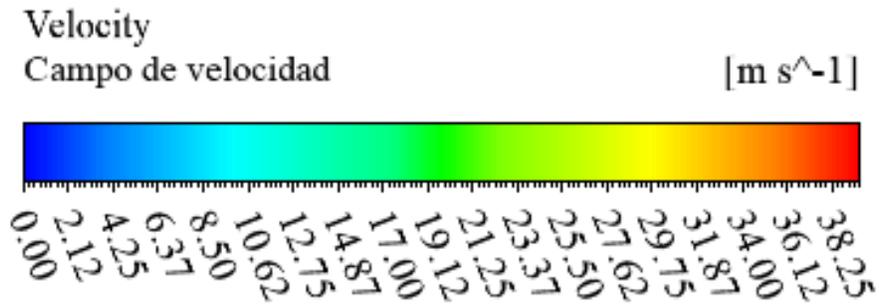


Figura 4.5 Leyenda que muestra el rango de velocidades de una simulación.

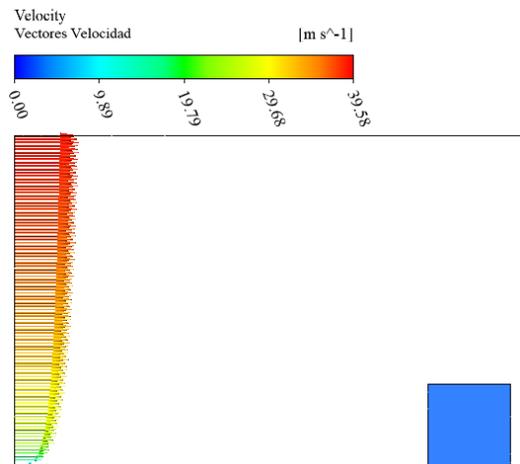


Figura 4.6 Perfil de viento que ingresa al dominio computacional.

## 4.5 Guía de mejor práctica para simulación CFD “COST Action 732”

Las guías de mejor práctica proporcionan procedimientos al usuario del modelo para estimar y reducir errores e incertidumbres en los resultados de la simulación numérica. Existen varias guías disponibles enfocadas al cálculo del flujo en entornos urbanos e industriales mediante las ecuaciones RANS (*Reynolds Average Navier – Stokes*) estadísticamente estables para campos de flujo neutralmente estratificados.

Para realizar una simulación, las guías de mejor práctica están estructuradas en los siguientes pasos generales:

- Selección de variables objetivo.
- Selección de ecuaciones aproximadas que describen la física del flujo.
- Definición del dominio computacional.
- Selección de condiciones de frontera.
- Selección de condiciones iniciales.
- Definición del enmallado computacional.
- Selección de criterios de convergencia iterativos.

### 4.5.1 Selección de variables objetivo

Según lo propuesto en la guía COST Action 732, el primer paso es la definición de las variables objetivo, estas deben incluir las variables representativas de los objetivos de la simulación y aquellas que se pueden comparar con los experimentos correspondientes. Otros criterios son:

- Sensibilidad al tratamiento numérico y la resolución.
- Cálculo con herramientas de post–procesamiento existentes.
- Cálculo dentro del solucionador y durante el tiempo de ejecución.

El primer punto se refiere a que las variables objetivo deben de ser indicativas de los errores numéricos e incertidumbres. Los dos últimos puntos simplifican la definición y el monitoreo de las variables, lo cual es importante para el juicio de la convergencia iterativa.

### 4.5.2 Selección de ecuaciones que describen la física del flujo

La selección de las ecuaciones básicas tiene el mayor impacto en los errores de modelado y las incertidumbres. Primero debe decidirse si la aplicación requiere un tratamiento inestable o constante. El flujo turbulento dentro de entornos urbanos o industriales está modelado en general por las ecuaciones de Navier – Stokes.

Para simular el flujo, no es necesario resolver las ecuaciones compresibles completas, pero se pueden utilizar simplificaciones. Si solo se investigan los primeros 200 m de la atmósfera, la suposición de campos de flujo no divergentes y densidad constante podrían usarse sin perder precisión en los resultados del modelo. También, el efecto de los cambios en la dirección del viento con la altura se debe de incluir en el modelo seleccionando adecuadamente el perfil de flujo entrante.

En el caso más simple en el que la densidad pueda tratarse como una constante, las ecuaciones de continuidad, momento y transporte de gases no pueden usarse directamente para calcular el flujo y dispersión debido a la naturaleza turbulenta del flujo. La solución directa de estas ecuaciones requeriría la resolución de todas las escalas espaciales y temporales, lo que resulta imposible debido a recursos informáticos insuficientes. Por lo tanto, el sistema de ecuaciones tiene que simplificarse para que posea una solución numérica. Esto se logra promediando las ecuaciones básicas para filtrar las muchas escalas del flujo turbulento y seleccionando un cierre turbulento para modelar estas escalas filtradas.

### 4.5.3 Modelos para simular un flujo

Para simular el flujo, básicamente se tienen tres alternativas: Simulación Numérica Directa (Direct Numerical Simulation, DNS); Simulación de Grandes Escalas (Large Eddy Simulation, LES); y Ecuaciones Promediadas o Modelos de Turbulencia (Reynolds Average Navier – Stokes Equations, RANS). Estas últimas se describen brevemente a continuación.

- **Modelo RANS Estable (Steady Reynolds Averaged Navier – Stokes)**

En este modelo, es común promediar el tiempo (infinito) que conduce a una descripción estadísticamente constante del flujo turbulento. Las ecuaciones RANS (Reynolds Averaged Navier – Stokes) son una representación adecuada comparadas con los experimentos en túnel de viento, ya que las condiciones de flujo de aproximación promediadas por el tiempo no cambian.

La simulación con RANS, extensamente utilizada en casos prácticos de interés industrial, utiliza una aproximación estadística para que el análisis de la turbulencia sea estacionario, es decir, sus propiedades no cambian con el tiempo y son determinadas por condiciones de frontera. Los modelos RANS son de menor exigencia computacional en comparación con DNS y LES.

Aún con la alternativa RANS, los casos de interés práctico tienen escalas industriales que, junto con una geometría compleja, hacen necesario un número grande de elementos finitos en la malla dando como consecuencia un tiempo de cálculo elevado.

#### 4.5.4 Dominio computacional

El tamaño de todo el dominio computacional en las direcciones vertical, lateral y de flujo dependen del área de interés que se representará y de las condiciones de contorno que se utilizarán. El tamaño del dominio debe ser lo suficientemente grande para representar los efectos del viento que mayor impacto tienen sobre el área de estudio. COST Action 2007 sugiere que, para un edificio sencillo de altura  $H$  se debe tener una distancia vertical de  $3H$  a  $4H$  por encima de la cubierta del edificio; la distancia entre el plano de entrada y el plano de incidencia con el modelo se recomienda de  $5H$ , para modelos RANS, se debe tener una distancia suficiente para preservar la velocidad media, la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación turbulenta. La frontera de salida debe de estar lo suficientemente lejos como para que el flujo de salida se desarrolle, se recomienda  $15H$  flujo abajo (*downstream*). Para las fronteras laterales se recomienda una distancia de  $5H$  desde las caras laterales del modelo de estudio.

#### 4.5.5 Selección de condiciones de frontera

Las condiciones de frontera y el tipo de frontera representan el efecto de los alrededores delimitados por el dominio computacional e idealizan la influencia del flujo a considerar. La condición de frontera que se utilizará en el dominio computacional también está relacionada con el tamaño del dominio.

En la frontera de entrada (*inlet*), generalmente se ingresa el perfil de velocidad media usando un perfil de ley exponencial o logarítmico y la información sobre las cantidades de turbulencia. La condición de frontera comúnmente usada en paredes sólidas (modelo de edificios y terreno) es de no deslizante (*no-slip*). Para la frontera superior y las fronteras laterales usualmente se emplea una condición de frontera simétrica (*symmetry*) lo que

permite reducir el dominio computacional. Por último, para la frontera de salida (donde la mayor parte del fluido abandona el dominio computacional) se utilizan condiciones de límite abierto, lo que significa que son condiciones de salida de flujo o condiciones de límite de presión estática constante.

#### 4.5.6 Selección de datos iniciales

Para las soluciones estacionarias RANS, se busca que el proceso de iteración se detenga tan pronto como la solución no cambie o converja. En estos casos, principalmente los valores límite influyen en la solución del modelo y el impacto de los datos iniciales es pequeño. Inicializar con un campo de flujo que esté cerca de la solución final reducirá los esfuerzos computacionales necesarios para llegar a la solución.

Es común usar los datos de entrada como datos iniciales de partida para realizar el cálculo del flujo a simular.

#### 4.5.7 Selección de la malla computacional

Con el método de volumen finito, los resultados computacionales dependen de manera crucial de la malla que se utiliza para discretizar el dominio computacional. La malla debe diseñarse de tal manera que no introduzca grandes errores, esto significa que la resolución de la malla debe de ser lo suficientemente fina como para capturar los fenómenos físicos importantes como desprendimientos de corriente y vórtices con suficiente resolución. Además, la calidad de la malla debe ser alta, lo ideal es que la malla sea equidistante, por lo tanto, la relación de expansión (estiramiento/compresión) debe de ser pequeña en regiones de gradientes altos. La relación de expansión entre dos celdas consecutivas debe ser inferior a 1.3 en estas regiones.

Con respecto a las celdas computacionales, los hexaedros son preferibles a los tetraedros, ya que se sabe que los primeros introducen errores más pequeños y muestran una mejor convergencia iterativa.

#### 4.5.8 Selección del criterio de convergencia iterativo

La mayoría de los programas de computadora utilizan métodos iterativos para resolver el sistema algebraico de ecuaciones. A partir de una suposición inicial, las variables de flujo se calculan en cada una de las iteraciones hasta que las ecuaciones se resuelven en un error especificado por el usuario. El criterio de terminación generalmente se basa en los residuos de las ecuaciones correspondientes, estos residuos deben tender hacia cero. En aplicaciones industriales, generalmente se usa un criterio de convergencia de 0.001, que en general es demasiado alto para tener una solución convergente. Para fines de validación de turbulencia se deben usar criterios mucho más bajos, se recomienda usar un criterio de convergencia de  $1 \times 10^{-5}$ .

Además de los residuos, las variables objetivo también deben verificarse. Si estas variables son constantes u oscilan alrededor de un valor constante, entonces la solución puede considerarse convergente.

## CAPÍTULO 5. ESTUDIO DE VIENTO DE UN CONJUNTO DE EDIFICIOS MEDIANTE SIMULACIÓN CFD

Para realizar el estudio de viento mediante simulación CFD, se hará uso de un software comercial; cada simulación que se realice será única y los resultados obtenidos son independientes en cada caso.

Primero se describirá la estructura a modelar. El modelo final para simular consiste en un conjunto de cuatro edificios (torres) de uso habitacional, al cual le induciremos un perfil vertical de velocidad del viento con una  $V_{med} = 37.9 \text{ m/s}$ . La primera simulación que se realizará consiste en simular el perfil de viento medio a través de nuestro dominio computacional, y para las siguientes simulaciones se irá, agregando una torre hasta completar el conjunto de cuatro torres que sería la simulación final.



*Figura 5.1. Conjunto de edificios habitacionales.*

## 5.1 Descripción de la estructura

El conjunto de edificios se encuentra ubicado cerca de la costa. Las características del terreno o rugosidad del terreno es de Categoría 1 (terreno abierto, prácticamente plano, sin obstrucciones y superficies de agua).

Las estructuras que se estudiarán constan de 19 niveles cada una, con una altura de 70 m. El área construida de cada edificio es de 256 m<sup>2</sup> (16 m x 16 m de base) que sumados dan un total de 1,024 m<sup>2</sup>, como se muestra en la Figura 5.2.

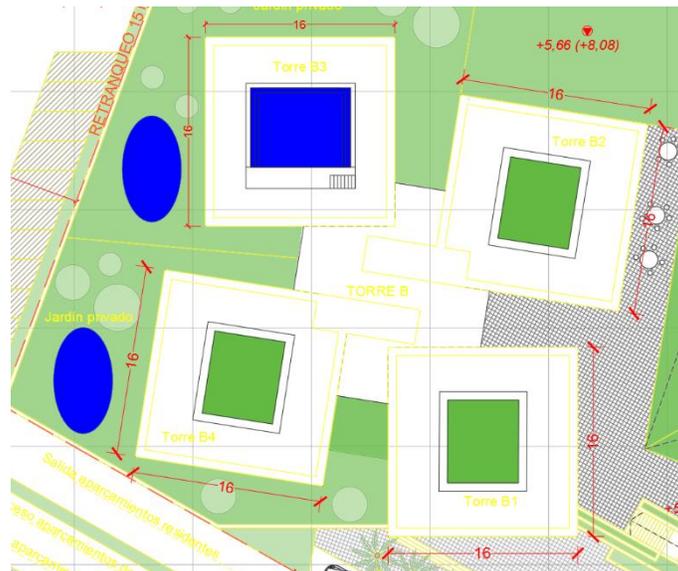


Figura 5.2. Vista en planta de la distribución de cada una de las torres en conjunto.

## 5.2 Definición de la geometría

Las geometrías que se simularán están conformadas por un dominio computacional, un plano de entrada de flujo de viento (*inlet*), un plano de salida del flujo (*outlet*), la zona de desarrollo del flujo, la zona central del dominio computacional o área de investigación y la zona de salida del flujo (ver figura 5.3). La primera geometría que se simulará contiene únicamente el dominio computacional, sin ninguna obstrucción o edificio, y servirá como base para comprobar que el programa está trabajando de manera correcta, y de igual manera servirá como modelo de calibración. Para las siguientes geometrías se agregará el área de estudio, que en nuestro caso consiste en modelar cada uno de los edificios, hasta conseguir un modelo final donde se tenga el conjunto de cuatro edificios.

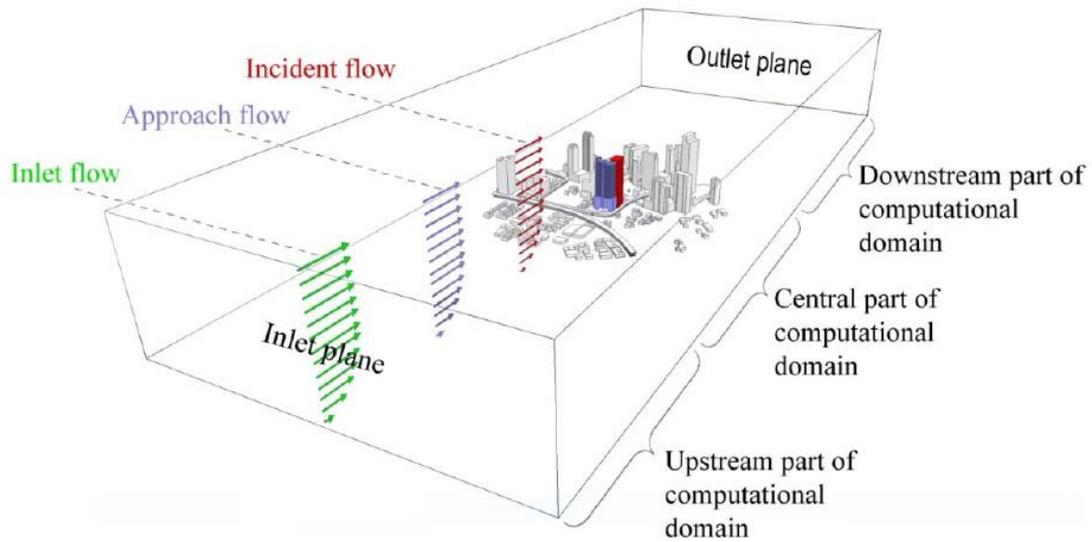


Figura 5.3. Partes del dominio computacional para una simulación CFD.

Cada una de las geometrías se crearán en un software externo de CAD para mejor facilidad y después se exportará la geometría del modelo al software de CFD. Al definir cada una de las geometrías se busca conseguir que se parezca lo mejor posible a la realidad para obtener resultados con poca incertidumbre.

### 5.2.1 Geometría A (Dominio Computacional)

Para definir la Geometría A primero seguiremos las recomendaciones antes mencionadas, donde se sugiere una distancia del plano de entrada al área de estudio de  $5H$  (350 m), una altura del dominio de  $4H$  (280 m), una distancia flujo abajo (*Downstream*) de  $15H$  (1050 m) y una distancia entre paredes laterales al área de estudio de  $5H$  (350 m), lo que da como resultado un dominio de 280 m x 750 m x 1450 m (altura x ancho x largo) como se muestra en la figura 5.4.

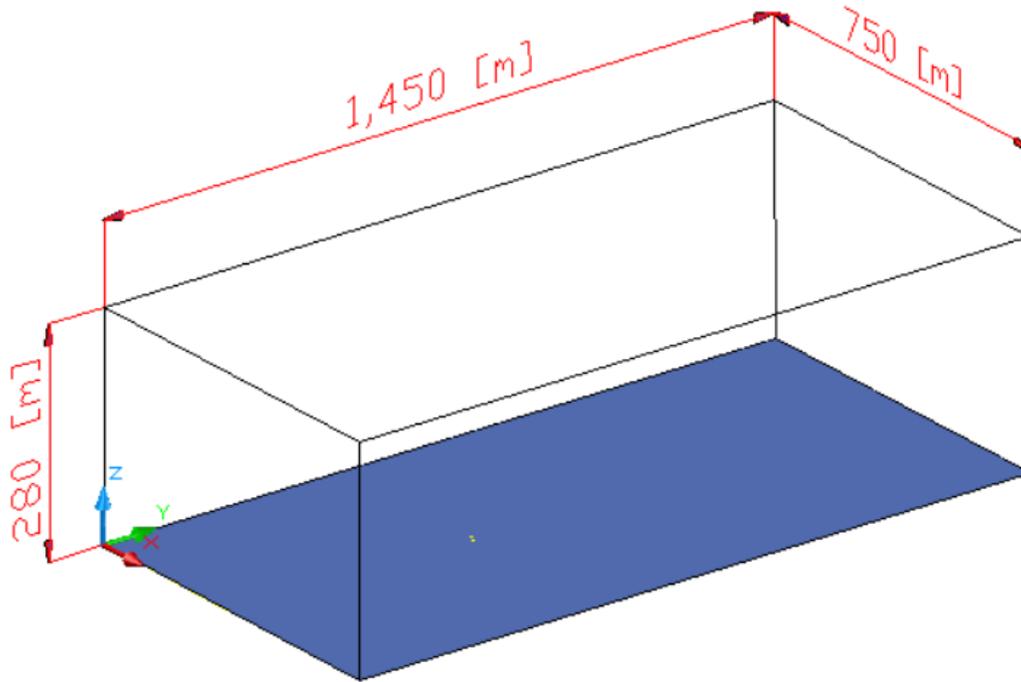


Figura 5.4. Dominio computacional siguiendo las recomendaciones de la “**COST Action 732**”

El tamaño del dominio computacional siguiendo las recomendaciones resulta ser exageradamente grande provocando un mayor gasto computacional, sin embargo, dentro de las recomendaciones mencionadas se indica que se puede reducir el dominio computacional si las variables objetivo no se ven afectadas. También se puede reducir la distancia flujo arriba (*upstream*) si se conoce bien el perfil y, además, en nuestro caso es irrelevante lo que pase flujo abajo (*downstream*) por lo que se puede reducir el dominio computacional para disminuir gastos computacionales. A partir de esto, se puede obtener un **dominio computacional optimizado**.

El **dominio computacional optimizado (Geometría A)** tiene por dimensiones las siguientes: 200 m de altura x 300 m de ancho x 450 m de largo como se muestra en la figura 5.5. Este tamaño del dominio computacional será utilizado para todas las simulaciones y así conseguir una disminución de esfuerzo computacional, reduciendo el número de elementos finitos y el tiempo de análisis.

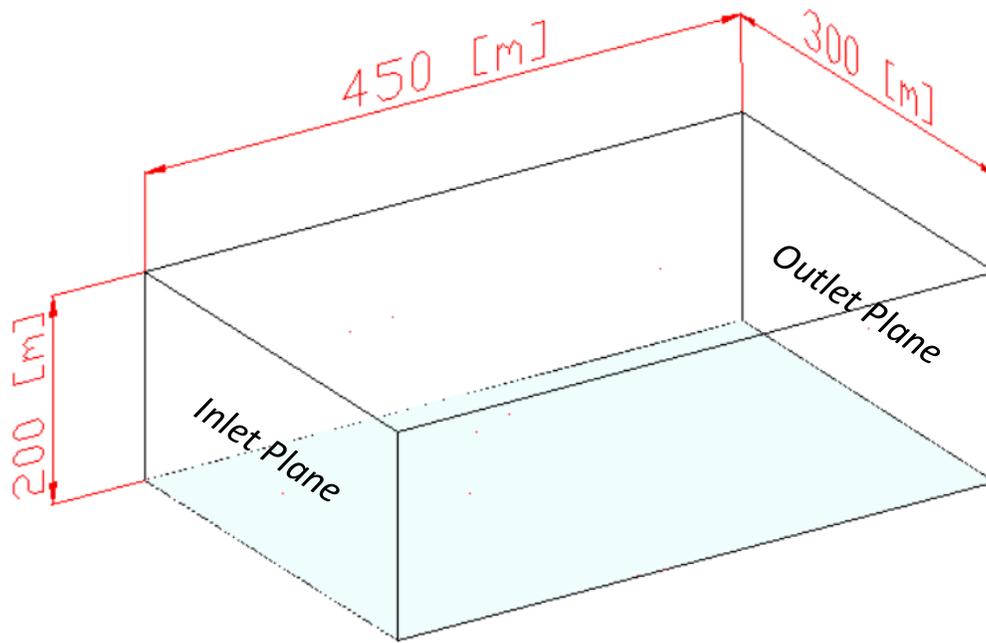


Figura 5.5. Dominio computacional optimizado (Geometría A).

### 5.2.2 Geometría B (Modelos con 1, 2, 3 y 4 Torres)

Para la geometría B, se usará el dominio computacional optimizado, pero en esta ocasión incluiremos un edificio con las dimensiones mencionadas en la sección 5.1. En la figura 5.6 se muestran las dimensiones de la Torre 1, para las Torres 2, 3 y 4 las dimensiones son las mismas. Cada edificio será idealizado como un prisma rectangular, con esto obtendremos resultados cercanos a la realidad y disminuirémos los costos por computación.

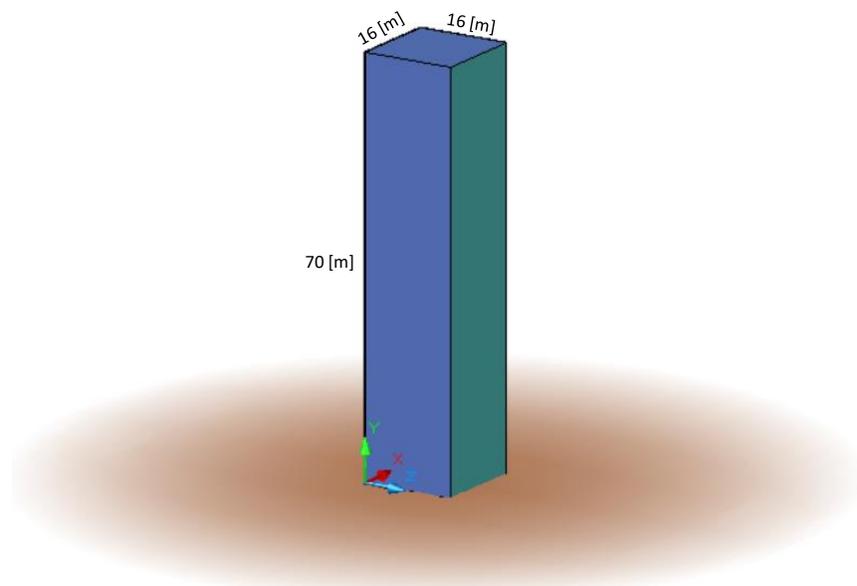


Figura 5.6. Geometría de la Torre 1 idealizada como un prisma rectangular.

En la figura 5.7 se muestra el modelo de edificios dentro del dominio computacional. El perfil de viento impactará primero a la Torre 1 que está ubicada al frente de las demás torres y atravesará por los otros edificios. La distancia entre el plano de entrada (*inlet*) y el área de estudio que se recomienda en la *COST Action 732* es de  $5H$  (350 m). En nuestro caso se colocará el área de estudio a una distancia de 150 m desde el plano de entrada porque se conoce el perfil vertical de velocidad, para la distancia entre las paredes laterales del dominio computacional y el área de estudio se tendrá una distancia de 125 m como se muestran en las figuras 5.7 y 5.8.

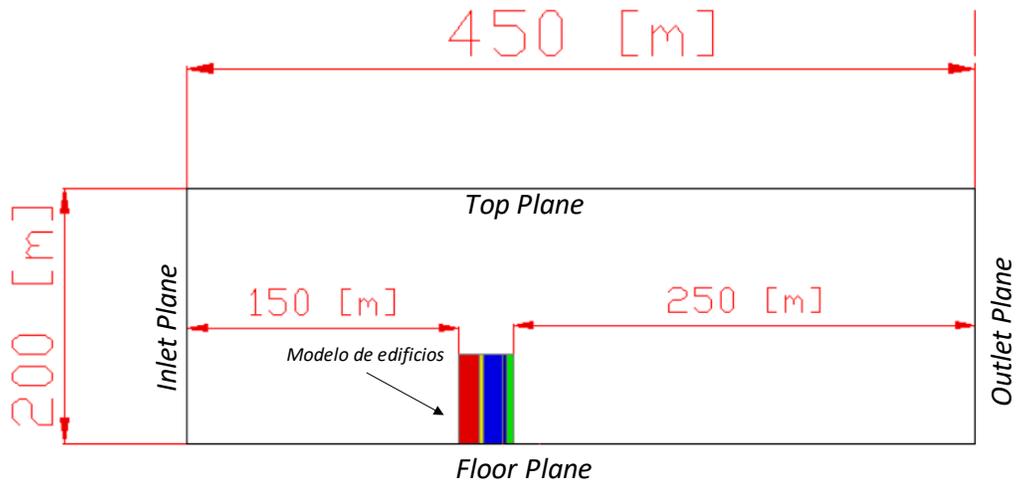


Figura 5.7. Modelo de edificios dentro del dominio computacional (Vista lateral).

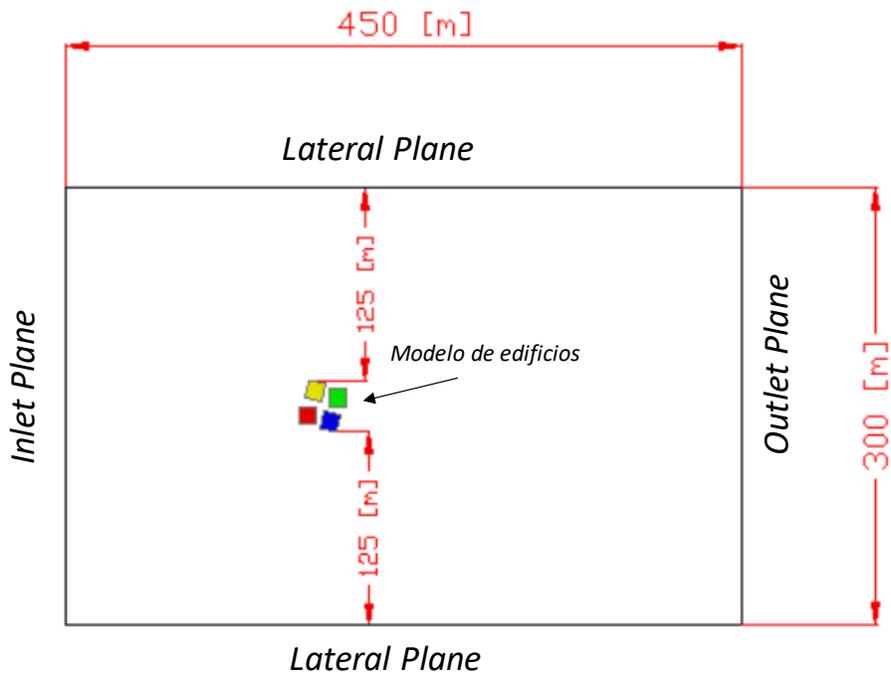


Figura 5.8. Modelo de edificios dentro del dominio computacional. (Vista en planta).

### 5.3 Definición de la Velocidad de Diseño, $V_D$ , y el perfil vertical de viento

La velocidad básica de diseño es la velocidad que se utilizará para definir el perfil vertical de viento que impactará con el modelo a estudiar y se obtiene empleando la ecuación 2-1 (MDOC DV, 2008), tomando los siguientes factores:

$F_T = 1.0$  Sitio normal. Terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes.

$F_{RZ} = 1.137$  Categoría de terreno 1: Terreno abierto prácticamente plano sin obstrucciones y superficies de agua.

$V_R = 120 \frac{km}{hr}$  Velocidad regional (Cd. Del Carmen, Campeche) para un periodo de retorno de 50 años.

$$V_D = (1.0)(1.137)(120 \text{ km/hr}) = 136.44 \text{ km/hr}$$

$$V_D = 37.9 \text{ m/s}$$

Para definir el perfil vertical de velocidad del viento es necesario conocer la altura de rugosidad y la velocidad de diseño o velocidad media que se definió con anterioridad; para nuestro caso se utilizará un perfil de viento logarítmico, por lo tanto, los parámetros para definirlo son los siguientes:

Tabla 5.1 Parámetros de Viento	
$V_{med}$	37.9 [m/s]
$Z_{ref}$	10 [m]
$k$	0.41 -> Constante de Von Karman
$Z_o$	0.005 [m] -> Terreno suave sin obstáculos notables (Ver Tabla 3.5).

Con los parámetros de viento (tabla 5.1) y haciendo uso de la ecuación 3.3 obtenemos la velocidad de fricción:

$$u_* = (37.9) \frac{0.41}{\ln\left(\frac{10}{0.005}\right)} = 2.04 \left(\frac{m}{s}\right)$$

El perfil vertical de velocidad queda definido de la siguiente manera:

$$U_z = \frac{2.04 \left(\frac{m}{s}\right)}{0.41} \ln \left( \frac{Z + 0.005 m}{0.005 m} \right)$$

#### 5.4 Calibración del modelo y preparación previa a la simulación.

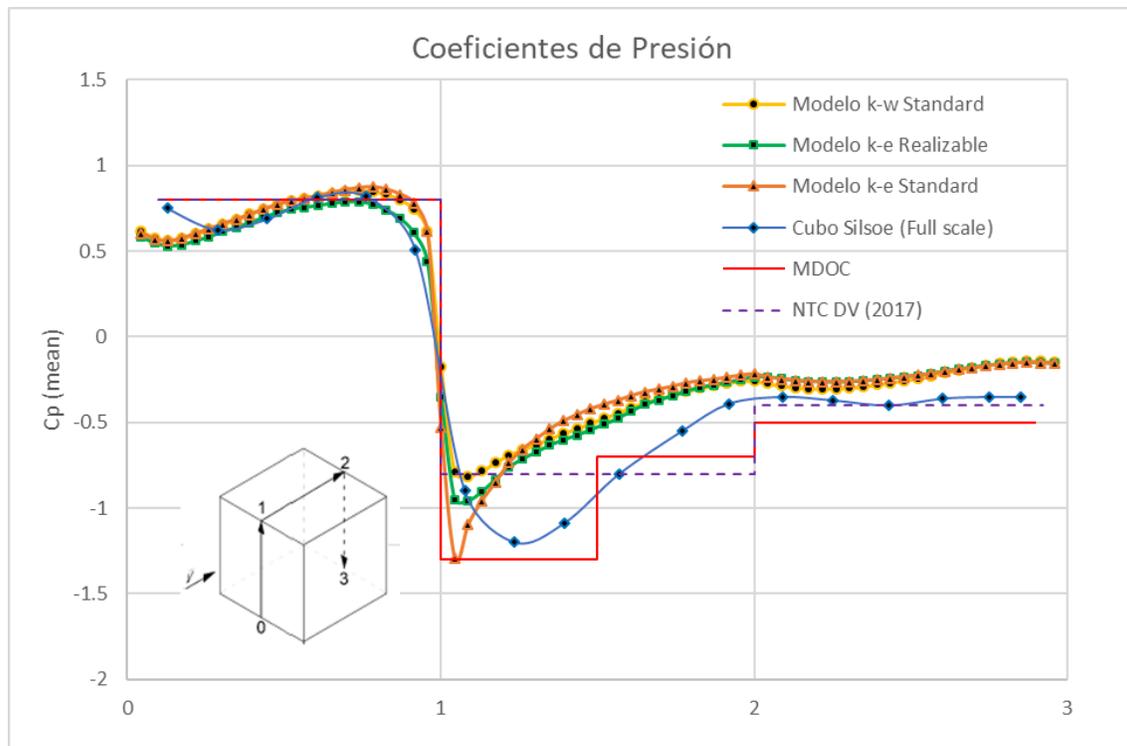
En el proceso de simulación CFD es importante verificar que cada simulación se realice de manera correcta para obtener resultados más cercanos a la realidad y de igual manera es necesario conocer cuál de los diferentes modelos de turbulencia presenta un mejor comportamiento.

Para esto, se realizarán algunas pruebas de calibración y preparación previa a la simulación. En la primera, se simulará un cubo que ha sido ampliamente estudiado (cubo SILSOE) con diferentes modelos de turbulencia y servirá como base para saber qué modelo de turbulencia es el que presenta un mejor comportamiento. En las siguientes dos pruebas de calibración se comprobará que el perfil de viento ingresado sea el indicado en nuestra función usuario (UDF) y también se revisará que el perfil vertical de viento ingresado en el plano de entrada se desarrolle correctamente a lo largo del dominio computacional.

- **Comparación de los coeficientes de presión obtenidos con diferentes modelos de turbulencia RANS (Modelo: Cubo SILSOE).**

A continuación, se presentan los coeficientes de presión obtenidos mediante simulación numérica (CFD) usando diferentes modelos de turbulencia RANS y se comparan con los coeficientes de presión obtenidos de un modelo experimental (cubo SILSOE). Para realizar cada simulación numérica se tomaron algunas recomendaciones de la guía COST 732, únicamente para esta simulación se utilizó un perfil de viento logarítmico con una velocidad media de 15 m/s para una categoría de terreno 1 y con una cantidad de turbulencia del 5%.

En la figura 5.9 se comparan los coeficientes de presión de tres distintos modelos de turbulencia con los resultados obtenidos del modelo experimental “Cubo SILSOE” (escala real) y también los obtenidos con la normativa (NTC DV 2017 y MDOC DV 2008).



**Posición: 0-1 Barlovento, 1-2 Cubierta, 2-3 Sotavento**

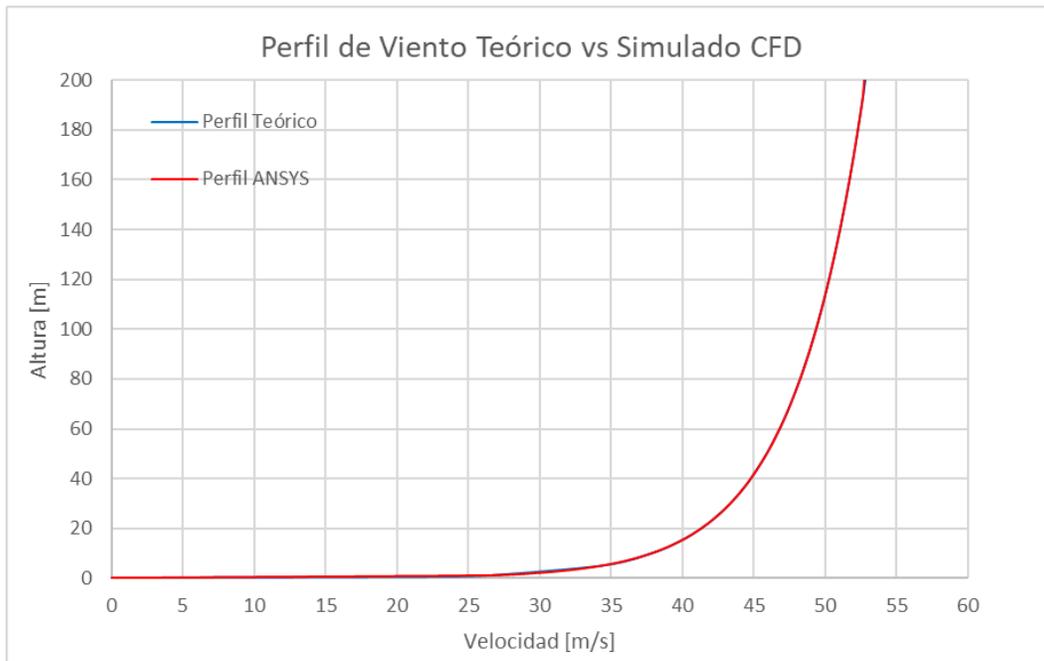
Figura 5.9 Coeficientes de presión obtenidos con distintos modelos de numéricos, modelo experimental y manual (normativa).

En la figura anterior se observa que existe gran dispersión de resultados; en la zona de barlovento se observa que los coeficientes obtenidos con los distintos modelos de turbulencia tienen un comportamiento similar al modelo experimental (cubo SILSOE) pero en la zona de cubierta es donde mayor dispersión de datos se observa debido a la separación del flujo en las paredes del modelo por la presencia de aristas, y en la zona de sotavento resultan ser más conservadores los coeficientes obtenidos mediante simulación CFD.

Con base en lo anterior, se puede elegir el modelo de turbulencia que mejor comportamiento presenta, en nuestro caso, se utilizará el modelo k-e standard por presentar un mejor comportamiento en la zona de cubierta, además resulta ser un modelo estable a la hora de realizar el cálculo de la solución.

- **Perfil Vertical de Viento**

Para comprobar que el software de CFD está funcionando de manera correcta se realizó una primera simulación (Geometría A) en la que se ingresó el perfil vertical de viento logarítmico y se obtuvo el perfil de viento a la entrada, después se comparó con el perfil de viento graficado en Excel y se observó que los perfiles de viento tanto el simulado como el graficado resultan ser los mismos como se observan en la figura 5.10.



*Figura 5.10 Comparativa del perfil vertical de velocidad teórico vs simulado en CFD.*

- **Desarrollo del perfil de viento a lo largo del dominio computacional.**

Esta prueba de simulación servirá para observar cómo es el comportamiento del viento a lo largo del dominio computacional vacío (Geometría A). En la figura 5.11 se muestra el campo de velocidades, la línea vertical de color negro representa el plano donde se ubicará el modelo de edificios y se puede observar que se mantiene el perfil de velocidad a lo largo del dominio.

En la figura 5.12 se muestran los perfiles de velocidad obtenidos directamente de ANSYS FLUENT. Se obtuvieron 3 perfiles, uno a la entrada, otro en un plano de incidencia con el área de interés (a 150 m) y un último perfil a la salida. Se observa que el perfil de entrada y el que se ubica a 150 m resulta ser muy similar por lo que se considera aceptable. Si comparamos el perfil de entrada con el de salida vemos una diferencia de velocidad en los primeros metros de altura, lo cual no afecta el comportamiento, pues el área de estudio se ubica dentro de los primeros 200 m.

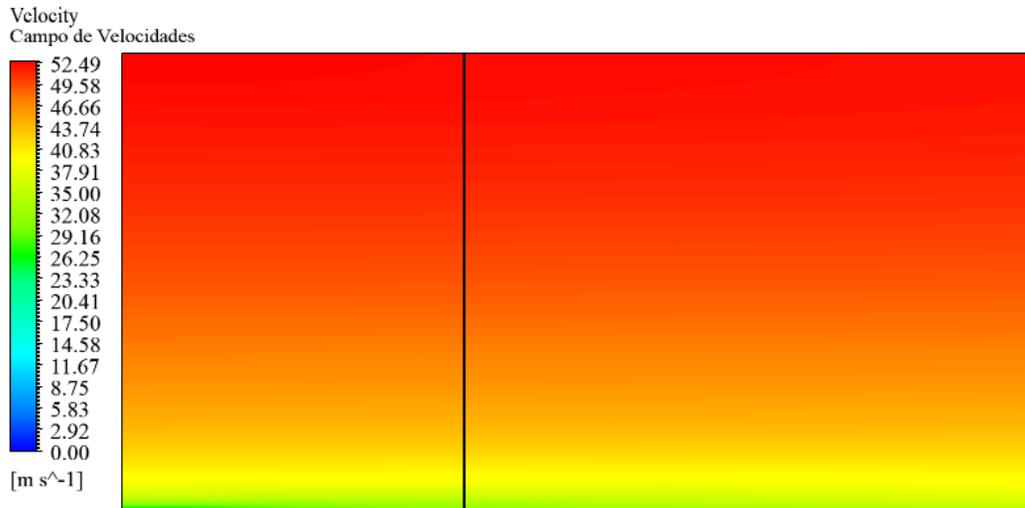


Figura 5.11 Campo de velocidades del dominio computacional (Geometría A)

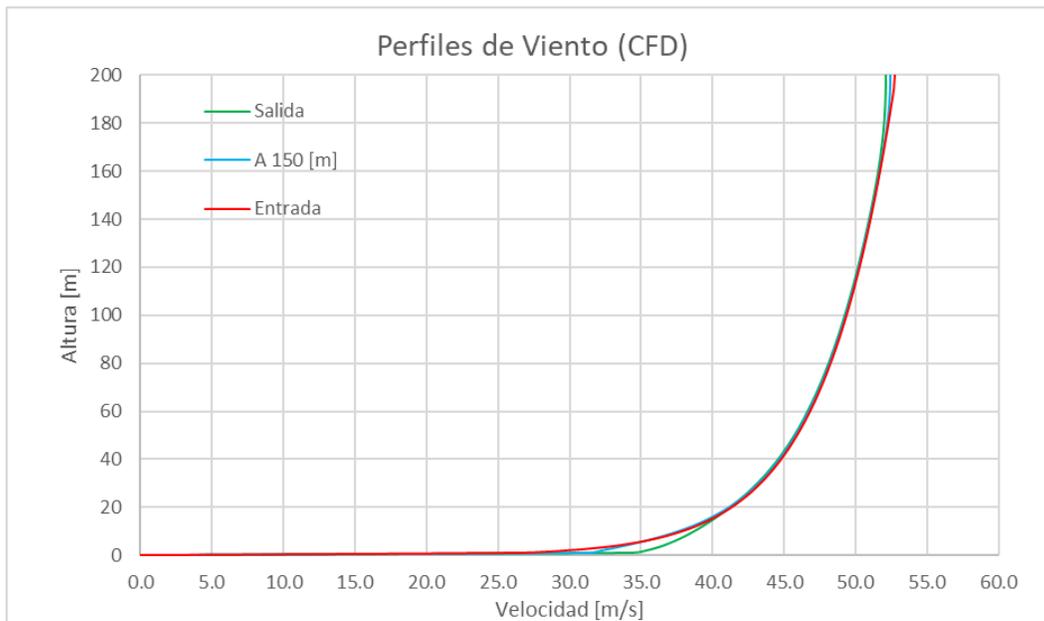
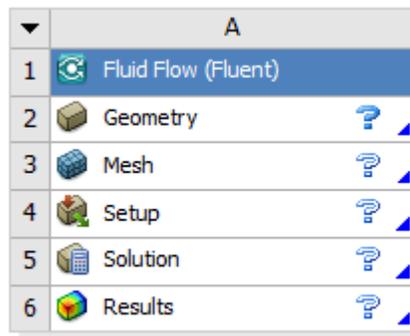


Figura 5.12 Perfiles de Viento simulados en CFD.

## 5.5 Simulación de la estructura

A continuación, se describe el proceso de simulación que se realizó para obtener los coeficientes de presión de cada modelo mediante simulación CFD. Únicamente se describe el proceso para la primera simulación (torre 1), ya que el proceso para las demás simulaciones resulta ser similar. En la figura 5.13 se muestra una ventana con las secciones que se deben de desarrollar para completar una simulación.



Simulación Edificios

Figura 5.13 Ventana inicial al ejecutar ANSYS FLUENT.

- **Geometría**

Cada uno de los modelos se elaboró con un programa externo de CAD para un mejor manejo y después se importaron al programa de CFD. Al importar la geometría se debe de prestar atención al indicar las unidades de longitud adecuadas. Después de importar la geometría el siguiente paso es enmallar el dominio computacional.

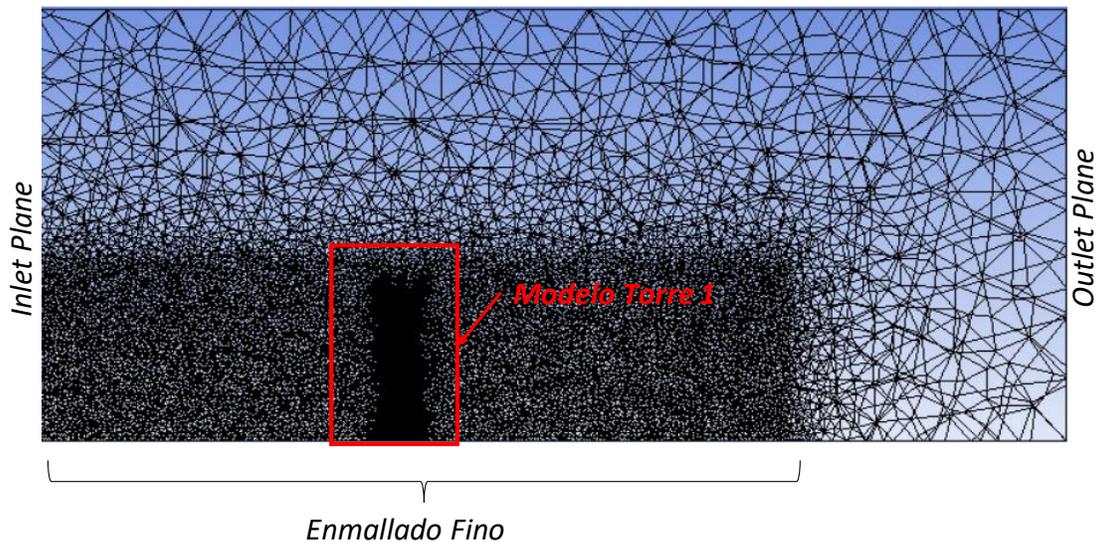
- **Enmallado**

Para generar un enmallado, se tienen diferentes herramientas que permiten tener un mejor control al momento de realizar dicho proceso, y así obtener un enmallado más fino en el área de estudio. Antes de iniciar con el proceso de enmallado se tiene que nombrar cada una de las partes del modelo para poder identificarlas posteriormente, quedando de la siguiente manera:

<b>Plano/Cara</b>		<b>Nombre</b>
Entrada	————→	<i>Inlet</i>
Salida	————→	<i>Outlet</i>
Laterales	————→	<i>Lateral</i>
Terreno	————→	<i>Floor</i>
Edificio	————→	<i>Torre 1</i>
Superior	————→	<i>Top</i>

Al iniciar el enmallado del modelo, se tiene como objetivo desarrollar un enmallado no estructurado y fino en el área de estudio, consiguiendo de esta manera obtener un mejor detalle del comportamiento del flujo. Para conseguir un enmallado más fino en el área de estudio se utilizan herramientas de control de enmallado como las siguientes:

- Sizing → Esta herramienta permite segmentar una línea en un determinado número de divisiones, en nuestro caso será útil para segmentar las paredes que conforman cada edificio y así obtener un enmallado fino, también se utilizará en el plano *inlet* para que el perfil de viento este bien definido al momento de ingresar por este plano.
- Face Meshing → Esta herramienta es útil para que el enmallado de una de las caras del edificio, así como del plano de entrada se realice en forma de cuadriláteros y no de triángulos.
- Body Sizing → Nos permite introducir un volumen de control, por ejemplo, una esfera o una elipse y sobre este volumen de control generar un enmallado más fino (ver figura 5.14).



*Figura 5.14 Enmallado para modelo de la Torre 1, utilizando la herramienta Body Sizing se obtiene un enmallado más fino en el área de interés.*

Después de utilizar estas herramientas de control, para el modelo de la Torre 1 se obtuvo un total de 1, 639, 563 elementos finitos. Con lo anterior quedaría definido el enmallado para después continuar con la configuración de la simulación.

- **Setup**

En esta etapa de la simulación se definen las configuraciones previas al proceso de solución, tales como, condiciones de frontera, propiedades físicas del aire, modelo de turbulencia y el perfil vertical de viento que se utilizará.

1. Función Usuario: Para ingresar una función usuario como lo es el perfil vertical de velocidad del viento se debe de escribir en lenguaje C++ e indicarle al programa de CFD que interprete dicha función (ver ANEXO A).
2. Modelo de turbulencia: Con base en la calibración previa que se realizó y comparando los coeficientes de presión obtenidos con diferentes modelos de turbulencia de CFD se puede concluir que el modelo que tiene mejor comportamiento en elementos con aristas es el **Modelo k-e (2 eqn) Standard** por lo que se utilizará este modelo de turbulencia con un tratamiento estándar en las paredes.

3. Materiales: Las propiedades físicas del fluido (aire) serán las siguientes:

Viscosidad del aire:  $1.7894 \times 10^{-5}$  [kg/m s]

Densidad: 1.225 [kg/m<sup>3</sup>]

4. Condiciones de frontera: En esta sección se configura el tipo de frontera y las condiciones de frontera con las que trabajará la simulación. Siguiendo las recomendaciones (COST Action, 2007), las fronteras del modelo quedan configuradas de la siguiente manera:

*Inlet*: En esta frontera se ingresa el perfil de viento logarítmico, por lo que se tiene que elegir en el parámetro de “magnitud de velocidad” la función usuario que previamente interpretó el programa y se ingresará un 5% de intensidad turbulenta.

*Top y Lateral Boundary*: Para simulaciones donde se involucra la capa límite atmosférica se hace uso del tipo de frontera “simétrico” (*symmetry*).

*Outlet*: Por tratarse de la frontera donde el fluido sale del dominio computacional se verificará que la presión a la salida sea igual a cero.

*Floor*: Para la frontera del modelo que corresponde al piso o terreno se empleará una ley de pared no deslizante (no-slip).

- **Solución**

En esta sección se configura todo lo relacionado a la solución de la simulación como la discretización espacial, el control de límites y el monitoreo de los residuos.

1. Selección del método de solución:
  - El método de solución que se usará para el acoplamiento de la velocidad – presión será SIMPLE (*Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations*).
  - El gradiente utilizado será el basado en el método de mínimos cuadrados por celda (*Least Squares Cell Based*).
  - La configuración para *Pressure, Momentum, Turbulent Kinetic Energy* y *Turbulent Dissipation Rate* será *Second Order Upwind*.
2. Límites de Solución: Para simulaciones de la CLA la tasa máxima de viscosidad turbulenta que se recomienda es de  $1 \times 10^9$ . Esto evitará que, al momento de realizar el cálculo, el programa no limite la viscosidad turbulenta de cada volumen finito.

3. Criterio de convergencia: COST Action 732 menciona que en aplicaciones industriales el criterio de convergencia usado es de  $1 \times 10^{-3}$ , pero para simulaciones de flujo turbulento el criterio de convergencia debe ser menor, por lo que para nuestras simulaciones se usará un criterio de convergencia de  $1 \times 10^{-5}$  (IFT, *University of Siegen*).
4. Inicialización: Se indican los valores iniciales con lo que el programa realizará la solución de la simulación. Para esto se seleccionarán como valores iniciales las magnitudes de velocidad, energía turbulenta y tasa de disipación turbulenta establecidos en la frontera de entrada (*inlet*). Después, se añadirá la variable de “coeficiente de presión” para que el programa calcule los coeficientes de presión del modelo.
5. *Run Calculation*: Se iniciará con un total de 1,000 iteraciones y se monitorearán los residuos con el objetivo de observar el comportamiento de cada iteración y concluir si la simulación alcanzó el criterio de convergencia, o si las variables se mantienen constantes.

Después de correr la simulación, el programa mostrará una gráfica del comportamiento de cada iteración que se realizó, en el eje de las abscisas se indica el número de iteraciones y en el eje de las ordenadas los residuos (ver figura 5.15).

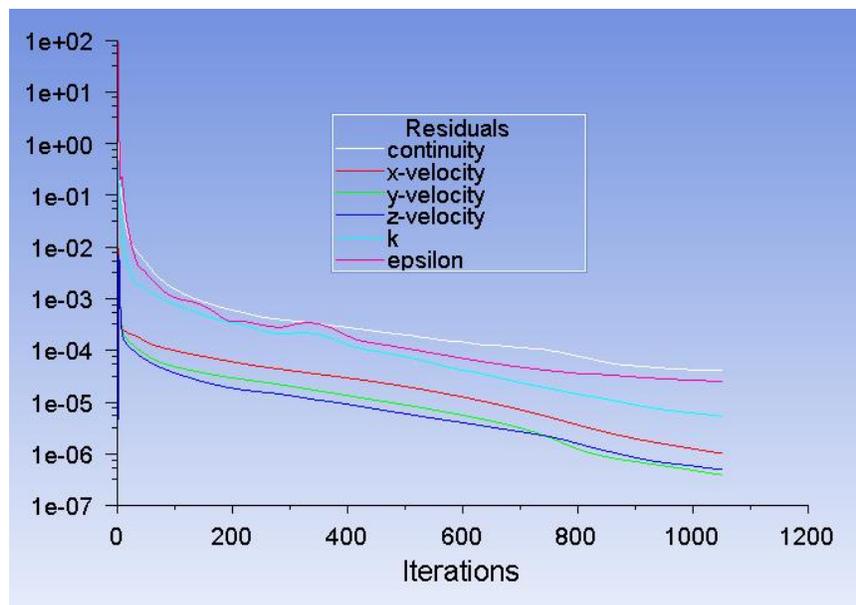


Figura 5.15 Residuales alcanzados después de la simulación de Torre 1.

## 5.6 Sensibilidad y validación del enmallado

Este proceso se puede considerar como parte de la calibración y validación del modelo; consiste en realizar varias simulaciones de la estructura que se va a estudiar, pero con diferentes tamaños de enmallado, yendo de un enmallado grande a uno más fino. De esta manera, se busca obtener un enmallado en donde los coeficientes de presión obtenidos se vuelvan constantes después de cierto número de elementos finitos, por lo tanto, este proceso es fundamental para validar los resultados obtenidos.

A continuación, se muestra una gráfica (ver figura 5.16) en donde se observa el comportamiento del  $C_{p\text{máx}}$  obtenido en la simulación de la torre 1, con esta gráfica se comprueba que después de 1,284,556 elementos el coeficiente de presión máximo se vuelve constante, garantizando que al tener un número de elementos igual o mayor los resultados obtenidos se considerarán válidos en cada simulación.

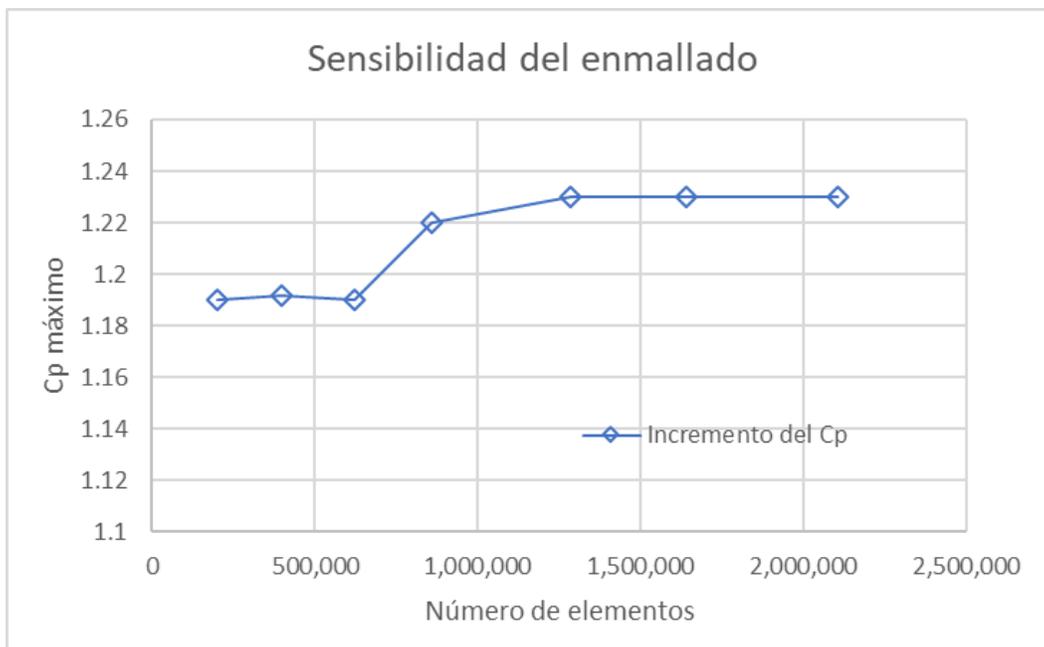


Figura 5.16 Sensibilidad y validación del enmallado.

## 5.7 Análisis de resultados

Para presentar los resultados obtenidos de cada una de las simulaciones se elegirán los gráficos más representativos que muestren los valores más críticos y sobre estos resultados se realizará el análisis correspondiente.

- **Torre 1**

En la figura 5.17 se muestran los coeficientes de presión alrededor de la torre 1 siguiendo la trayectoria indicada. Se observa que se presenta un comportamiento parecido a lo que establece el MDOC DV de la CFE, sin embargo, existe un incremento notable en los coeficientes de presión en la zona de barlovento (presiones positivas) debido a la geometría del edificio y a la variación de la velocidad del viento con la altura.

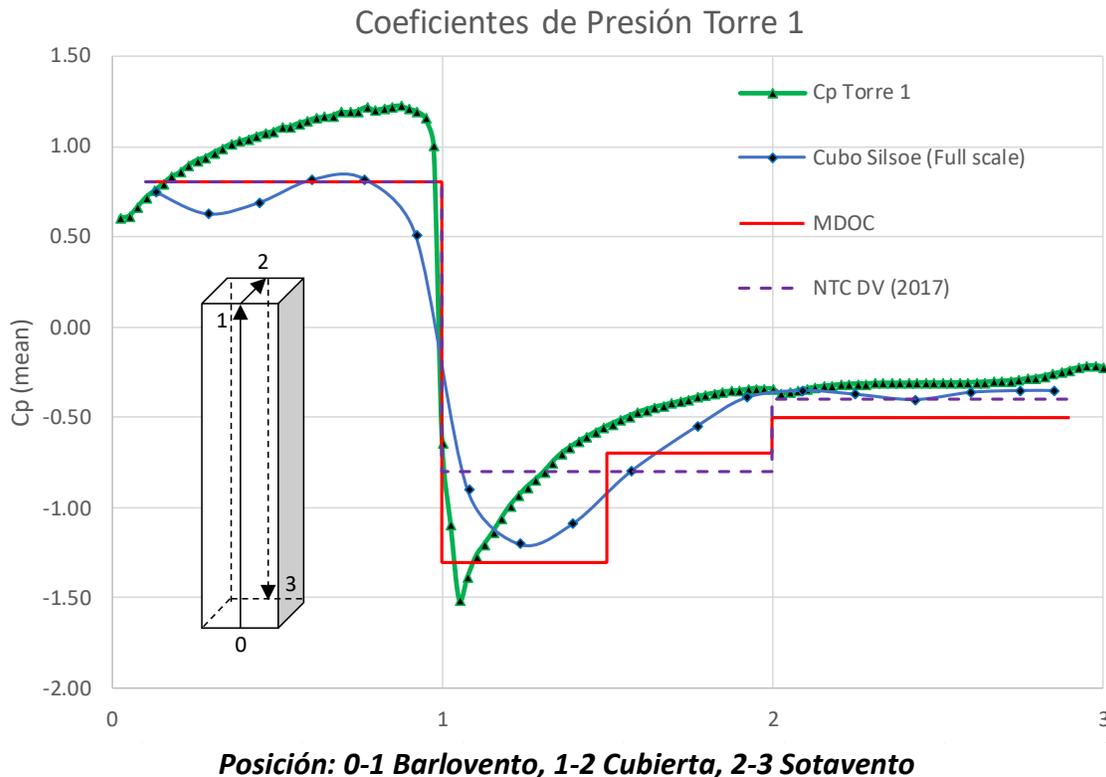


Figura 5.17 Coeficientes de presión alrededor de Torre 1 (anillo vertical) obtenidos mediante CFD.

En la figura 5.18 se presentan los contornos de coeficientes de presión de la torre 1, obtenidos mediante CFD para las caras de barlovento, cubierta, sotavento y laterales respectivamente. La distribución de coeficientes de presión en la torre 1 muestra un comportamiento simétrico con respecto a un plano vertical.

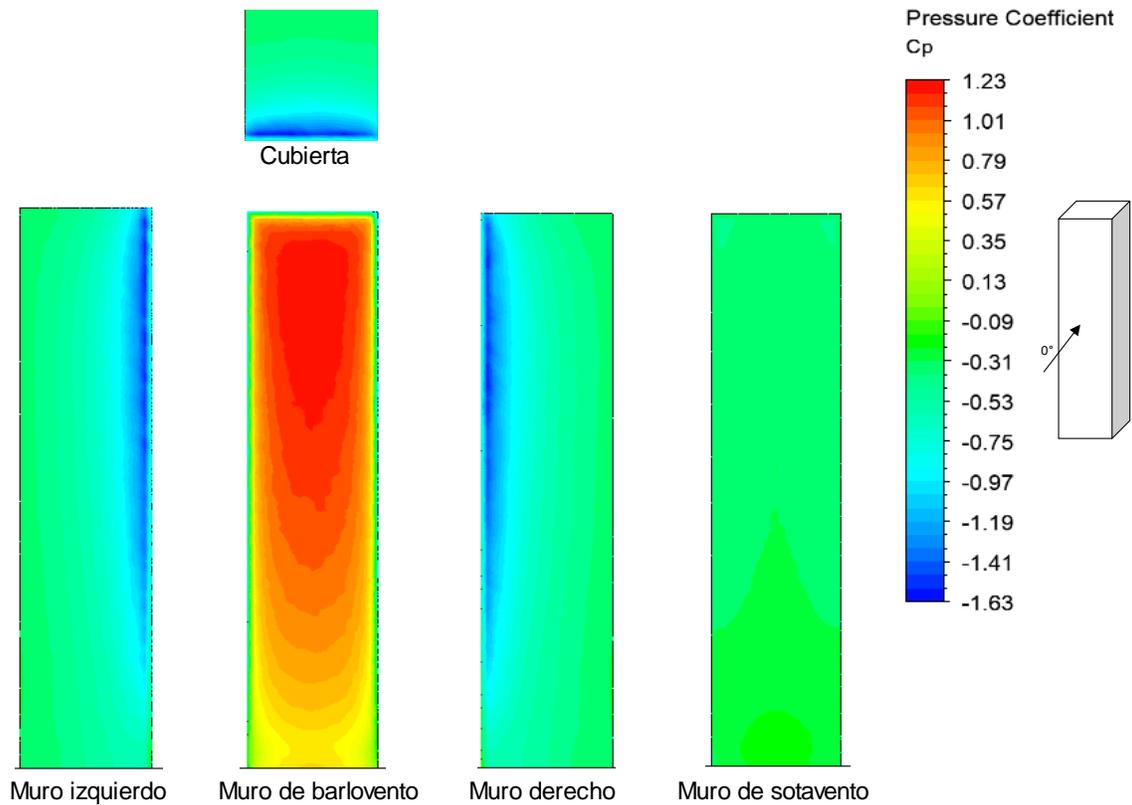


Figura 5.18 Contornos de coeficientes de presión para el modelo de Torre 1.

En la figura 5.19 se muestra el campo de velocidades y las líneas de corriente del modelo. Se observa que el comportamiento en las líneas de flujo a la entrada es lineal y conforme se va acercando a la torre 1, el flujo comienza a cambiar de dirección y se comienzan a desprender vórtices, tanto en las caras laterales (ver figura 5.20) como en la zona de sotavento donde se aprecian con mayor claridad, para después desprender una estela en la zona de flujo abajo (*downstream*).

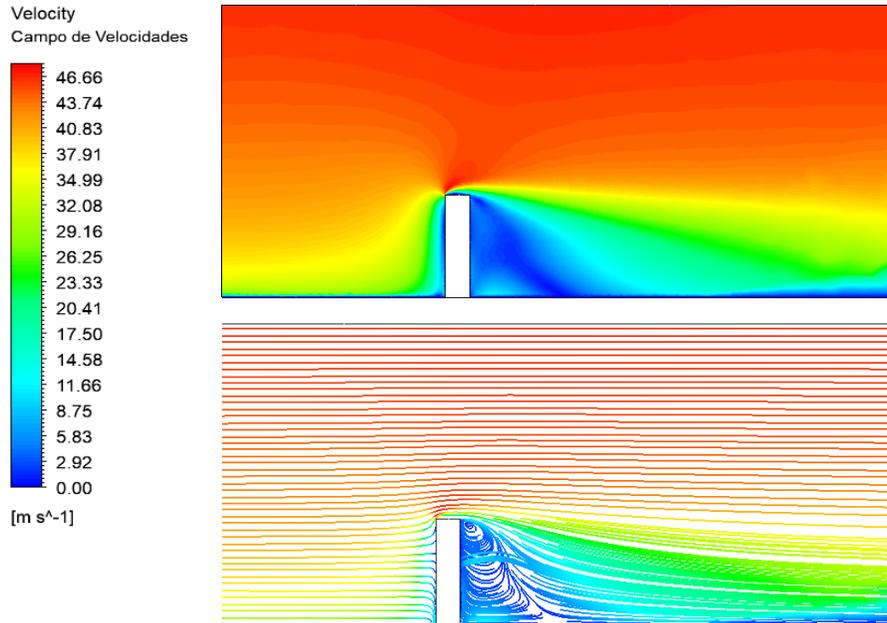


Figura 5.19 Campo de velocidades y líneas de flujo para modelo de Torre 1.

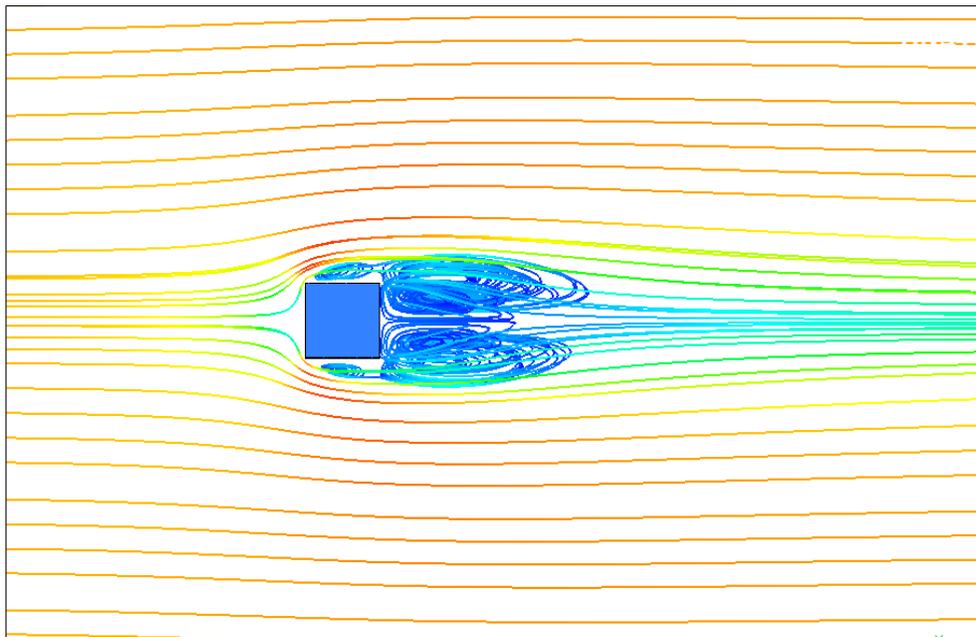


Figura 5.20 Líneas de flujo a través de Torre 1 (Vista en planta).

- **Torres 1 y 2**

En este caso, las torres son casi paralelas y el viento incide en ambas. En la figura 5.21 se aprecia un cambio considerable en la distribución de presiones debido al efecto que tiene la torre 2 sobre la torre 1, pues al tener un edificio vecino el flujo del viento muestra un comportamiento totalmente diferente comparando con la simulación donde solo se tiene una torre. Se observa que el  $C_{p_{m\acute{a}x}}$  incrementó un 2.5% al agregar la torre 2 y además la distribución de los  $C_p$  no resulta ser simétrica como en el modelo anterior, por ejemplo, en los muros de barlovento los  $C_{p_{m\acute{a}x}}$  se desplazan hacia la izquierda y hacia la derecha, respectivamente en cada torre, esto se debe a un efecto Venturi que se ocasiona entre las dos torres, este efecto se define como un incremento en la velocidad de un fluido debido a una reducción de área.

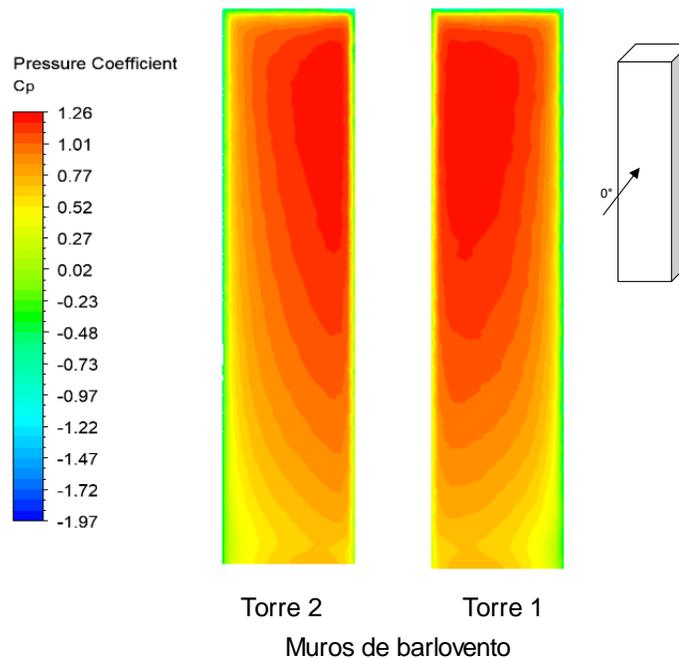
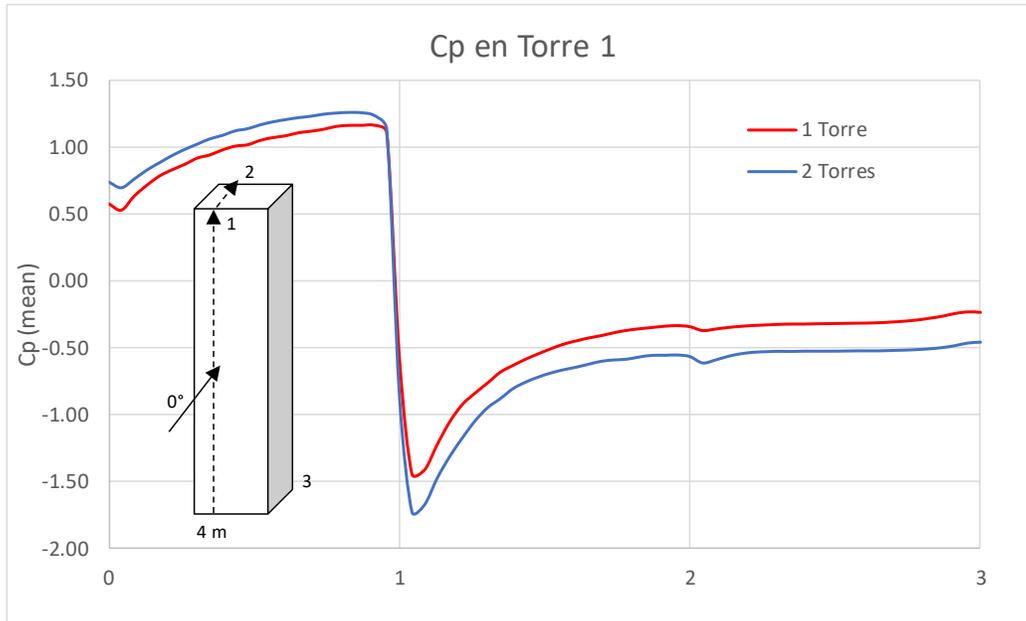


Figura 5.21 Contornos de coeficientes de presión para modelo de Torre 1 y 2.

En la figura 5.22 se muestran los  $C_p$  alrededor de la torre 1 siguiendo la trayectoria de un anillo vertical ubicado a 4 metros del muro izquierdo, donde se presenta un  $C_{p_{max}} = 1.26$  para la simulación en donde se incluyeron 2 torres. En la curva de color rojo se observan los  $C_p$  en donde se simuló sólo una torre y la curva de color azul muestra los  $C_p$  en donde se simuló la torre 1 y 2. Lo que se observa en la gráfica es que al momento de existir una estructura aledaña o cualquier obstáculo que modifique considerable el flujo del viento

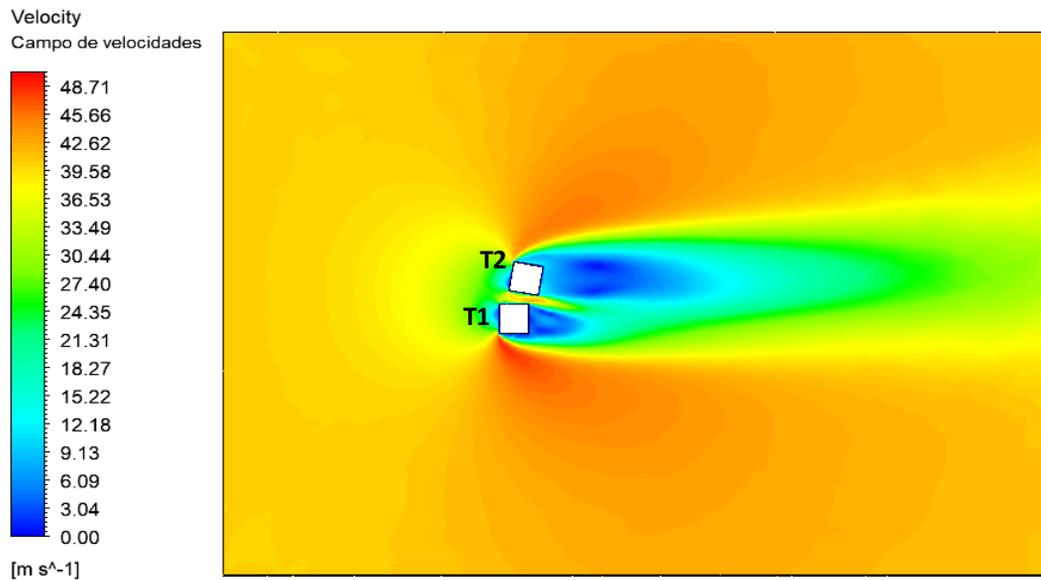
como por ejemplo un espectacular, se obtendrá una distribución diferente en los  $C_p$  y que en ocasiones pueden incrementarlos o disminuirlos.



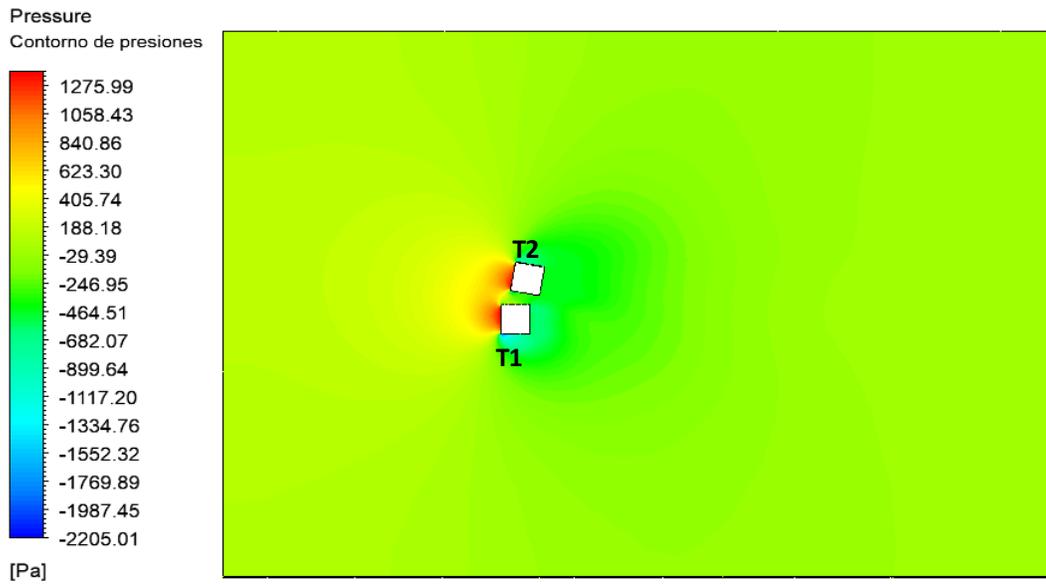
**Posición: 0-1 Barlovento, 1-2 Cubierta, 2-3 Sotavento**

Figura 5.22 Comparación de  $C_p$  en Torre 1 para simulación con 1 edificio y con 2 edificios obtenidos mediante CFD.

En la figura 5.23 se observa el efecto que existe entre la presión y la velocidad dentro de un flujo para satisfacer el teorema de Bernoulli, donde a mayor velocidad se tendrá una menor presión y a menor velocidad se tendrá mayor presión. Lo anterior se aprecia al momento en que el fluido está próximo a impactar a la estructura, donde la velocidad del aire disminuye generando un aumento de presión para equilibrar el sistema.



Campo de velocidades



Contorno de presiones

Figura 5.23 Campo de velocidades y contorno de presiones para modelo de Torre 1 y 2.

- **Torres 1, 2 y 3**

En este caso la torre 3 se coloca por detrás de la torre 1 del caso estudiado en el inciso anterior. En esta simulación de las tres torres no se observó ningún incremento en los  $C_p$ , sin embargo, si existe un cambio notable en la distribución de los  $C_p$  para la torre 3 (ver figura 5.24), pues para esta simulación donde la incidencia del viento es de  $0^\circ$ , el flujo de viento no impacta directamente a la torre 3 porque se encuentra ubicada por detrás de la torre 1.

En la figura 5.25 se presentan los coeficientes de presión ( $C_p$ ) alrededor de las torres 1, 2 y 3 siguiendo la trayectoria señalada (anillo vertical central), después de realizar esta simulación donde se incluyeron 3 torres y en donde el ángulo de incidencia del viento es igual a  $0^\circ$ , se observa que los coeficientes de presión para cada torre son diferentes debido al efecto que causan los edificios aledaños lo que provoca que el flujo de viento se interrumpa y cambie su dirección y velocidad, generando que en el muro a barlovento de la torre 3 se presenten coeficientes de presión negativos.

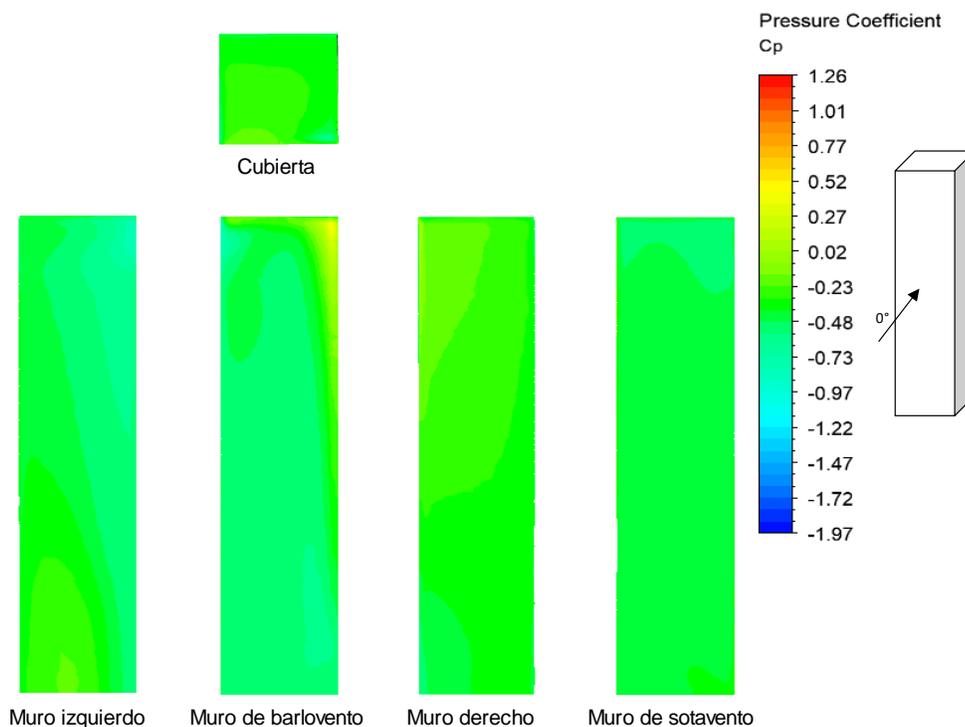
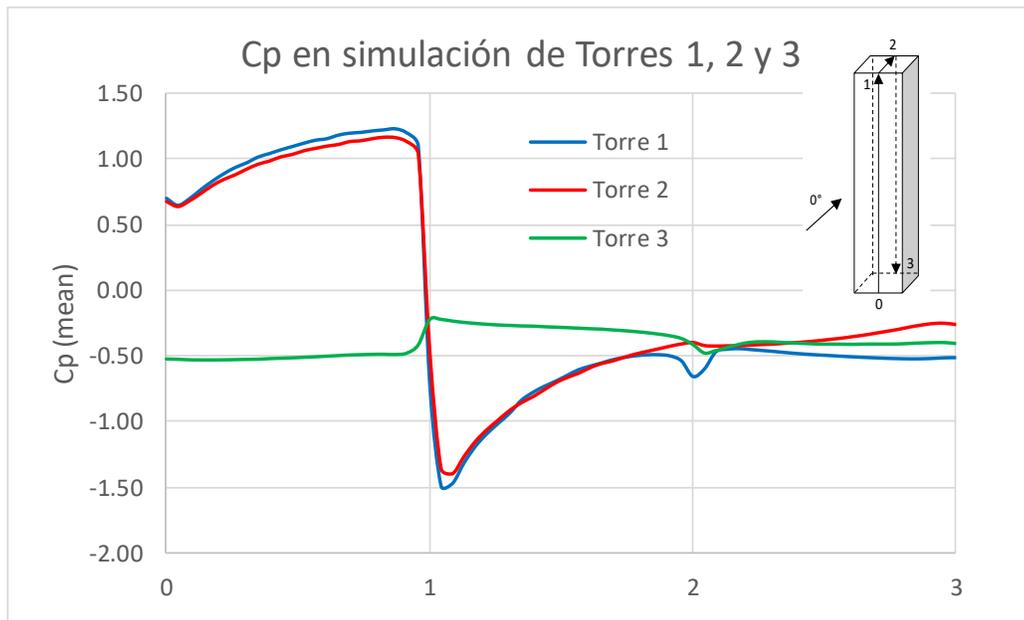


Figura 5.24 Contorno de coeficientes de presión de la Torre 3 para modelo de Torres 1, 2 y 3.



**Posición: 0-1 Barlovento, 1-2 Cubierta, 2-3 Sotavento**

Figura 5.25 Comparación de  $C_p$  en Torre 1, 2 y 3 para simulación con 3 edificios obtenidos mediante CFD.

En la figura 5.26 se muestra el campo de velocidades para el modelo de torre 1, 2 y 3 en donde se observa que el desprendimiento del flujo en la esquina derecha de la torre 1 provoca un cambio en la dirección del flujo evitando que el viento impacte directamente en la torre 3, además en la figura 5.27 se observa el desprendimiento de vórtices generados por el desprendimiento de la capa límite principalmente en la parte del flujo abajo (*downstream*) y en los muros laterales de las torres.

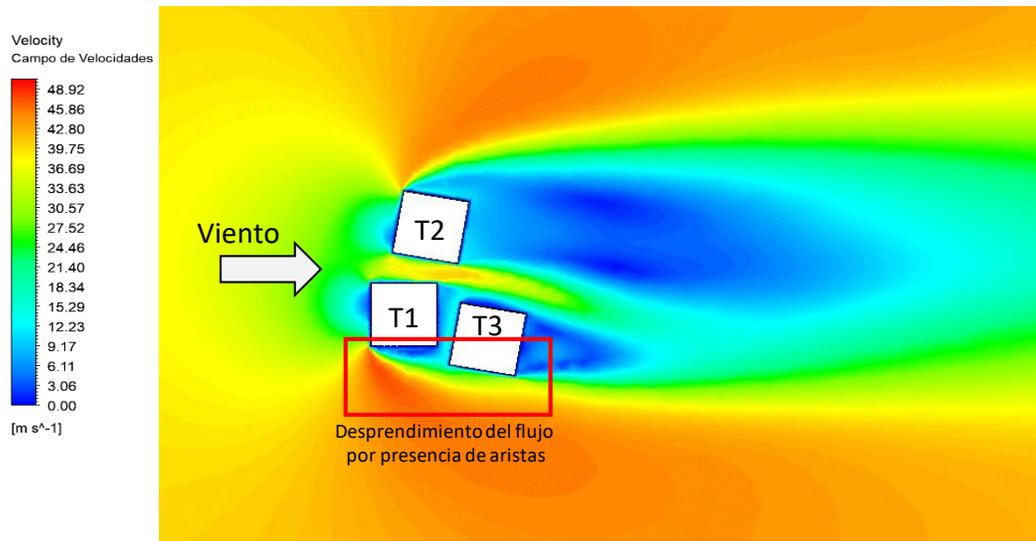


Figura 5.26 Campo de velocidades para modelo de Torre 1, 2 y 3.

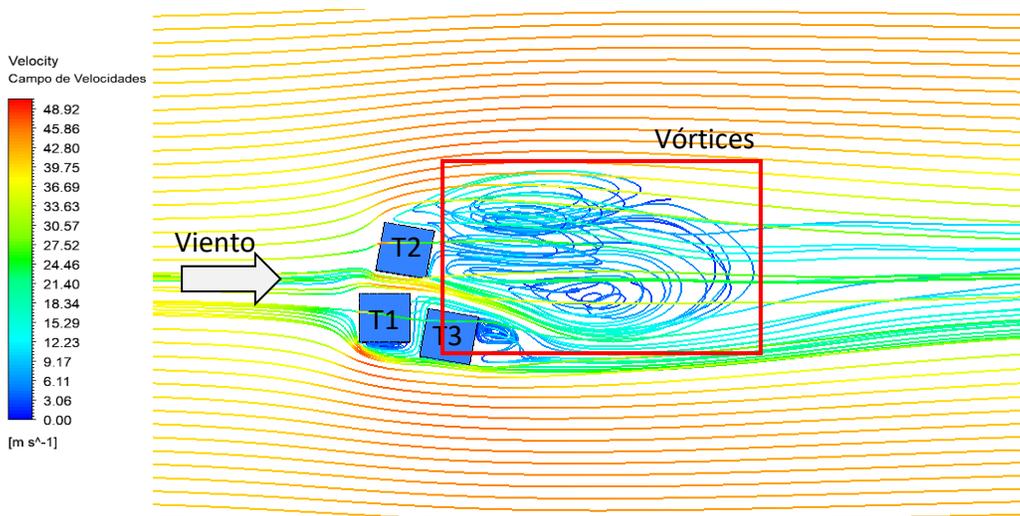


Figura 5.27 Líneas de flujo y desprendimiento de vórtices en modelo de Torre 1, 2 y 3.

- **Conjunto de Torres (1, 2, 3 y 4)**

Para presentar los resultados obtenidos del último modelo (conjunto de cuatro torres) se realizaron tres simulaciones con diferentes grados de incidencia del viento para así observar en qué dirección del viento se produce el escenario más desfavorable.

Como se mencionó antes, el flujo de viento a la entrada se representó con un perfil de viento logarítmico, con una velocidad media de 37.9 m/s para una categoría de terreno 1 y el tipo de análisis que se empleó para la simulación es un estado estacionario del fluido, es decir, las condiciones de temperatura, densidad y velocidad no varían con el tiempo.

En la figura 5.28 se presentan los perfiles de viento simulados con CFD para el modelo del conjunto de torres a diferentes distancias desde el plano de entrada (inlet), en donde se muestra el comportamiento y desarrollo del perfil de viento hasta el momento de impacto con el área de interés.

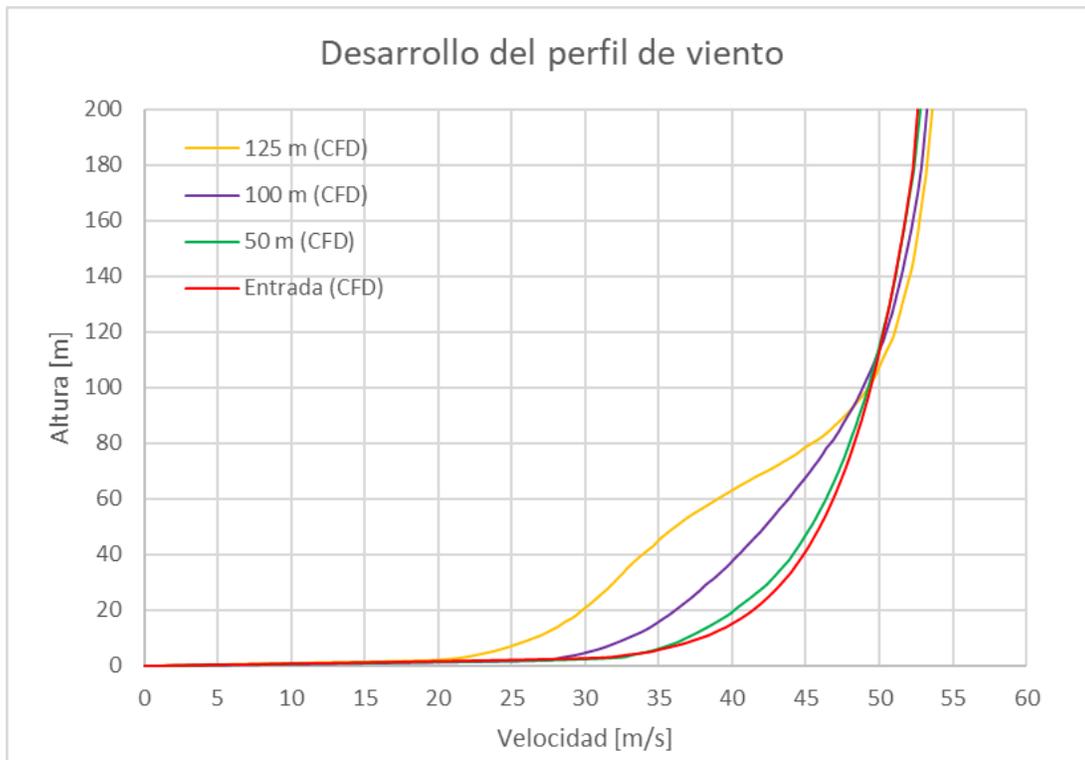
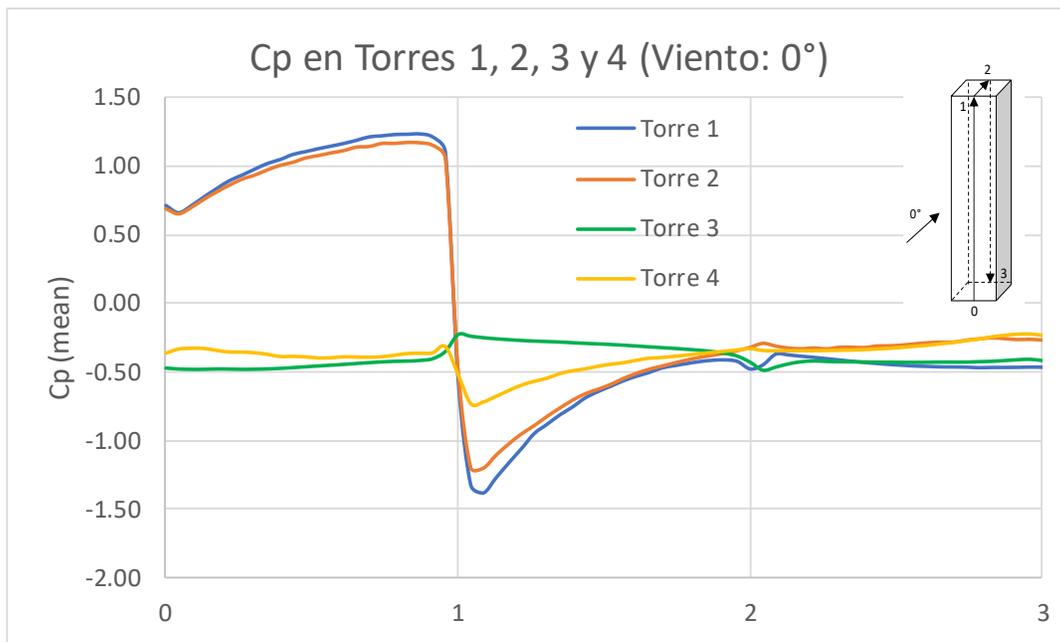


Figura 5.28 Desarrollo del perfil de viento para modelo de conjunto de 4 torres.

En la figura 5.29 se comparan los coeficientes de presión de cada torre para la simulación que incluye los 4 edificios (incidencia del viento:  $0^\circ$ ), en esta gráfica se observa una notable dispersión en los coeficientes de presión debido al efecto de las edificaciones aledañas, provocando que el flujo del viento genere cambios en su dirección; afectando la fuerza del viento que impacta a las estructuras (ver figura 5.30). Por ejemplo, en las torres 3 y 4 el flujo de viento no impacta directamente en los muros de barlovento debido a que se encuentran ubicados atrás de las torres 1 y 2, lo que provoca que no se generen presiones positivas.



**Posición: 0-1 Barlovento, 1-2 Cubierta, 2-3 Sotavento**

Figura 5.29 Comparación de  $C_p$  en Torre 1, 2, 3 y 4 para simulación con 4 edificios obtenidos mediante CFD.

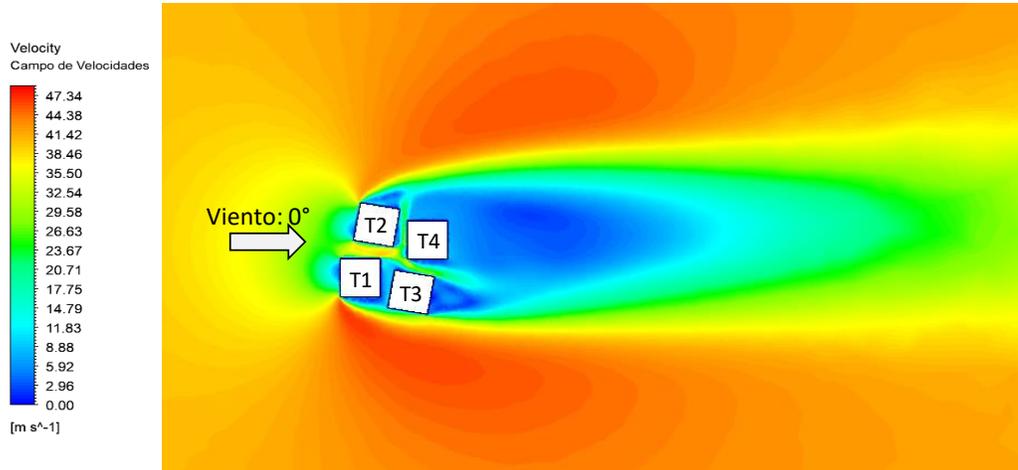
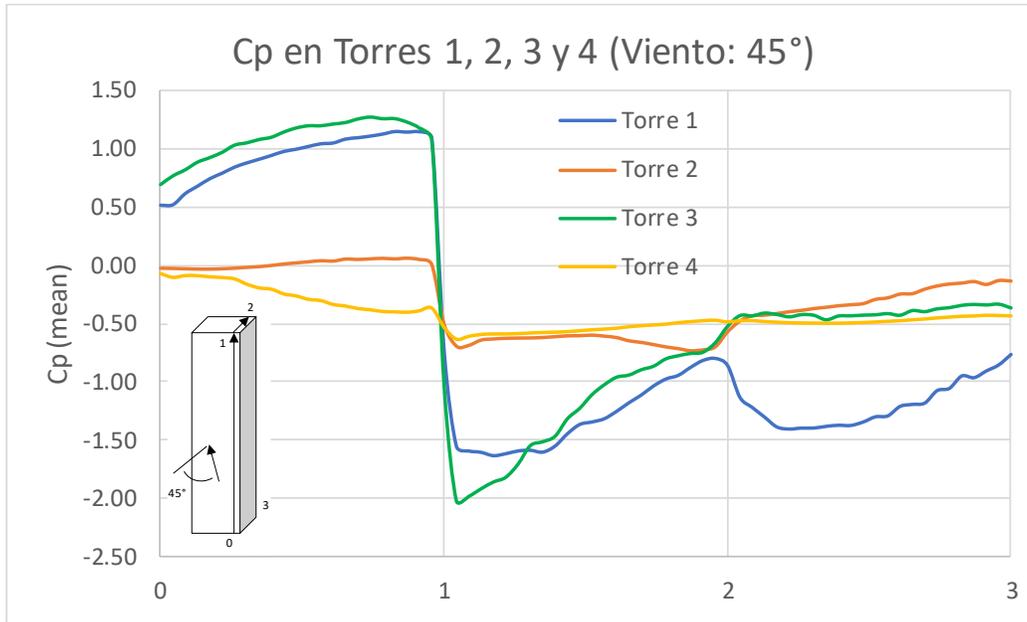


Figura 5.30 Campo de velocidades para modelo de conjunto de 4 Torres (Viento: 0°).

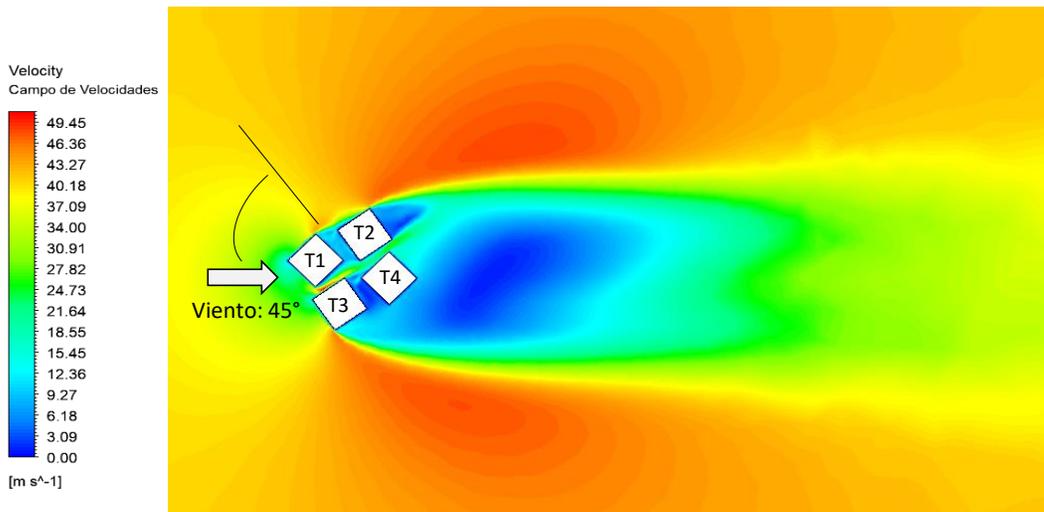
En la figura 5.31 se comparan de igual manera los coeficientes de presión de las torres 1, 2, 3 y 4 pero en esta ocasión con una incidencia del viento de 45° y siguiendo la trayectoria de un anillo vertical en la esquina derecha de cada torre, donde se presenta un  $C_{p_{m\acute{a}x}} = 1.28$  lo que significó un incremento del 4% comparado con el obtenido en la primera simulación (modelo de torre 1).

Al observar la figura 5.32, se muestra un comportamiento totalmente diferente debido a un cambio en la dirección del viento; ahora con un ángulo de incidencia igual a 45°. Para esta simulación se presentó un incremento en la velocidad máxima del 4.4% comparada con la simulación a 0° de incidencia del viento, debido a la orientación con la que la torre 1 recibe la corriente de viento, ya que se ha observado que, en las simulaciones anteriores la velocidad incrementa cuando hay un desprendimiento de corriente provocado por algún obstáculo.



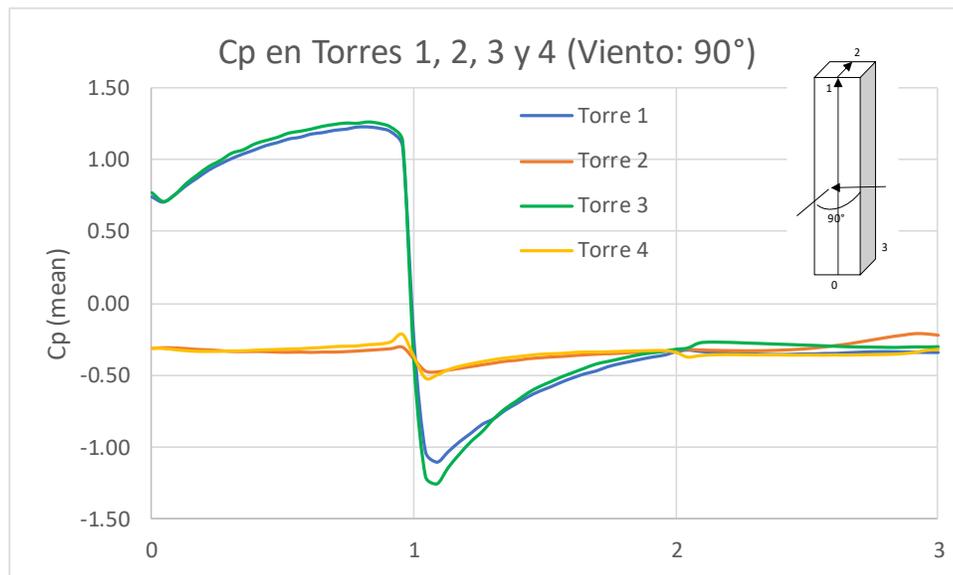
**Posición: 0-1 Barlovento, 1-2 Cubierta, 2-3 Sotavento**

*Figura 5.31 Comparación de Cp en esquina derecha de Torres 1, 2, 3 y 4 para simulación con 4 edificios obtenidos mediante CFD.*



*Figura 5.32 Campo de velocidades para modelo de conjunto de 4 Torres (Viento:45°).*

En la figura 5.33 se comparan los  $C_p$  obtenidos del modelo de 4 torres con una incidencia del viento igual a  $90^\circ$  siguiendo la trayectoria indicada (anillo vertical central). Para esta simulación se presentó un  $C_{p_{\text{máx}}} = 1.27$ , lo que significa un incremento del 3.2% comparado con la simulación en donde solo se modelo una torre. Esto significa que la distribución de los  $C_p$  y las magnitudes en las presiones de cada una de las torres dependen de factores como la geometría de los edificios, los edificios cercanos que afectan el flujo del viento y la dirección o incidencia del viento. También, el flujo de viento tendrá un comportamiento diferente debido a la distribución y orientación de cada torre (ver figura 5.34).



**Posición: 0-1 Barlovento, 1-2 Cubierta, 2-3 Sotavento**

*Figura 5.33 Comparación de  $C_p$  en esquina derecha de Torres 1, 2, 3 y 4 para simulación con 4 edificios (Viento:  $90^\circ$ ) obtenidos mediante CFD.*

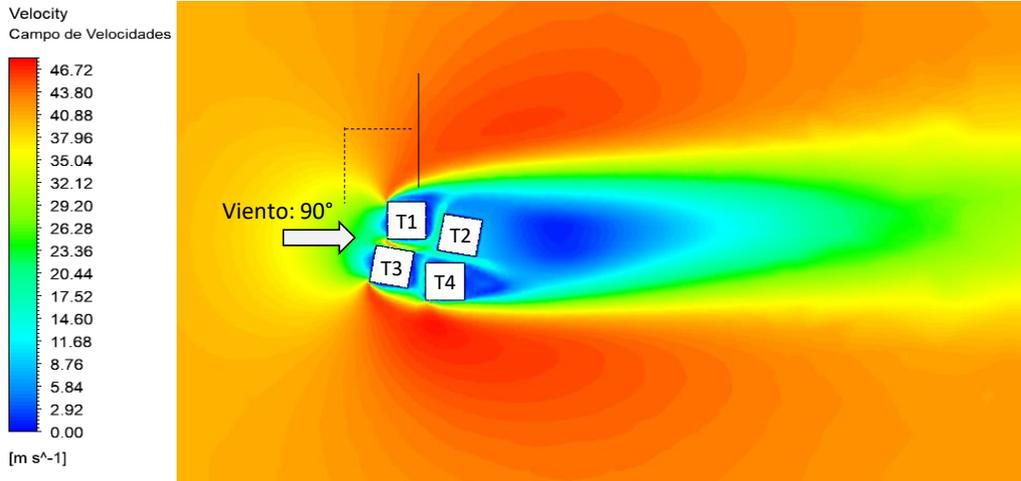
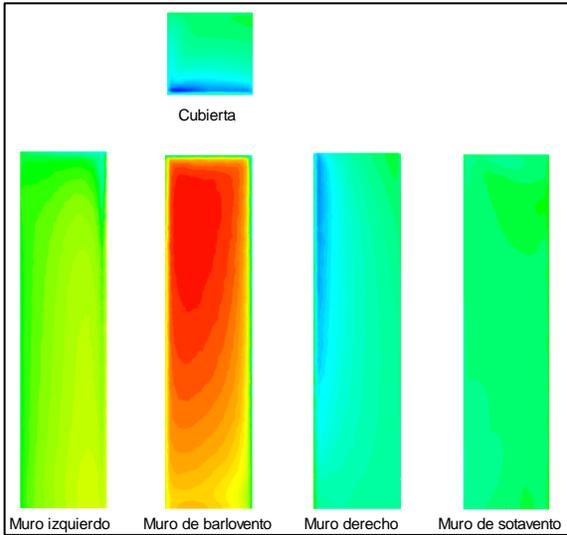


Figura 5.34 Campo de velocidades para modelo de conjunto de 4 Torres (Viento:90°).

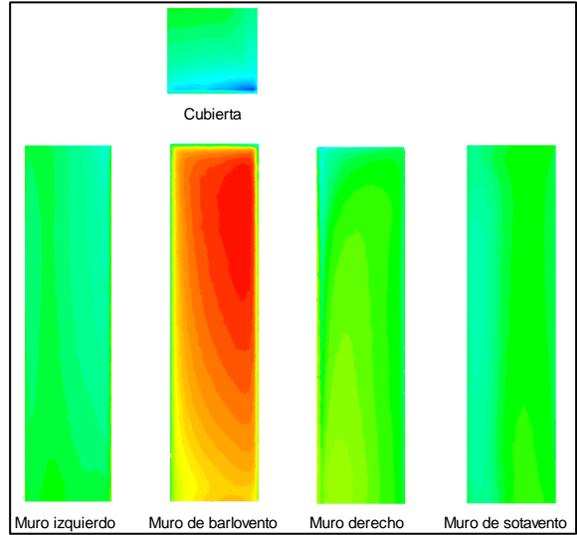
A continuación, se presentan los contornos de coeficientes de presión para los modelos de las 4 torres con diferentes grados de incidencia del viento, de esta manera se observa con mayor detalle el comportamiento en la distribución de los coeficientes de presión para cada uno de los muros de cada torre, también se presentan en formato de tablas los coeficientes de presión medios de cada entrepiso para cada torre (ver ANEXO B). Con ayuda de estos contornos de coeficientes de presión se puede obtener las fuerzas de viento que impactan a la estructura (edificio) y que son utilizadas para el diseño de elementos estructurales y fachadas de cada una de las torres analizadas.

- Incidencia del viento: 0°

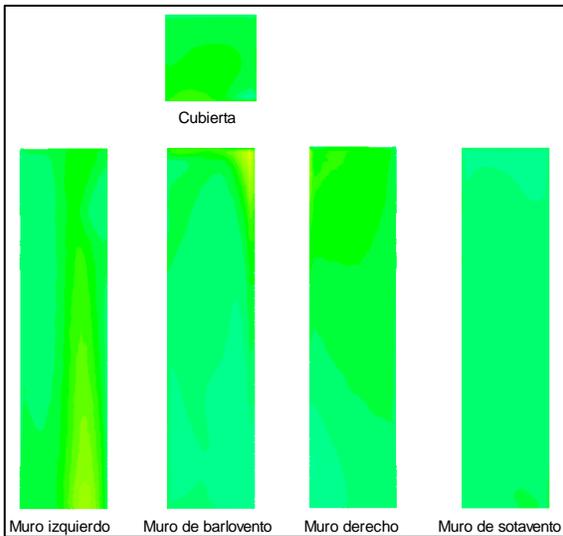
Contornos de coeficientes de presión para modelo de conjunto de edificios (Incidencia: 0°)



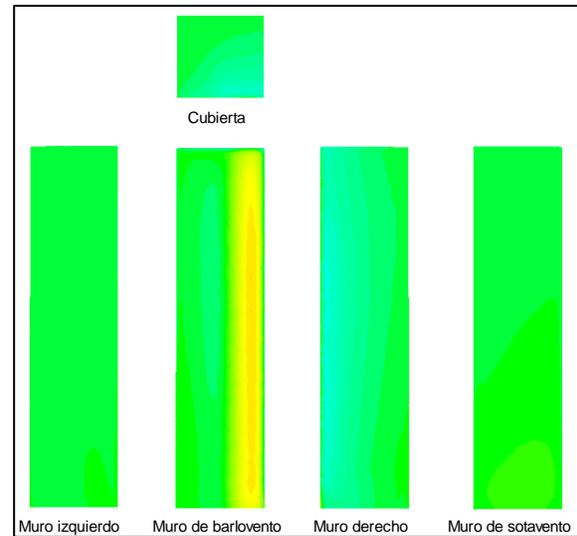
Torre 1



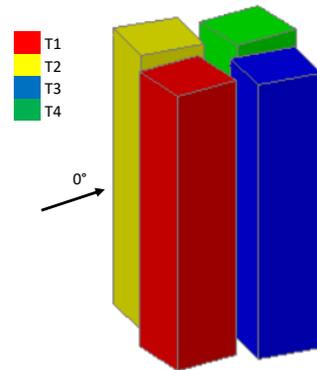
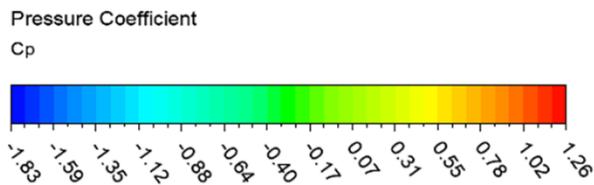
Torre 2



Torre 3

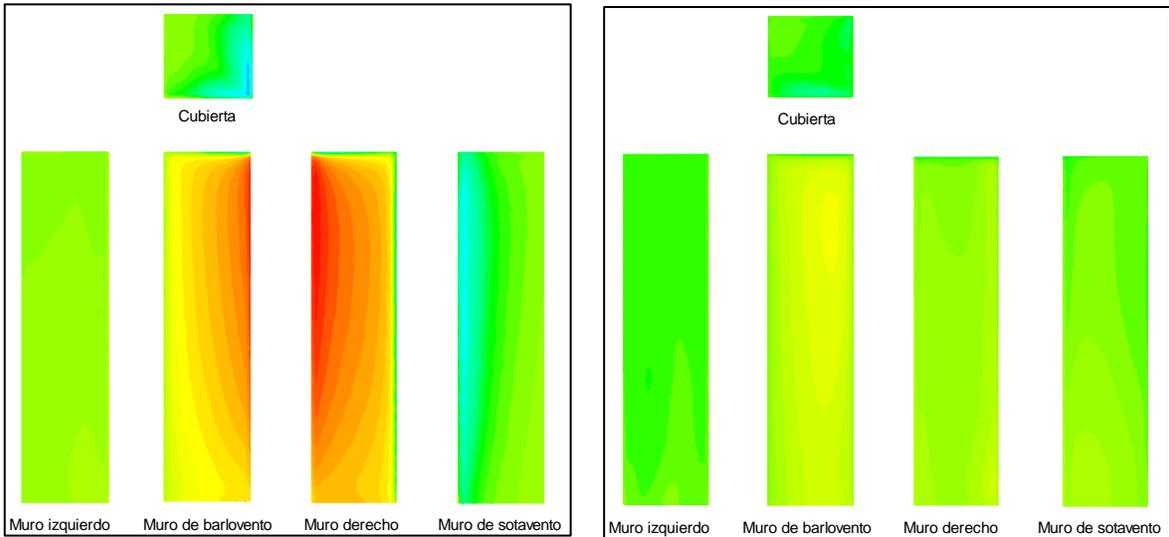


Torre 4



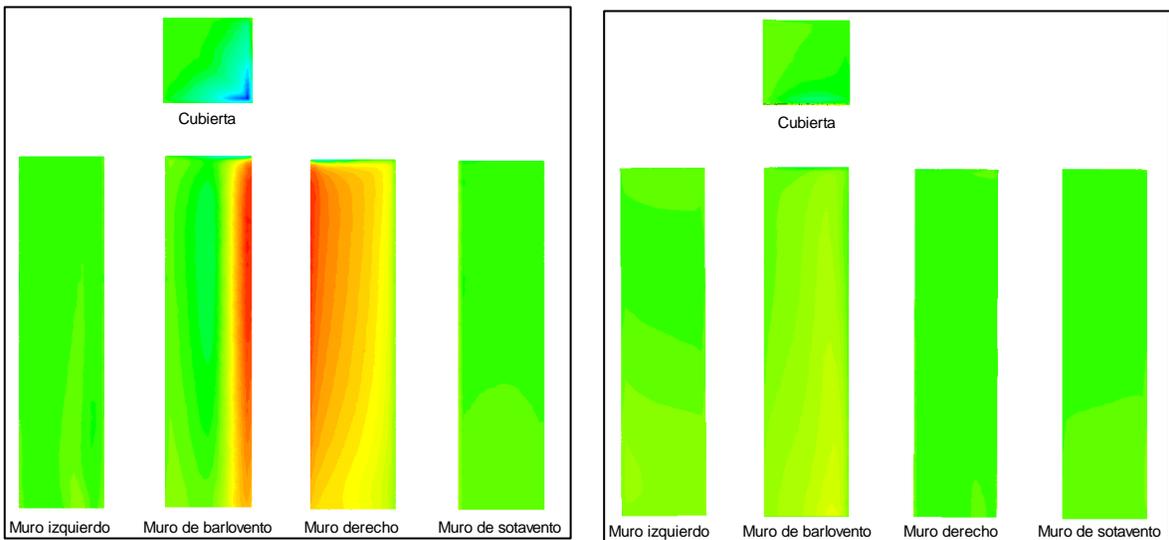
- Incidencia del viento: 45°

Contornos de coeficientes de presión para modelo de conjunto de edificios (Incidencia: 45°)



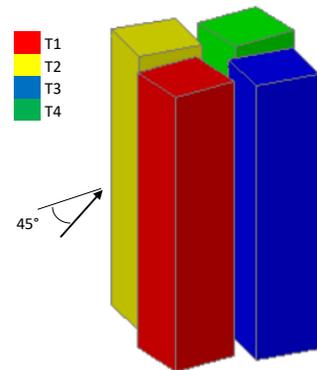
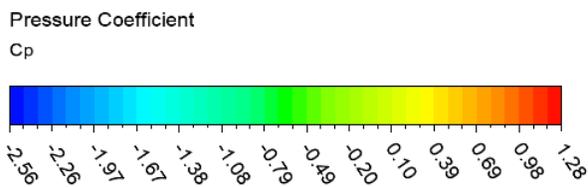
Torre 1

Torre 2



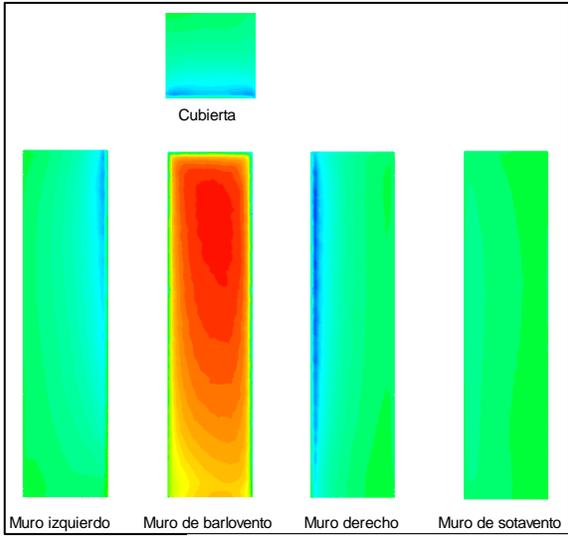
Torre 3

Torre 4

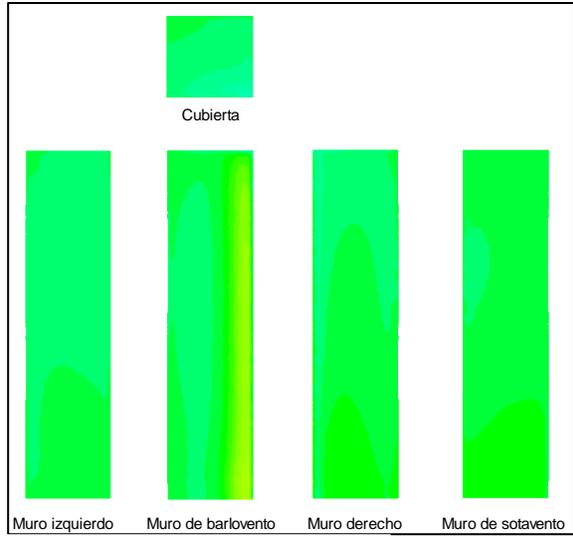


- Incidencia del viento: 90°

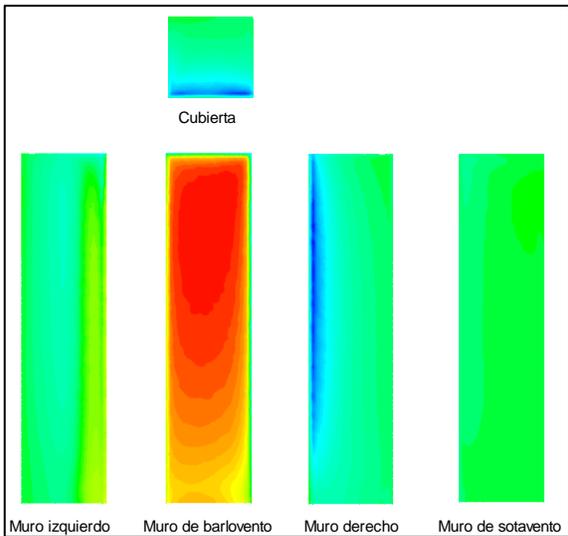
Contornos de coeficientes de presión para modelo de conjunto de edificios (Incidencia: 90°)



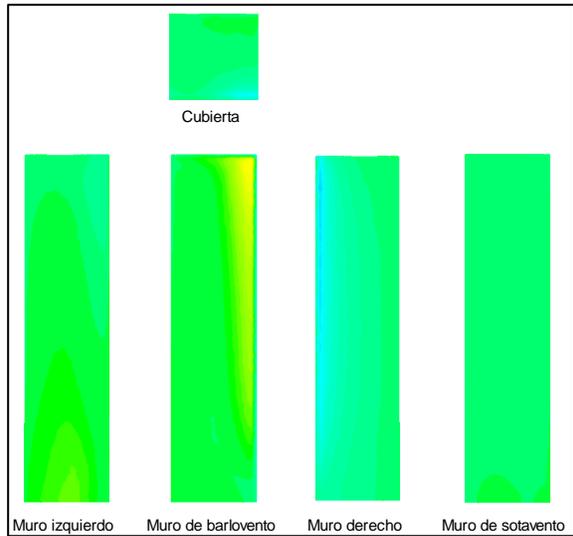
Torre 1



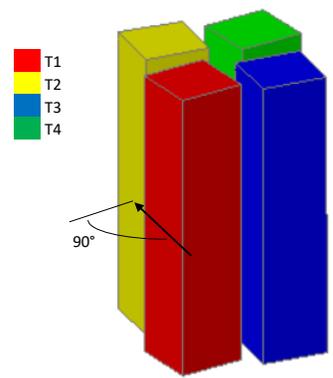
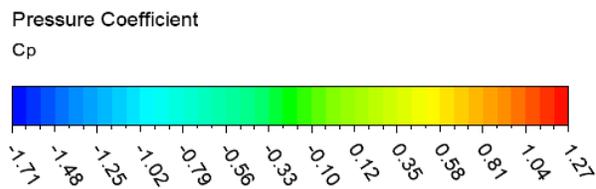
Torre 2



Torre 3



Torre 4



Los resultados de cada una de las simulaciones muestran de manera gráfica el comportamiento en la distribución de los coeficientes de presión para cada torre, siendo la simulación con una incidencia del viento de 45° la más desfavorable y en la que se presentó un  $C_{p_{máx}}=1.28$  y un  $C_{p_{mín}}= -2.56$  comparado con las demás simulaciones. Con base en lo anterior, las fuerzas de viento que deben de ser consideradas para el análisis de la estructura son las generadas por el escenario más desfavorable que corresponde al modelo de las 4 torres en conjunto, con una incidencia del viento igual a 45°.

## Conclusiones y recomendaciones

En la Ingeniería Civil el estudio y análisis de cargas que impactan en una estructura forman parte esencial para el diseño estructural con el objetivo de proporcionar mayor seguridad a las edificaciones; por lo tanto, las fuerzas del viento que inciden en todo tipo de estructuras deben ser consideradas en el proceso de diseño estructural. En la actualidad, se recomienda realizar estudios de viento en túneles de viento de CLA o en nuestro caso, utilizando la dinámica de fluidos computacional (CFD en inglés) y la implementación de modelos numéricos que permiten realizar análisis de distintos fluidos como el aire.

De esta forma, se utilizó la herramienta de CFD para obtener los coeficientes de presión medios relacionados a una velocidad media de cada una de las torres descritas a lo largo del presente trabajo, mismos que servirán posteriormente para realizar un diseño estructural por viento de cada edificio, además estos coeficientes de presión son útiles para el diseño de fachadas y acabados exteriores.

Al comparar los coeficientes de presión obtenidos con CFD contra los coeficientes de presión establecidos en la normativa MDOCV DV, 2008 (ver figura 5.17) se observa una considerable dispersión de datos principalmente en la zona de barlovento y en zonas de desprendimiento de corriente debido a que, en las distintas normativas estos valores recomendados provienen en su mayoría de aproximaciones conservadoras de valores medidos en pruebas experimentales, por lo que se presenta una envolvente de estos valores.

Además, el efecto que causan las estructuras aledañas sobre el edificio que se está estudiando resulta ser un factor muy relevante en el análisis de cargas por viento y que en las distintas normativas y manuales de diseño por viento no se consideran. Estas estructuras aledañas provocan un cambio de velocidad en el viento dando como resultado diferentes coeficientes de presión; esto se observa al comparar los  $C_p$  obtenidos de la simulación en donde solo se modeló una torre contra los obtenidos cuando se tienen dos torres (ver figura 5.22) en donde se presentó un incremento en el  $C_{p_{máx}}$  del 2.5%, por lo tanto, es necesario que al realizar estudios de viento se representen aquellos edificios o estructuras que afecten considerablemente el flujo de viento para obtener resultados más aproximados a la realidad.

Por último, para realizar modelos en CFD y obtener resultados aproximados a la realidad se recomienda lo siguiente:

- Representar el perfil vertical de viento considerando la variación de la velocidad con la altura, la turbulencia, la caracterización del tipo de terreno o ya sea, haciendo uso de la ley logarítmica o de potencia.
- La discretización del modelo en elementos finitos resulta ser una tarea compleja, ya que de esto dependerá obtener una solución más realista, disminuyendo los errores que pudieran presentarse, por lo que es necesario tener sensibilidad en el proceso de enmallado.
- Es posible disminuir recursos computacionales al reducir el dominio computacional, siempre y cuando no se presenten cambios considerables en los coeficientes de presión.
- Se sugiere realizar estudios de viento con una incidencia del viento a cada  $10^\circ$  para obtener el escenario más desfavorable y disminuir incertidumbres sobre el comportamiento de las estructuras.
- La dinámica de fluidos computacional no sustituye ningún método de análisis existente; sin embargo, puede ser utilizada para estudiar los efectos del viento en las estructuras y complementarlo con estudios en túnel de viento y/o resultados experimentales.

## Referencias

**Gallegos, A.** (2017). *Cap. 9 Flujo viscoso externo*. En Mecánica de Fluidos. Departamento de ingeniería mecánica. F.I.M.E.E.

**White Frank M.** (2008). *Mecánica de fluidos (6 edición)*. México: Mc GRAW-HILL.

**Cruz, M.** (2009). *La respuesta inducida por el viento turbulento y su tratamiento en las recomendaciones contenidas en reglamentos*. Tesis de posgrado. México. Universidad Nacional Autónoma de México.

**Versteeg, H. K., & Malalasekera, W.** (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Harlow: Pearson Prentice Hall.

**Ferziger, J. H., & M., P.** (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. New York: Springer.

**Comisión Federal de Electricidad** (2008). *Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento*. Ciudad de México.

**Guevara, J.** (2013). Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica. *Revista Terra*, 46, 81–101.

**Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., & Carissimo, B.** (2007). *Best Practice Guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment*. Alemania: COST Office.

**Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., & Shirasawa, T.** (2008). *AJG guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings*. Elsevier: Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics.

**Agerneh, K., & Girma, T.** (2013). Computational evaluation of wind loads on buildings: a review. *Wind and structures*, 16, No. 6, 629-660.

## ANEXO A

- Función Definida del Usuario (UDF) del Perfil vertical de viento LOG., en lenguaje .C+ (Autor: Raúl Sánchez García, Investigador del IIUNAM).

```

/*****
*****
UDF: para especificar un perfil de viento con Ley Logaritmica en la
frontera
Por: RAUL SANCHEZ GARCIA [RsanchezG@iingen.unam.mx]
*****
*****/

#include "udf.h"

#define Ufricc 2.04
#define VKC 0.41
#define z0 0.005

/* Perfil Logaritmico para velocidad en x */

DEFINE_PROFILE(U_Log,t,i)
{
    real x[ND_ND];
    real z;
    face_t f;

    begin_f_loop(f,t)
    {
        F_CENTROID(x,f,t);
        z = x[2];

        F_PROFILE(f,t,i) = (Ufricc / VKC) * log ((z+z0)/z0);
    }
    end_f_loop(f,t)
}

```

## ANEXO B

- Tablas: Coeficientes de presión para cada nivel (entrepiso) en muros de barlovento, cubierta y muros de sotavento.

	z [m]	Velocidad [m/s]	Cp (medios)				$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	q <sub>z</sub> [Pa]	
			Barlovento	Sotavento	x [m]	Cubierta			
TORRE 1 (Incidencia del viento: 0°)	PB	4	29.38	0.66	-0.47			1.225	1077.88
	P1	7.5	32.14	0.74	-0.47				
	P2	11	33.82	0.8	-0.48	1	-1.33		
	P3	14.5	35.03	0.87	-0.48				
	P4	18	35.98	0.92	-0.47	3	-1.17		
	P5	21.5	36.76	0.97	-0.47				
	P6	25	37.43	1.02	-0.47	5	-0.89		
	P7	28.5	38	1.06	-0.47				
	P8	32	38.51	1.09	-0.46	7	-0.7		
	P9	35.5	38.97	1.11	-0.45				
	P10	39	39.38	1.14	-0.45	9	-0.57		
	P11	42.5	39.76	1.16	-0.44				
	P12	46	40.11	1.18	-0.43	11	-0.48		
	P13	49.5	40.43	1.21	-0.42				
	P14	53	40.73	1.21	-0.41	13	-0.43		
	P15	56.5	41.01	1.22	-0.4				
	P16	60	41.27	1.23	-0.39	15	-0.43		
	P17	63.5	41.52	1.21	-0.38				
	P18	67	41.76	1.09	-0.46				
P19	70	41.95	-0.55	-0.49					

	z [m]	Velocidad [m/s]	Cp (medios)				$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	q <sub>z</sub> [Pa]	
			Barlovento	Sotavento	x [m]	Cubierta			
TORRE 2 (Incidencia del viento: 0°)	PB	4	29.38	0.65	-0.26			1.225	1077.88
	P1	7.5	32.14	0.72	-0.25				
	P2	11	33.82	0.79	-0.25	1	-1.2		
	P3	14.5	35.03	0.84	-0.26				
	P4	18	35.98	0.9	-0.27	3	-1.03		
	P5	21.5	36.76	0.93	-0.29				
	P6	25	37.43	0.98	-0.29	5	-0.83		
	P7	28.5	38	1.01	-0.3				
	P8	32	38.51	1.04	-0.31	7	-0.66		
	P9	35.5	38.97	1.06	-0.31				
	P10	39	39.38	1.09	-0.31	9	-0.55		
	P11	42.5	39.76	1.11	-0.33				
	P12	46	40.11	1.13	-0.32	11	-0.46		
	P13	49.5	40.43	1.14	-0.33				
	P14	53	40.73	1.16	-0.33	13	-0.4		
	P15	56.5	41.01	1.16	-0.33				
	P16	60	41.27	1.17	-0.33	15	-0.35		
	P17	63.5	41.52	1.15	-0.32				
	P18	67	41.76	1.05	-0.3				
P19	70	41.95	-0.48	-0.32					

	z [m]	Velocidad [m/s]	Cp (medios)				$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	q <sub>z</sub> [Pa]	
			Barlovento	Sotavento	x [m]	Cubierta			
TORRE 3 (Incidencia del viento: 0°)	PB	4	29.38	-0.49	-0.42			1.225	1077.88
	P1	7.5	32.14	-0.49	-0.42				
	P2	11	33.82	-0.49	-0.43	1	-0.25		
	P3	14.5	35.03	-0.48	-0.43				
	P4	18	35.98	-0.49	-0.43	3	-0.27		
	P5	21.5	36.76	-0.49	-0.43				
	P6	25	37.43	-0.48	-0.44	5	-0.29		
	P7	28.5	38	-0.48	-0.44				
	P8	32	38.51	-0.47	-0.44	7	-0.3		
	P9	35.5	38.97	-0.47	-0.44				
	P10	39	39.38	-0.46	-0.43	9	-0.31		
	P11	42.5	39.76	-0.45	-0.43				
	P12	46	40.11	-0.44	-0.43	11	-0.33		
	P13	49.5	40.43	-0.44	-0.43				
	P14	53	40.73	-0.43	-0.43	13	-0.35		
	P15	56.5	41.01	-0.43	-0.43				
	P16	60	41.27	-0.42	-0.44	15	-0.39		
	P17	63.5	41.52	-0.41	-0.47				
	P18	67	41.76	-0.36	-0.49				
P19	70	41.95	-0.23	-0.44					

	z [m]	Velocidad [m/s]	Cp (medios)				$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	q <sub>z</sub> [Pa]	
			Barlovento	Sotavento	x [m]	Cubierta			
TORRE 4 (Incidencia del viento: 0°)	PB	4	29.38	-0.33	-0.22			1.225	1077.88
	P1	7.5	32.14	-0.33	-0.23				
	P2	11	33.82	-0.34	-0.24	1	-0.74		
	P3	14.5	35.03	-0.35	-0.26				
	P4	18	35.98	-0.35	-0.27	3	-0.64		
	P5	21.5	36.76	-0.37	-0.29				
	P6	25	37.43	-0.38	-0.3	5	-0.55		
	P7	28.5	38	-0.39	-0.31				
	P8	32	38.51	-0.4	-0.32	7	-0.48		
	P9	35.5	38.97	-0.39	-0.33				
	P10	39	39.38	-0.41	-0.33	9	-0.44		
	P11	42.5	39.76	-0.39	-0.34				
	P12	46	40.11	-0.39	-0.34	11	-0.4		
	P13	49.5	40.43	-0.39	-0.35				
	P14	53	40.73	-0.39	-0.35	13	-0.37		
	P15	56.5	41.01	-0.38	-0.35				
	P16	60	41.27	-0.37	-0.35	15	-0.34		
	P17	63.5	41.52	-0.36	-0.35				
	P18	67	41.76	-0.32	-0.35				
P19	70	41.95	-0.52	-0.33					

	z [m]	Velocidad [m/s]	Cp (medios)				$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	q <sub>z</sub> [Pa]	
			Barlovento	Sotavento	x [m]	Cubierta			
TORRE 1 (Incidencia del viento: 45°)	PB	4	29.38	0.52	-0.85			1.225	1077.88
	P1	7.5	32.14	0.68	-0.96				
	P2	11	33.82	0.74	-0.95	1	-1.55		
	P3	14.5	35.03	0.79	-1.05				
	P4	18	35.98	0.84	-1.07	3	-1.63		
	P5	21.5	36.76	0.87	-1.18				
	P6	25	37.43	0.91	-1.19	5	-1.58		
	P7	28.5	38	0.94	-1.21				
	P8	32	38.51	0.97	-1.29	7	-1.44		
	P9	35.5	38.97	0.99	-1.3				
	P10	39	39.38	1.02	-1.34	9	-1.31		
	P11	42.5	39.76	1.04	-1.37				
	P12	46	40.11	1.05	-1.37	11	-1.11		
	P13	49.5	40.43	1.08	-1.38				
	P14	53	40.73	1.09	-1.39	13	-0.94		
	P15	56.5	41.01	1.12	-1.4				
	P16	60	41.27	1.14	-1.38	15	-0.8		
	P17	63.5	41.52	1.14	-1.3				
	P18	67	41.76	1.09	-1.13				
P19	70	41.95	-0.73	-0.86					

	z [m]	Velocidad [m/s]	Cp (medios)				$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	q <sub>z</sub> [Pa]	
			Barlovento	Sotavento	x [m]	Cubierta			
TORRE 2 (Incidencia del viento: 45°)	PB	4	29.38	-0.03	-0.14			1.225	1077.88
	P1	7.5	32.14	-0.04	-0.15				
	P2	11	33.82	-0.04	-0.16	1	-0.7		
	P3	14.5	35.03	-0.04	-0.17				
	P4	18	35.98	-0.03	-0.18	3	-0.64		
	P5	21.5	36.76	-0.02	-0.21				
	P6	25	37.43	-0.02	-0.25	5	-0.63		
	P7	28.5	38	-0.01	-0.25				
	P8	32	38.51	0.01	-0.28	7	-0.61		
	P9	35.5	38.97	0.01	-0.3				
	P10	39	39.38	0.02	-0.33	9	-0.61		
	P11	42.5	39.76	0.03	-0.34				
	P12	46	40.11	0.03	-0.35	11	-0.67		
	P13	49.5	40.43	0.05	-0.37				
	P14	53	40.73	0.05	-0.39	13	-0.72		
	P15	56.5	41.01	0.05	-0.4				
	P16	60	41.27	0.05	-0.42	15	-0.71		
	P17	63.5	41.52	0.05	-0.43				
	P18	67	41.76	0.01	-0.48				
P19	70	41.95	-0.51	-0.58					

	z [m]	Velocidad [m/s]	Cp (medios)				$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	q <sub>z</sub> [Pa]	
			Barlovento	Sotavento	x [m]	Cubierta			
TORRE 3 (Incidencia del viento: 45°)	PB	4	29.38	0.77	-0.33			1.225	1077.88
	P1	7.5	32.14	0.89	-0.33				
	P2	11	33.82	0.93	-0.34	1	-2.02		
	P3	14.5	35.03	0.98	-0.36				
	P4	18	35.98	1.04	-0.37	3	-1.85		
	P5	21.5	36.76	1.06	-0.39				
	P6	25	37.43	1.09	-0.38	5	-1.54		
	P7	28.5	38	1.11	-0.42				
	P8	32	38.51	1.15	-0.41	7	-1.31		
	P9	35.5	38.97	1.19	-0.42				
	P10	39	39.38	1.2	-0.42	9	-1.02		
	P11	42.5	39.76	1.2	-0.43				
	P12	46	40.11	1.22	-0.43	11	-0.89		
	P13	49.5	40.43	1.23	-0.46				
	P14	53	40.73	1.28	-0.42	13	-0.77		
	P15	56.5	41.01	1.27	-0.44				
	P16	60	41.27	1.27	-0.42	15	-0.66		
	P17	63.5	41.52	1.24	-0.4				
	P18	67	41.76	1.08	-0.43				
P19	70	41.95	-1.02	-0.52					

	z [m]	Velocidad [m/s]	Cp (medios)				$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	q <sub>z</sub> [Pa]	
			Barlovento	Sotavento	x [m]	Cubierta			
TORRE 4 (Incidencia del viento: 45°)	PB	4	29.38	-0.1	-0.43			1.225	1077.88
	P1	7.5	32.14	-0.09	-0.43				
	P2	11	33.82	-0.1	-0.43	1	-0.63		
	P3	14.5	35.03	-0.1	-0.44				
	P4	18	35.98	-0.11	-0.45	3	-0.59		
	P5	21.5	36.76	-0.16	-0.46				
	P6	25	37.43	-0.19	-0.46	5	-0.58		
	P7	28.5	38	-0.2	-0.47				
	P8	32	38.51	-0.24	-0.48	7	-0.57		
	P9	35.5	38.97	-0.26	-0.48				
	P10	39	39.38	-0.29	-0.49	9	-0.54		
	P11	42.5	39.76	-0.3	-0.49				
	P12	46	40.11	-0.33	-0.49	11	-0.52		
	P13	49.5	40.43	-0.35	-0.49				
	P14	53	40.73	-0.38	-0.49	13	-0.49		
	P15	56.5	41.01	-0.39	-0.49				
	P16	60	41.27	-0.4	-0.49	15	-0.47		
	P17	63.5	41.52	-0.4	-0.48				
	P18	67	41.76	-0.36	-0.47				
P19	70	41.95	-0.53	-0.48					

	z [m]	Velocidad [m/s]	Cp (medios)				$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	q <sub>z</sub> [Pa]	
			Barlovento	Sotavento	x [m]	Cubierta			
TORRE 1 (Incidencia del viento: 90°)	PB	4	29.38	0.71	-0.34			1.225	1077.88
	P1	7.5	32.14	0.82	-0.34				
	P2	11	33.82	0.87	-0.34	1	-1.04		
	P3	14.5	35.03	0.93	-0.34				
	P4	18	35.98	0.97	-0.34	3	-0.97		
	P5	21.5	36.76	1.01	-0.34				
	P6	25	37.43	1.04	-0.35	5	-0.81		
	P7	28.5	38	1.07	-0.35				
	P8	32	38.51	1.1	-0.35	7	-0.65		
	P9	35.5	38.97	1.12	-0.35				
	P10	39	39.38	1.15	-0.36	9	-0.55		
	P11	42.5	39.76	1.16	-0.36				
	P12	46	40.11	1.18	-0.36	11	-0.47		
	P13	49.5	40.43	1.19	-0.36				
	P14	53	40.73	1.21	-0.35	13	-0.41		
	P15	56.5	41.01	1.23	-0.35				
	P16	60	41.27	1.23	-0.35	15	-0.36		
	P17	63.5	41.52	1.22	-0.34				
	P18	67	41.76	1.09	-0.33				
P19	70	41.95	-0.27	-0.34					

	z [m]	Velocidad [m/s]	Cp (medios)				$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	q <sub>z</sub> [Pa]	
			Barlovento	Sotavento	x [m]	Cubierta			
TORRE 2 (Incidencia del viento: 90°)	PB	4	29.38	-0.31	-0.21			1.225	1077.88
	P1	7.5	32.14	-0.31	-0.22				
	P2	11	33.82	-0.32	-0.23	1	-0.47		
	P3	14.5	35.03	-0.32	-0.24				
	P4	18	35.98	-0.33	-0.26	3	-0.45		
	P5	21.5	36.76	-0.33	-0.27				
	P6	25	37.43	-0.34	-0.28	5	-0.41		
	P7	28.5	38	-0.33	-0.29				
	P8	32	38.51	-0.34	-0.3	7	-0.38		
	P9	35.5	38.97	-0.34	-0.31				
	P10	39	39.38	-0.34	-0.32	9	-0.37		
	P11	42.5	39.76	-0.34	-0.32				
	P12	46	40.11	-0.34	-0.33	11	-0.35		
	P13	49.5	40.43	-0.34	-0.33				
	P14	53	40.73	-0.34	-0.33	13	-0.34		
	P15	56.5	41.01	-0.33	-0.33				
	P16	60	41.27	-0.33	-0.33	15	-0.33		
	P17	63.5	41.52	-0.32	-0.33				
	P18	67	41.76	-0.31	-0.32				
P19	70	41.95	-0.39	-0.32					

	z [m]	Velocidad [m/s]	Cp (medios)				$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	q <sub>z</sub> [Pa]	
			Barlovento	Sotavento	x [m]	Cubierta			
TORRE 3 (Incidencia del viento: 90°)	PB	4	29.38	0.71	-0.3			1.225	1077.88
	P1	7.5	32.14	0.84	-0.31				
	P2	11	33.82	0.9	-0.31	1	-1.21		
	P3	14.5	35.03	0.96	-0.31				
	P4	18	35.98	1	-0.3	3	-1.05		
	P5	21.5	36.76	1.05	-0.3				
	P6	25	37.43	1.07	-0.3	5	-0.8		
	P7	28.5	38	1.11	-0.3				
	P8	32	38.51	1.14	-0.3	7	-0.62		
	P9	35.5	38.97	1.16	-0.29				
	P10	39	39.38	1.19	-0.29	9	-0.51		
	P11	42.5	39.76	1.2	-0.29				
	P12	46	40.11	1.22	-0.28	11	-0.42		
	P13	49.5	40.43	1.24	-0.28				
	P14	53	40.73	1.26	-0.28	13	-0.37		
	P15	56.5	41.01	1.26	-0.27				
	P16	60	41.27	1.27	-0.27	15	-0.33		
	P17	63.5	41.52	1.26	-0.27				
	P18	67	41.76	1.13	-0.31				
P19	70	41.95	-0.42	-0.32					

	z [m]	Velocidad [m/s]	Cp (medios)				$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	q <sub>z</sub> [Pa]	
			Barlovento	Sotavento	x [m]	Cubierta			
TORRE 4 (Incidencia del viento: 90°)	PB	4	29.38	-0.31	-0.33			1.225	1077.88
	P1	7.5	32.14	-0.33	-0.35				
	P2	11	33.82	-0.33	-0.35	1	-0.52		
	P3	14.5	35.03	-0.33	-0.36				
	P4	18	35.98	-0.33	-0.36	3	-0.44		
	P5	21.5	36.76	-0.33	-0.36				
	P6	25	37.43	-0.33	-0.36	5	-0.39		
	P7	28.5	38	-0.33	-0.36				
	P8	32	38.51	-0.32	-0.36	7	-0.36		
	P9	35.5	38.97	-0.32	-0.36				
	P10	39	39.38	-0.32	-0.36	9	-0.35		
	P11	42.5	39.76	-0.32	-0.36				
	P12	46	40.11	-0.31	-0.36	11	-0.34		
	P13	49.5	40.43	-0.31	-0.36				
	P14	53	40.73	-0.3	-0.36	13	-0.33		
	P15	56.5	41.01	-0.3	-0.36				
	P16	60	41.27	-0.29	-0.36	15	-0.33		
	P17	63.5	41.52	-0.28	-0.36				
	P18	67	41.76	-0.22	-0.37				
P19	70	41.95	-0.37	-0.34					