



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias (Estructuras)

**Efectos de vientos extremos en estructuras de poca altura en zona costera.**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de

Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta

Jonathan Francisco Gutiérrez Guzmán

Dirigido por:

Presidente Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Secretario: Dr. Humberto Yáñez Godoy

Vocal: Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández

Suplente: Dr. Enrique Rico García

Suplente: Dr. Juan Bosco Hernández

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Fecha de aprobación por el Consejo Universitario ( )

México

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

## **Dedicatoria**

A mi familia, que han sido y son el pilar fundamental que me motivan para ser mejor día a día.

## **Agradecimientos**

A mis padres quienes, con su amor, cariño, dedicación, paciencia, enseñanzas y todo lo bueno me han hecho el hombre que soy, por la motivación que me brindaron para continuar con mis estudios, sin duda alguna les agradezco por todo su amor sin ustedes papá y mamá no sería posible este trabajo.

A mi hermano, compañero de aventuras, amigo, compadre y todas aquellas palabras amigables que solo nosotros sabemos, quiere permitir este pequeño fragmento para expresar todo el apoyo y no me refiero a lo económico, sino a lo que es invaluable, es decir, la comprensión, el amor, las anécdotas, las aventuras vividas las cuales me han inspirado para poder seguir trabajando y dando lo mejor de mí. sin pensarlo siempre te elegiría nuevamente como hermano.

A mi Esposa e hijo, llegaron justo en el momento indicado a mi vida justo al inicio de este proyecto, y ahora me doy cuenta de que la vida siempre nos tiene grandes sorpresas, pues ustedes dieron esa luz y esperanza para no desertar de mis estudios que más de una vez paso por mi mente debido a la complejidad del momento. Quiero que también este trabajo sirva de ejemplo para ti hijo para demostrarte que no existen imposibles, recuerda “*Querer es poder*”.

A mis profesores, quienes con su sabiduría, experiencia y conocimientos compartidos permitieron ampliar mi entendimiento en esta rama de la ingeniería y así poder compartir con ustedes un poco de esta ciencia mediante este trabajo. Dr. Jaime Moisés Horta Rangel, Dr. Humberto Yáñez Godoy, Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández, Dr. Enrique Rico García sumamente agradecido con ustedes.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) y a la Universidad de Bordeaux por el apoyo invaluable brindado en la realización de este proyecto.

## Índice

Índice de Figuras y Tablas .....	7
Abreviaturas y siglas.....	11
Resumen .....	12
Abstract .....	13
I Introducción .....	14
II Fundamentación teórica.....	21
2.1 Característica de los Huracanes.....	21
2.2 Diseño central compuesto .....	22
2.3 Conservación de la masa.....	25
2.4 Conservación de momento.....	26
2.5 Ecuaciones de Navier- Stokes.....	28
2.6 Interacción fluido – estructura .....	30
2.7 Formulación Euleriana y Lagrangiana de los Dominios .....	32
2.8 Arbitrario Lagrangiano-Euleriano (ALE).....	34
2.10 Método de Volumen Finito (FVM) .....	35
2.10.1 Ecuación general de transporte .....	36
2.11 Algoritmo SIMPLE .....	38
2.11 Mallado .....	41
2.11.1 Medida $y^+$ .....	43
2.12 Condiciones de Frontera (BC).....	44
2.12.1 Capa Limite Atmosférica (ABL) .....	45
2.13 Número de Reynolds .....	46
2.14 Métodos numéricos para flujos turbulentos .....	47

2.14.1 Simulación Numérica Directa (DNS) .....	48
2.14.2 Navier Stokes Reynolds Promedio (RANS).....	48
2.14.3 Simulación de grandes remolinos (LES).....	49
2.14.4 Modelo $k - \epsilon$ .....	50
2.15 Procedimiento conforme al manual (CFE 2020).....	52
2.16 Procedimiento conforme al Euro Código .....	54
III Antecedentes.....	56
3.2 Variación en Bordes .....	59
3.3 Geometrías en techos.....	60
3.4 Pretil como una estrategia de mitigación.....	62
3.5 Casas elevadas.....	63
3.6 Investigaciones UAQ.....	64
Hipótesis.....	66
Objetivo general .....	66
Objetivos específicos.....	66
IV Materiales y Métodos.....	68
4.1 Estado del arte .....	69
4.2 Diseño Central Compuesto CCD $2^{k-1}$ .....	69
4.3 Modelo CFD.....	71
4.3.1 Geometría .....	71
4.3.2 Mallado.....	74
4.3.3 Configuración y solución .....	75
V Resultados y discusión .....	77
VI Conclusiones .....	94

6 .1 Expectativas y recomendaciones.....	96
Referencias .....	97

## Índice de Figuras y Tablas

### Capítulo I

Figura 1.1	Pérdida en millones a causa de desastres naturales en la República Mexicana desde el año 2000 a 2021	15
Figura 1.2	Zona de generación de huracanes	15
Figura 1.3	Colapso del puente Takoma Narrows	16
Figura 1.4	Efectos de viento provocado a viviendas elevadas	17
Figura 1.5	Pandeo general por presiones en muro barlovento	18

### Capítulo II

Figura 2.1	Estructura general de un huracán	21
Figura 2.2	Ejemplificación básica de RSM	22
Figura 2.3	Superficies de respuesta A) modelo de primer orden B), C), D), E) y F) modelos de segundo orden	23
Figura 2.4	Representación de la construcción de un CCD para $k=2$ factores	24
Figura 2.5	a) Esquema de un enfoque monolítico b) Y un esquema particionado. Para la interacción fluido- estructura, donde $S_f$ and $S_s$ son las soluciones fluido estructura respectivamente	31
Figura 2.6	Ejemplo a) Malla conformada, b) Malla no conformada	32
Figura 2.7	Dominios y mapeo de la descripción lagrangiana	33
Figura 2.8	Descripción ALE dominios y mapeos	34
Figura 2.9	Discretización del dominio	36
Figura 2.10	Volumen de control de una sección de malla cartesiana	37
Figura 2.11	Tipos de celdas que se pueden emplear para discretizar el dominio	42
Figura 2.12	Valores que permiten definir la calidad del mallado	43
Figura 2.13	Condiciones de frontera	45
Figura 2.14	Representación esquemática del movimiento turbulento	49

### Capítulo III

Figura 3.1	Túnel de viento y modelo a escala	57
Figura 3.2	Prueba de viento a escala real en el laboratorio WOW	57
Figura 3.3	Simulación CFD de una vivienda en software ANSYS FLUENT	57
Figura 3.4	Modificaciones simples de esquinas para modificar la aerodinámica	60
Figura 3.5	Modificaciones más sofisticadas para mejorar la aerodinámica	60
Figura 3.6	Ejemplo de geometrías en techos	61
Figura 3.7	Ejemplo de distintos diseños de pretilas	62
Figura 3.8	Casa anfibia	64

### Capítulo IV

Figura 4.1	Diagrama de flujo de la metodología correspondiente a este trabajo	68
Figura 4.2	Factores que conforman las entradas del CCD	69
Figura 4.3	Diagrama de flujo del procedimiento para una simulación CFD	72
Figura 4.4	Geometría: a) Dimensiones fijas de cada modelo; b) Dimensiones y distancia de pilotes (la distancia es equidistante procurando no exceder los 100 mm de separación)	73
Figura 4.5	Medidas generales para la generación del dominio del flujo; b) Asignación de nombres en fronteras	73
Figura 4.6	Ejemplo de corrida experimental particionada en dos para ahorrar costo computacional	74
Figura 4.7	Características del mallado final para cada una de las corridas. a) Lado izquierdo; b) Lado derecho	75
Figura 4.8	Perfil de velocidad para las simulaciones	76

Figura 4.9	Gráfica de convergencia	76
------------	-------------------------	----

## Capítulo V

Figura 5.1	Simulación 17: a) Contorno de velocidad; b) líneas de corriente; c) contorno de vectores; d) contorno TKE	78
Figura 5.2	Simulación 18: a) Contorno de velocidad; b) líneas de corriente; c) contorno de vectores; d) contorno TKE	79
Figura 5.3	Simulación 25 a) Contorno de velocidad; b) líneas de corriente; c) contorno de vectores; d) contorno TKE	79
Figura 5.4	Simulación 13 con el $C_p$ positivo más grande con un valor de 1.90	80
Figura 5.5	Simulación 19 con el $C_p$ negativo más grande con un valor de -6.5	80
Figura 5.6	Simulación 18 con el $C_p$ negativo menos desfavorable con un valor de -2.02	81
Figura 5.7	Puntos 1 – 5 seleccionados para determinar los $C_p$	82
Figura 5.8	Regresión de punto 1 con $R^2 = 0.8591$	83
Figura 5.9	Regresión de punto 2 con $R^2 = 0.8898$	84
Figura 5.10	Regresión de punto 8 con $R^2 = 0.4999$	84
Figura 5.11	Regresión de punto 4 con $R^2 = 0.8737$	85
Figura 5.12	Regresión de punto 5 con $R^2 = 0.9208$	85
Figura 5.13	Regresión de punto máximo con $R^2 = 0.9632$	86
Figura 5.14	Regresión de punto mínimo con $R^2 = 0.7554$	86
Figura 5.15	Puntos 8-17 seleccionados para determinar $C_p$	87
Figura 5.16	Regresión de punto 8 con $R^2 = 0.8759$	88
Figura 5.17	Regresión de punto 9 con $R^2 = 0.9413$	89
Figura 5.18	Regresión de punto 10 con $R^2 = 0.9313$	89
Figura 5.19	Regresión de punto 11 con $R^2 = 0.9244$	90
Figura 5.20	Regresión de punto 12 con $R^2 = 0.7357$	90
Figura 5.21	Regresión de punto 13 con $R^2 = 0.7074$	91

Figura 5.22	Regresión de punto 14 con $R^2 = 0.9086$	91
Figura 5.23	Regresión de punto 15 con $R^2 = 0.9043$	92
Figura 5.24	Regresión de punto 16 con $R^2 = 0.9419$	92
Figura 5.25	Regresión de punto 17 con $R^2 = 0.7581$	93

## **Capítulo II**

Tabla 2.1	A) Oblicuidad de la celda y B) Ortogonalidad de la celda	43
Tabla 2.2	Categorías del terreno	55

## **Capítulo IV**

Tabla 4.1	Factores a explorar en el CCD	70
Tabla 4.2	Combinaciones del diseño central compuesto	70
Tabla 4.3	Descripción de la relación L/b Propuesta en las geometrías del CCD	71

## **Capítulo V**

Tabla 5.1	Resultados de los valores de $C_p$ y Velocidad de configuraciones del CCD	77
Tabla 5.2	Valores obtenidos de los $C_p$ del punto 1-5	82
Tabla 5.3	Valores obtenidos de $C_p$ del punto 8 - 17	87

## **Abreviaturas y siglas**

ABL acrónimo de Atmospheric Boundary Layer

ALE acrónimo de Arbitrary Lagrangian Eulerian

BC acrónimo de Boundary Conditions

CFD acrónimo de Computational Fluid Dynamics

$C_p$  coeficiente de presión

DNS acrónimo de Direct Numerical Solution

FSI acrónimo de Fluid Structure interaction

FVM acrónimo de Finite Volume Method

LES acrónimo de Large Eddy Simulation

$N_{Re}$  número de Reynolds

RANS acrónimo de Reynolds Averaged Navier Stokes

RSM acrónimo de Response Surface Methodology

SIMPLE acrónimo de Semi- Implicit Method for Pressure- linked Equations

$Y^+$  representa la distancia entre la pared y el primer punto de la malla computacional (en la dirección normal a la pared)

## Resumen

Los huracanes se caracterizan por las grandes velocidades de viento y lluvias torrenciales, representando un peligro para las costas de México, Caribe, E.U, Australia, Japón, China, entre otros, causando grandes pérdidas económico – sociales, por lo que desde un punto de vista de la ingeniería estructural exige construcciones lo suficientemente resistentes a tales efectos. Una estrategia empleada en muchas ciudades costeras del mundo para disminuir los efectos provocados por las inundaciones son las viviendas elevadas, esta estrategia se hizo popular desde hace algunas décadas, sin embargo, la falta de información por parte de la normatividad internacional ante los efectos de viento al elevar las viviendas ha provocado graves daños a este tipo de estructuras ante el paso de huracanes. Estadísticamente uno de los sectores más afectados durante el paso de huracanes es el sector de viviendas. Actualmente los huracanes son más frecuentes e intensos debido al calentamiento global es por ello por lo que buscar alternativas de mitigación ante los efectos provocados por el viento a las construcciones de poca altura ha llamado la atención de investigadores y departamentos gubernamentales de todo el mundo. Esta investigación hace uso de la Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD por sus siglas en inglés) para comprender el desempeño de las casas elevadas y no elevadas sujetas a efectos de viento en zona costera. Para este estudio se consideran 36 configuraciones distintas tomadas de un diseño de experimentos, por medio del método de diseño central compuesto con, distintos parámetros (ángulo de incidencia de viento  $\theta$ , pendiente de techo  $\alpha$ , altura total  $H$ , apertura en muros barlovento en %, relación largo y ancho  $L/b$ , y altura de pilotes  $h$ ) para investigar en función de estos factores el efecto del viento y la magnitud de los coeficientes de presión positivos o negativos como una variable indispensable que afecta la vulnerabilidad del sistema estructural. Un modelo de tipo superficie de respuesta para los coeficientes de presión puede ser enseguida identificado. Este modelo puede servir como una base de predicción del efecto del viento en sistemas de viviendas elevadas. Las estrategias de mitigación a considerar son con ayuda de la aerodinámica en los bordes de techos.

**Palabras clave:** Huracán, Viento, Mitigación, CFD, Viviendas, Interacción fluido-Estructura.

## **Abstract**

Hurricanes are characterized by high wind speeds and torrential rains, representing a danger to the coasts of Mexico, the Caribbean, the United States, Australia, Japan, China, among others, causing great economic-social losses, so from a point of view Structural engineering view requires constructions resistant enough to such effects, a strategy used in many coastal cities in the world to reduce the effects caused by flooding are elevated houses, this strategy has become popular for a few decades, however the lack of information on the part of international regulations regarding the effects of the wind when raising houses has caused serious damage to this type of structure in the face of hurricanes. Statistically, one of the sectors most affected during the passage of hurricanes is the housing sector. Hurricanes are currently more frequent and intense due to global warming, which is why seeking mitigation alternatives to the effects caused by the wind on low-rise buildings has attracted the attention of researchers and government departments around the world. This research makes use of Computational Fluid Dynamics (CFD) to understand the performance of elevated and non-elevated houses subjected to wind effects in coastal areas. For this study, 59 different configurations are considered, taken from a central design composed of different parameters (wind incidence angle  $\theta$ , roof slope  $\alpha$ , total height  $H$ , windward wall opening in %, length and width ratio  $L/b$ , and height of piles  $h$ ) to investigate, based on these factors, the effect of the wind and the magnitude of the positive or negative pressure coefficients as an essential variable that affects the vulnerability of the structural system.

**Key words:** Hurricane, Wind, Mitigation, Computational Fluid Dynamics, dwellings, Fluid-Structure Interaction.

## **I Introducción**

La República mexicana cuenta con 35,219,141 viviendas según el censo presentado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI 2020), viviendas de las cuales 45.1% tienen más de 20 años de antigüedad y solo el 9 % tienen menos de 5 años. Por otra parte 7.6% y 21.6 % de las viviendas cuentan con muros y techos respectivamente de materiales precarios (materiales no estructurales) (INEGI, 2020) .

La vulnerabilidad de México ante la presencia de huracanes es consecuencia del lugar geográfico, condiciones climáticas y geológicas, así como de asentamientos humanos en zonas de alto riesgo. Las máximas velocidades de viento ocurren regularmente cuando se presenta un huracán (Reinoso Angulo, Jaimes Tellez, Ordaz Schroeder, & Niño Lázaro, 2010).

Los huracanes se presentan en México año con año generando grandes pérdidas económicas y humanas (Figura 1.1), así como graves daños a construcciones, en particular en aquellas de poca altura definiendo estas edificaciones como: aquellas con una altura de techo menor de 18 m de acuerdo con la American Society of Civil Engineers (ASCE). De acuerdo con el resumen ejecutivo presentado por Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2022), los costos ocasionados por desastres de carácter natural en México desde el año 2000 al 2021 superan los 645, 000 millones de pesos siendo el 2010 el más costoso a causa de los huracanes Alex, Karl y Matthew.

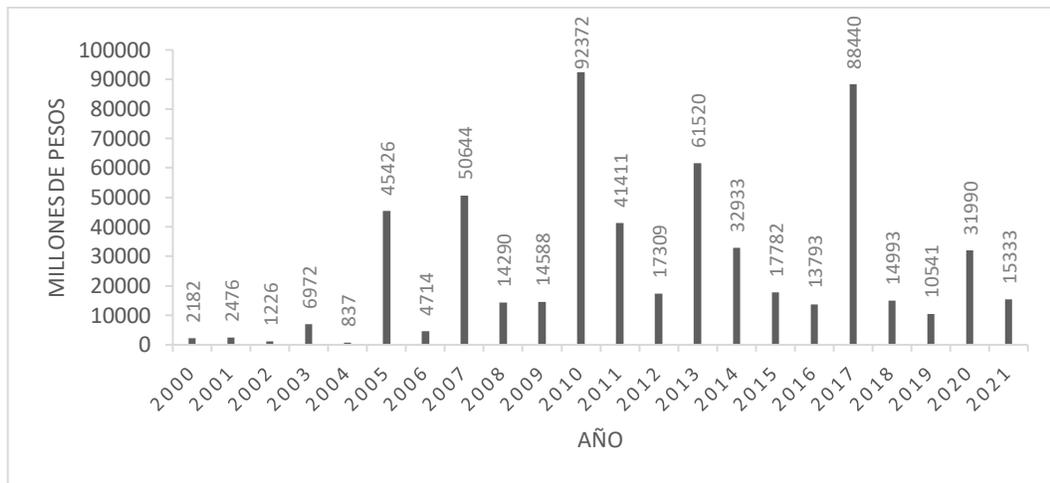


Figura 1.1 Pérdida en millones a causa de desastres naturales en la República Mexicana desde el año 2000 a 2021

Los huracanes en el país se presentan en las épocas de verano – otoño y se originan a causa de una concentración de energía próxima al ecuador derivado del gradiente de temperaturas a una misma altura, transportando dicha energía hacia latitudes altas, (Figura 1.2) (Rosengaus Moshinsky & Sánchez Sesma, 1990).



Figura 1.2 Zona de generación de huracanes

El cambio climático global y las temperaturas oceánicas más cálidas dan lugar a que los huracanes ocurran con más frecuencia y sean más intensos (English, Friedland, & Orooji, 2017), (Ihl & Martínez, 2014). Además, que más de la mitad de la población mundial vive a menos de 200 km de las costas (Appendini & Salles, Vulnerabilidad y peligro: costas

mexicana, 2014). Por otro lado, las altas velocidades de viento pueden ser producto también de: tornados, depresiones, tormentas eléctricas, o monzones teniendo un comportamiento dinámico y pueden ser considerados como eventos aleatorios.

Cabe resaltar que el viento es una de las mayores fuerzas responsables de fallas fatales en estructuras y pérdidas humanas a nivel mundial, ejemplo de ello es lo ocurrido con el puente Tacoma Narrows tras su falla bajo efectos de resonancia lo cual llevó al colapso de este con apenas vientos de 19 m/s (Figura 1.3) (Billah & Scalan, 1990).



Figura 1.3 Colapso del puente Takoma Narrows tomada de la colección especial de la librería la Universidad de Washington, FAR017

Hay una serie de problemas comunes que se presentan en edificaciones de poca altura ante la incidencia del viento:

- Daños de techos: Cuando el viento a alta velocidad intenta pasar a través de una estructura de poca altura con vértices afilados provoca su separación, dando pie a que ocurran presiones negativas en el techo provocando un efecto de succión que puede llegar a desprender los techos de casas residenciales o comercios industriales (Aly & Bresowar, 2016).

- Afectación de la cimentación: Una cimentación puede ser desplazada fuera del suelo, de ahí el hecho de cuidar en el análisis los efectos de volteo en particular cuando se trata de estructuras ligeras.
- Al elevar las viviendas mediante un sistema de pilotes aumenta igualmente las posibilidades de sufrir efectos de volteo afectando directamente a la cimentación, (Figura 1.4 A).
- Succión inferior: Las viviendas elevadas también son propensas a sufrir fuertes succiones en la parte inferior por lo que muchas de las veces si no se cuenta con materiales de recubrimiento adecuados tienden a desprenderse (Figura 1.4 B).



A



B

Figura 1.4 A y B) Efectos de viento provocado a viviendas elevadas, tomada de (Amini & Memari, 2021)

- Fallas por presión: Las estructuras de acero que no se encuentran debidamente concebidas tienden a fallar ante las altas presiones del viento (Figura 1.5).
- Daños a las construcciones de mampostería no confinada: Estas construcciones también son propensas a la acción del viento, sobre todo cuando se tiene la pérdida del techo

quedando expuestas las paredes y comportándose como cantos estructurales libres provocando su falla parcial o total.

- Ausencia de combinaciones accidentales en el diseño: Las estructuras de concreto suelen ser diseñadas bajo efectos de sismos dejando de lado el comportamiento eólico sin embargo no se deben despreciar estos efectos y deben ser revisados por efectos de viento.
- Daños a estructuras de madera: las estructuras de madera son menos seguras debido a su naturaleza, considerando hoy día, por una parte, que las construcciones de madera no son necesariamente más baratas debido a su escasez y altos costos, por otra parte, son más vulnerables si no se presenta una adecuada fijación en techumbres por lo que su correcta instalación es de vital importancia.



Figura 1.5 Pandeo general por presiones en muro barlovento tomada de (Balbastro & Sonzogni, 2008)

La interacción fluido - estructura es un factor fundamental ante la respuesta que puede tener la estructura bajo las presiones ejercidas por el viento, siendo su conocimiento esencial para el diseño estructural de viviendas expuestas a grandes ráfagas de viento.

La presión que ejerce el viento sobre el sistema estructural es una función de la parte dinámica de la ecuación de Bernoulli (Comarazamy, 2005). Conocida como presión básica de diseño en la normativa actual, que se ve modificada por una serie de factores:

- La rugosidad del terreno

- Altura de la construcción
- Topografía del entorno
- Tipo de la estructura según importancia
- Dirección del viento
- Turbulencia
- Aberturas en las caras de la construcción

La normativa vigente en el país obtiene las presiones básicas de diseño para construcciones de poca altura, desde un enfoque estático, dejando a un lado el comportamiento dinámico.

Los elementos estructurales se encuentran expuestos a distintas fuerzas internas como (Comarazamy, 2005) :

- Carga axial: Fuerza de tracción o compresión que alarga y acorta respectivamente la longitud de un elemento, esta carga es una consideración importante en el diseño estructural, ya que puede afectar significativamente la capacidad de carga y la estabilidad de una estructura.
- Momento de flexión: es una medida de la tendencia de una fuerza aplicada a un objeto para hacer que este se doble o se flexione. La falla es causada por una rotación lo suficientemente intensa, por la cual la energía de disipación sobrepasa ciertos límites tanto en momento como en carga axial.
- Cortante: es una fuerza que actúa perpendicularmente a la longitud de un elemento estructural, como una viga o un travesaño, puede ser origen de una falla siendo fatal si el movimiento es súbito e inesperado.
- Momento de torsión: es una medida de la tendencia de una fuerza aplicada a un objeto para hacer que este gire alrededor de un eje, al igual que la fuerza cortante su falla suele ser fatal causando colapso parcial o total de una estructura.

Por lo antes mencionado y atendiendo las necesidades gubernamentales como las establecidas en (CEPAL, 2018), (Habit, 2018), las cuales coinciden en brindar a la población una vivienda digna y segura, los pilares de esta investigación aportan elementos de estudio interesantes, e útiles para las normativas nacionales, que permitirían comprender mejor el

comportamiento de viento y salvaguardar la integridad de los ciudadanos ante la presencia de vientos extremos.

En este trabajo se busca mediante el uso de CFD tener un panorama más claro y detallado del comportamiento del flujo al interactuar con la estructura logrando rescatar parámetros importantes como: presiones, velocidades, coeficientes de levante, arrastre y turbulencia. Dichos parámetros sirven para plantear que características son favorables en reducir significativamente los efectos provocados por grandes ráfagas de viento. Igualmente se estudia la alternativa de la elevación de vivienda la cual tiene a ser una opción viable ante la incidencia de huracanes, para ello se realiza un diseño central compuesto con 5 factores en 5 niveles cada uno dando como resultado 36 combinaciones que son simuladas mediante el software ANSYS FLUENT. Un modelo de tipo superficie de respuesta para los coeficientes de presión es identificado por medio de una regresión lineal múltiple. Este modelo puede servir como una base de predicción del efecto del viento en sistemas de viviendas elevadas.

## II Fundamentación teórica

### 2.1 Característica de los Huracanes

Como parte de la investigación la consideración de este fenómeno es importante debido a las rachas de viento generadas durante el evento por lo que resulta de interés conocer sus características principales. Huracán, ciclón tropical o tifón. Es una perturbación atmosférica en las aguas cálidas de los trópicos durante el verano y el otoño con vientos que en ocasiones alcanzan velocidades de hasta 300 km/h (Rosengaus Moshinsky & Sánchez Sesma, 1990). La categoría del huracán según la escala Saffir – Simpson se rige según su intensidad de viento:

- Categoría uno: vientos entre 119 a 153 km/h
- Categoría dos: vientos entre 154 a 177 km/h
- Categoría tres: vientos entre 178 a 208 km/h
- Categoría cuatro: vientos entre 209 a 251 km/h
- Categoría cinco: vientos mayores a 252 km/h

La forma del huracán es axisimétrica alrededor de la vertical que pasa por el centro de la tormenta, es decir que alrededor del ojo es donde se presentan las máximas velocidades de viento, (Figura 2.1).

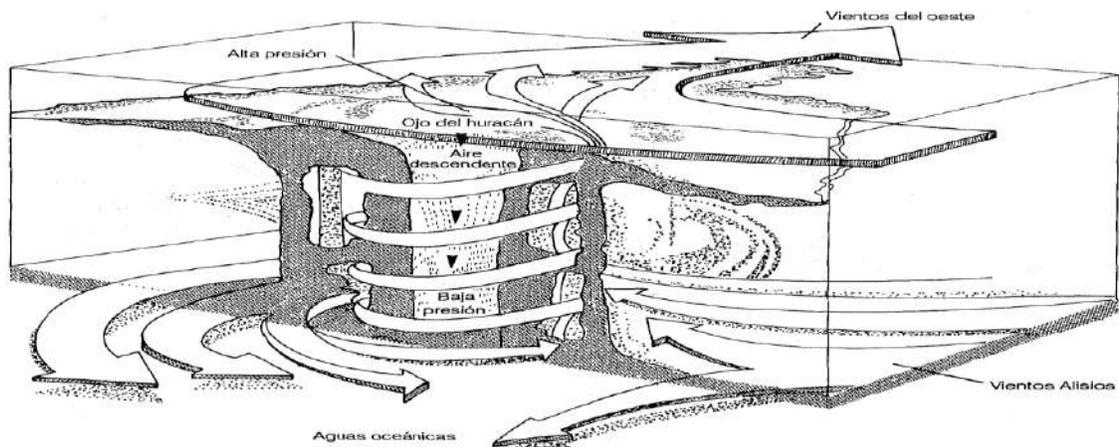


Figura 2.1 Estructura general de un huracán, tomada de (Rosengaus Moshinsky & Sánchez Sesma, 1990)

## 2.2 Diseño central compuesto

Con el fin de preparar una combinación de configuraciones posibles de un problema dado se requiere construir un plan de experimentos. Ahora bien, el experimentar con cantidades de factores de entrada  $\geq 5$  resulta muy costoso en la práctica pues se requiere realizar una cantidad importante de experimentos con modelos bastante complejos. Sin embargo, existe una alternativa que permite disminuir de manera significativa el número de tratamientos experimentales, sin perder información. Tal estrategia se le denomina diseños factoriales fraccionados  $2^{k-p}$ . Su éxito se debe a permite explorar una fracción de las combinaciones posibles de niveles de factores mientras se mantiene una alta eficiencia experimental. Esto significa que se pueden obtener conclusiones útiles sobre los efectos principales y de interacción de los factores utilizando un número menor de experimentos en comparación con un diseño factorial completo  $2^k$ .

Cuando se desea encontrar niveles de mejoras en la experimentación se utiliza la llamada metodología de superficie de respuesta (RSM) por sus siglas en inglés. La cual se esquematiza en la (Figura 2.2).

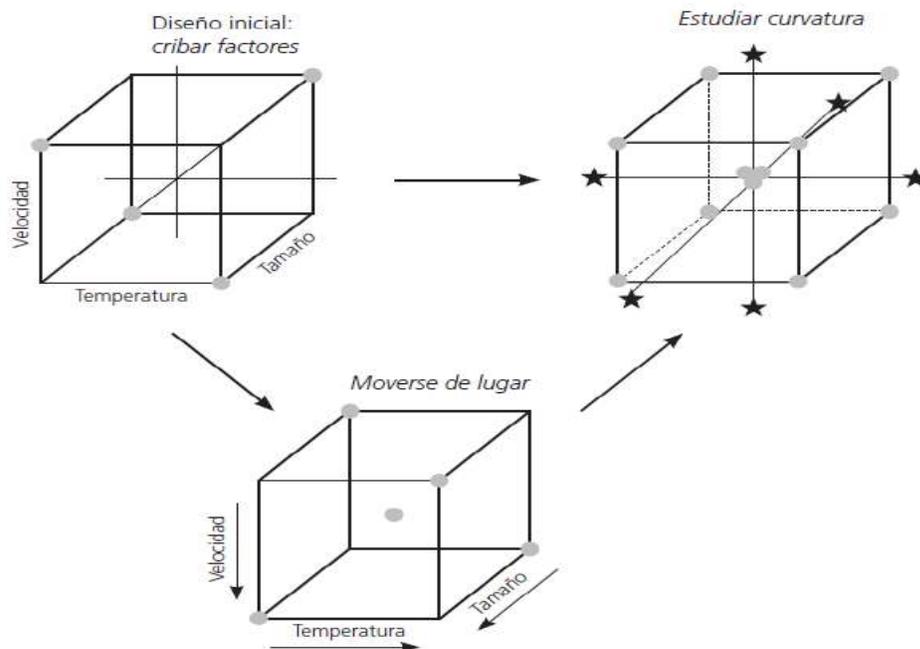


Figura 2.2 Ejemplificación básica de RSM

Las ecuaciones descritas en este apartado se pueden consultar en el libro de (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar , 2012).

Los modelos que se emplean en la RSM son básicamente polinomios, si se tienen  $k$  factores, el modelo de primer orden esta dado por:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \chi_i + \epsilon \quad (1)$$

Y un modelo de segundo orden se expresa como:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \chi_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \chi_i^2 + \sum_{i=1 < j=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} \chi_i \chi_j + \epsilon \quad (2)$$

En la (Figura 2.3) se representa el comportamiento grafico de superficies de respuesta de primer y segundo orden. Cuando existen más de dos factores las superficies de respuesta no son gráficamente representables ya que se encuentran en una cuarta dimensión o más.

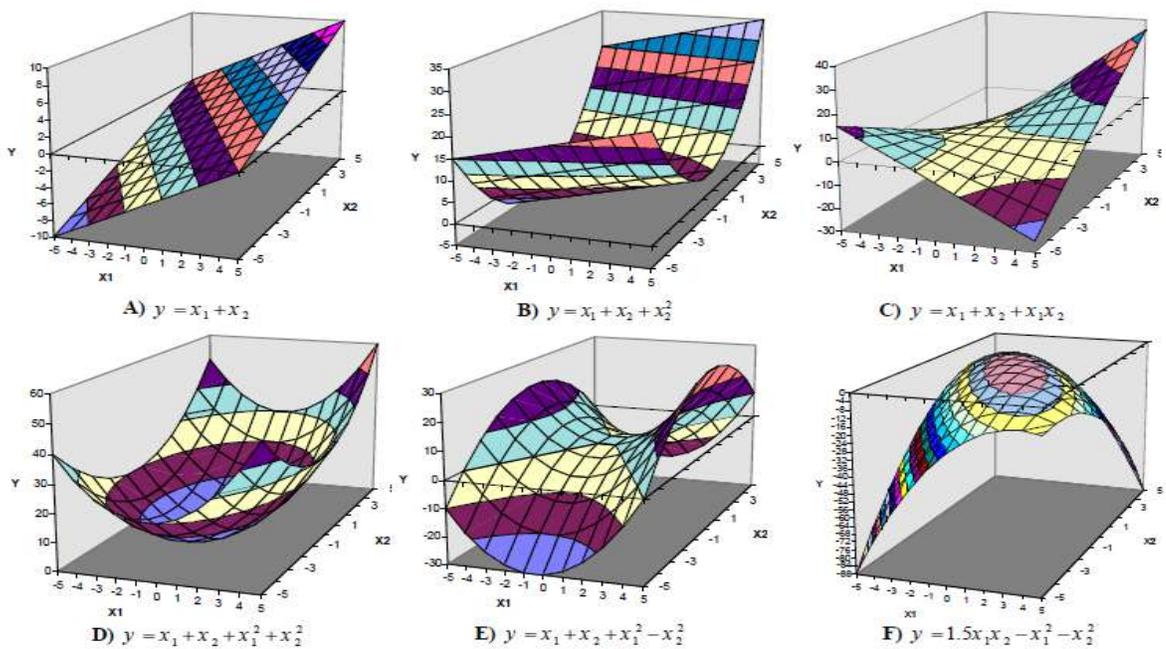


Figura 2.3 Superficies de respuesta A) modelo de primer orden B), C), D), E) y F) modelos de segundo orden

Existe una relación directa entre el modelo que se desea ajustar y el diseño que se elige. Si el diseño se aumenta con puntos estrella o axiales, se posibilita estudiar de manera separada los efectos cuadráticos puros.

Como se mencionó en la ecuación 2 los diseños de segundo orden permiten ajustar un modelo para así estudiar, además de los efectos lineales y de interacción, los efectos cuadráticos o de curvatura pura.

El Diseño Central Compuesto (CCD por sus siglas en inglés) es muy utilizado en la búsqueda de segundo orden debido a su bondad, Para esta investigación se utilizará su construcción bajo el diseño fraccionado  $2^{k-p}$  agregando puntos sobre los ejes y al centro (Figura 2.4).

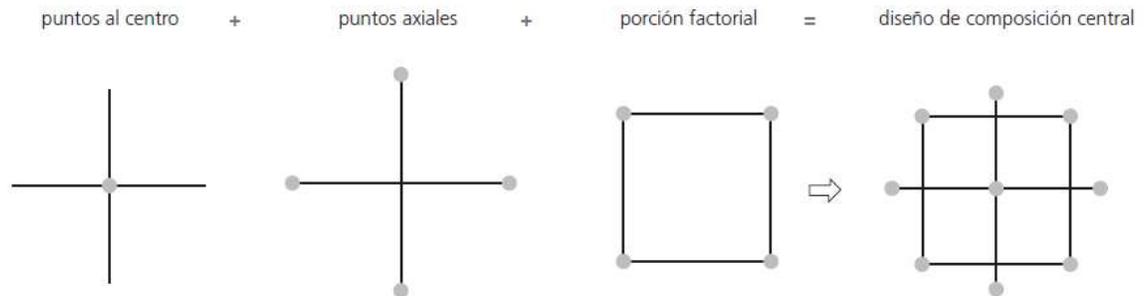


Figura 2.4 Representación de la construcción de un CCD para k=2 factores

El número de corridas experimentales se determina con la siguiente ecuación:

$$N = 2^{k-p} + 2k + n_0 \quad (3)$$

Donde el número de corridas al centro y la distancia de los puntos axiales ( $\alpha$ ) deben de escogerse de manera adecuada:

$$\alpha = (n_f)^{1/4} \quad (4)$$

El diseño fraccionado  $n_f$  de representa como:

$$n_f = 2^{k-p} \quad (5)$$

### 2.3 Conservación de la masa

Para este apartado y los siguientes dos consultar (Gurtin, 1981). Una de las propiedades más importantes de un cuerpo es que poseen masa. Cuando la distribución de la masa es continua como es el caso de esta investigación, sin importar el grado de deformación que el cuerpo pueda tener, dicha masa será la integral de un campo de densidad. Por lo tanto, dada cualquier deformación  $f$  hay un campo de densidad  $\rho_f$  en  $f(\mathfrak{B})$  tal que la masa  $m(\mathcal{p})$  de cualquier parte  $\mathcal{p}$  esta dada por:

$$m(\mathcal{p}) \equiv \int_{f(\mathcal{p})} \rho_f dv = \int_{f(\mathcal{g})} \rho_g dv \quad (6)$$

Como se mencionó anteriormente la deformación de un cuerpo no tiene por qué alterar la masa de este, por lo que la masa  $m(\mathcal{p})$  es independiente de la deformación  $f$ .

Trasladando esta idea, una distribución de masas en  $\mathfrak{B}$  es una familia de campos de densidad suave dada por:

$$\rho: f(\mathfrak{B}) \rightarrow R^+ \quad (7)$$

Para cada deformación  $f$ , tal que:

$$m(\mathcal{p}) = \int_{f(\mathcal{p})} \rho_f dv \quad (8)$$

Para cada parte  $\mathcal{p}$  y toda

s las deformaciones  $f$  &  $g$ , el número  $\rho_f(x)$  representa la densidad en el punto  $x \in f(\mathfrak{B})$  en la deformación  $f$  por lo que la ecuación 6 es conocida como conservación de la masa.

Dada una deformación  $f$  de  $\mathfrak{B}$  y  $F = \nabla f$ , entonces:

$$\rho_r(x) \det F(p) = \rho_0(p) \quad (9)$$

Tal que,  $x = f(p)$

Para cada parte  $\mathcal{p}$  y tiempo  $t$

$$\frac{d}{dt} \int_{\mathcal{p}(t)} \rho dv = 0 \quad (10)$$

Si  $F = \nabla x$  es el gradiente de la deformación en el movimiento, la ecuación 9 toma la forma:

$$\rho_r(x, t) \det F(p, t) = \rho_0(p) \quad (11)$$

Tal que,  $x = x(p, t)$ . Siendo  $\rho$  una descripción espacial de  $\rho_0 / \det F$ , y  $\rho$  una función suave en  $T$ .

Teorema (Conservación de la masa)

$$\begin{aligned} \dot{\rho} + \rho \operatorname{div} v &= 0, \\ \rho' + \operatorname{div}(\rho v) &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

## 2.4 Conservación de momento

Sea  $x$  un movimiento de  $\mathfrak{B}$ . Dada una parte de  $\mathcal{p}$  de  $\mathfrak{B}$ , el momento lineal  $I(\mathcal{p}, t)$  y el momento angular  $a(\mathcal{p}, t)$  sobre el origen  $o$  de  $\mathcal{p}$  en el tiempo  $t$  son definidos por:

$$\begin{aligned} I(\mathcal{p}, t) &= \int_{\mathcal{p}_t} v \rho dV, \\ a(\mathcal{p}, t) &= \int_{\mathcal{p}_t} r \times v \rho dV \end{aligned} \quad (13)$$

Donde  $r: \epsilon \rightarrow V$  es el vector posición,

$$r(x) = x - o \quad (14)$$

Para cada parte  $\mathcal{p}$  y tiempo  $t$ ,

$$I(\mathcal{p}, t) = \int_{\mathcal{p}_t} \dot{v} \rho dV, \quad (15)$$

$$\dot{\alpha}(\mathcal{p}, t) = \int_{\mathcal{p}_t} r \times \dot{v} \rho dV$$

Aplicando propiedades correspondientes se tiene que

$$(r \times v) \cdot = r \times \dot{v} + v \times v \quad (16)$$

Por lo que  $v \times v = 0$

Se asume ahora que  $\mathcal{B}$  es cerrado, así que  $m(\mathcal{B})$  es finita, luego el centro de masa  $\alpha(t)$  en el tiempo  $t$  es el punto en el espacio definido por:

$$\alpha(t) - o = \frac{1}{m(\mathcal{B})} \int_{\mathcal{B}_t} r \rho dV \quad (17)$$

Si se aplican criterios matemáticos conocidos se puede derivar la ecuación 17 obteniendo lo siguiente:

$$\dot{\alpha}(t) = \frac{1}{m(\mathcal{B})} \int_{\mathcal{B}_t} v \rho dV \quad (18)$$

$\dot{\alpha}$  representa el promedio de la velocidad del cuerpo, al aplicar el criterio de la ecuación anterior y la ecuación 13 se obtiene:

$$I(\mathcal{B}, t) = m(\mathcal{B}) \dot{\alpha}(t) \quad (19)$$

Por lo tanto, el momento lineal de un cuerpo  $\mathfrak{B}$  es el mismo que el de la partícula de masa  $m(\mathfrak{B})$  adjunta al centro de masa de  $\mathfrak{B}$ .

## 2.5 Ecuaciones de Navier- Stokes

La fricción en los fluidos generalmente se manifiesta a través de fuerzas cortantes que retardan el movimiento relativo de las partículas del fluido. El gradiente de velocidad proporciona una medida del movimiento relativo de las partículas de un fluido.

$$L = \text{grad } v \quad (20)$$

El modelo de un fluido considerando su viscosidad, como una ecuación constitutiva de forma es:

$$T = -\pi I + C[L] \quad (21)$$

Los materiales definidos con la expresión anterior se denominan Newtonianos con  $C$  lineal y proporcionan el modelo más simple y útil del comportamiento de los fluidos viscosos. Los fluidos Newtonianos incompresibles siguen lo siguiente:

$$\text{tr } L = 0 \quad (22)$$

Como  $C$  es lineal,  $C[0] = 0$  por lo tanto

$$T = -\pi I \quad (23)$$

Sea  $L = 0$ , tal que el fluido Newtoniano se comporta en reposo como un fluido ideal (su densidad es constante, no presenta fricción o no es viscoso y su tensor de esfuerzo está representado por un campo de presiones). Ya que el fluido es Newtoniano, la presión que actúa en este no depende de su movimiento.

Una condición suficiente para saber que un fluido Newtoniano es independiente es la respuesta de la función  $C$  y tiene la forma:

$$C[L] = 2\mu D \quad (24)$$

Donde  $D$  es

$$D = \frac{1}{2}(L + L^T) \quad (25)$$

Y  $\mu$  es el escalar constante llamado la viscosidad del fluido.

Haciendo las operaciones correspondientes algebraicamente podemos concluir que:

$$T = -\pi I + 2\mu D \quad (26)$$

Por lo que la ecuación del movimiento:

$$\rho_0[v' + (\text{grad } v)v] = \mu'\Delta v - \text{grad } \pi + b \quad (27)$$

La condición de incompresibilidad:

$$\text{div } v = 0 \quad (28)$$

Y sea:

$$2 \text{ div } D = \text{div}(\text{grad } v + \text{grad } v^T) = \Delta v + \text{grad } \text{div } v = \Delta v \quad (29)$$

Si sustituimos  $\text{grad } \text{div } v$  por  $\Delta$ , obtenemos:

$$\rho_0[v' + (\text{grad } v)v] = \mu\Delta v - \text{grad}\pi + b \quad (30)$$

$$\text{div } v = 0 \quad (31)$$

Si definimos  $v = \frac{\mu}{\rho_0}$ , entonces  $\pi_0 = \frac{\pi}{\rho_0}$  y  $b_0 = \frac{b}{\rho_0}$ , podemos expresar las ecuaciones de Navier-Stokes tal que:

$$v' + (\text{grad } v)v = v\Delta v - \text{grad}\pi_0 + b_0 \quad (32)$$

Todo lo anterior se puede resumir en lo siguiente: las características físicas del flujo se describen bajo las ecuaciones de Navier Stokes, incluyendo un sistema de cinco ecuaciones diferenciales parciales, siendo, para un fluido de estado- estable, Newtoniano, incompresible, e isotérmico, que se simplifican en la forma de las ecuaciones de continuidad y momento (Amini & Memari, 2021):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (33)$$

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\delta^2 u_i}{\delta x_j \delta x_j} \quad (34)$$

Donde  $\nu$  = viscosidad cinemática, definida como viscosidad ( $\mu$ ) dividida por la densidad ( $\rho$ ).

## 2.6 Interacción fluido – estructura

Las interacciones entre los flujos de fluidos son fenómenos multi - físicos no lineales los cuales tienen una fuerte presencia en una amplia gama de disciplinas. Los fenómenos Interacción Fluido Estructura (FSI por sus siglas en inglés) se distinguen en problemas acoplados de superficie (el fluido y el dominio estructural coinciden a lo largo de la interfaz común) y problemas acoplados de volumen (contiene problemas como el flujo de medios porosos donde el fluido y la estructura ocupan un dominio de interés). Un ejemplo puntual de la aplicación de FSI en la ingeniería civil es el del análisis de la fuerza del viento en estructuras. En el análisis de estructuras es de fundamental importancia una descripción de flujo que ofrezca una predicción de las fuerzas del fluido y que sea suficientemente precisa (Föster, 2007).

Una restricción a los flujos incompresibles de fluidos newtonianos (siguen la ley de viscosidad de Newton) pone el alcance del campo de fluidos en las ecuaciones incompresibles de Navier-Stokes siempre que la velocidad característica del flujo sea considerablemente menor que la velocidad del sonido en el fluido, el flujo se comporta de forma casi incompresible. El flujo es laminar cuando las partículas del fluido siguen trayectorias suaves y predecibles, sin turbulencia significativa. Por otra parte el flujo turbulento es aquel caracterizado por la presencia de remolinos, vórtices y fluctuaciones aleatorias en la velocidad y presión del fluido (Ferziger, 2002).

Los procedimientos numéricos para resolver estos problemas de FSI se pueden clasificar en términos generales en dos enfoques (Hou, Wang, & Layton, 2012) (Figura 2.5):

1. El enfoque monolítico: trata la dinámica de fluidos y estructuras en el mismo marco matemático para formar una sola ecuación de sistema para todo el problema, que se resuelve simultáneamente mediante un algoritmo unificado. Las condiciones interfaciales están implícitas en el procedimiento de solución.
2. El enfoque particionado: trata el fluido y la estructura como dos campos computacionales que se pueden resolver por separado con su respectiva malla de discretización y algoritmo numérico. Las condiciones interfaciales se usan explícitamente para comunicar información entre las soluciones de fluido y estructura.

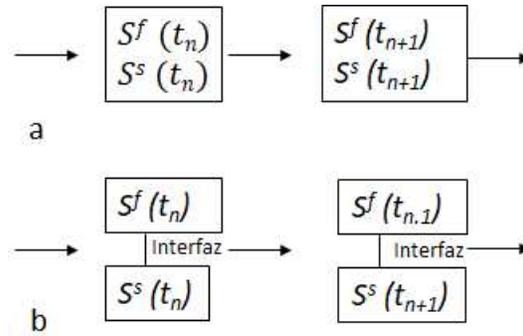


Figura 2.5 a) Esquema de un enfoque monolítico; b) Esquema particionado. Para la interacción fluido- estructura, donde  $S^f$  and  $S^s$  son las soluciones fluido estructura respectivamente, tomada de (Hou, Wang, & Layton, 2012)

Otra clasificación general de los procedimientos de solución FSI se basa en el tratamiento de las mallas, (Figura 2.6):

1. Métodos de malla conforme: los métodos de malla conforme consideran las condiciones de la interfaz como condiciones de contorno físico, que tratan la ubicación de la interfaz como parte de la solución y requieren mallas que se ajusten a la interfaz.
2. Métodos de mallas no conformes: tratan la ubicación del límite y las condiciones de interfaz relacionadas como restricciones impuestas en las ecuaciones del modelo para que se puedan emplear mallas no conformes.

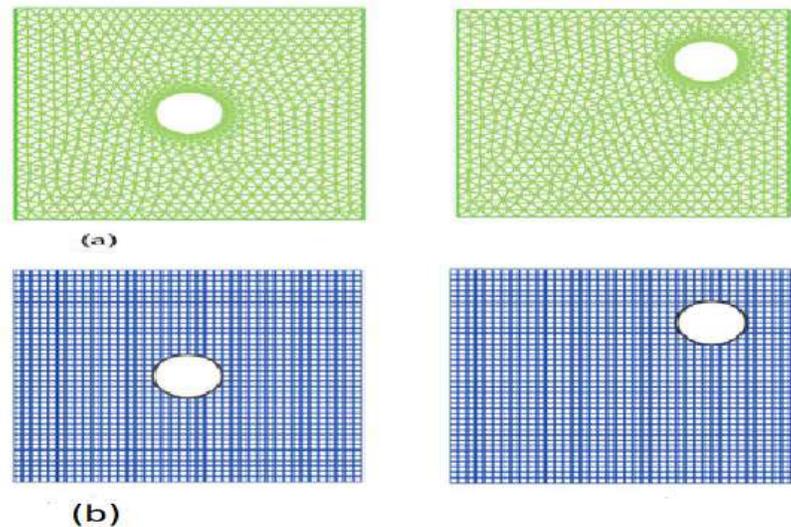


Figura 2.6 Ejemplo de: a) Malla conformada; b) Malla no conformada. Tomada de (Hou, Wang, & Layton, 2012)

A manera de resumen los problemas principales dinámicos de interacción fluido estructura DFSI, son (Slone, Pericleous, Bailey, & Cross, 2002):

1. El fluido proporciona una carga de tracción en la estructura.
2. Esta carga de tracción provoca una respuesta dinámica de la estructura que impacta sobre el dominio de flujo.

Para los métodos de malla dinámica, las ecuaciones de flujo deben adaptarse para tener en cuenta los cambios dinámicos en el dominio del flujo y las condiciones de contorno.

## 2.7 Formulación Euleriana y Lagrangiana de los Dominios

En la mecánica de fluidos se hace referencia a dos formulaciones; (para mayor detalle consultar (Castro, 2007)):

- 1) Dominio material formulación Lagrangiana: se sigue el movimiento de partículas  $X$  del fluido sobre el dominio.
- 2) Dominio espacial formulación Euleriana: consiste en todas las posiciones espaciales  $x$  que ocupa el medio continuo al tiempo  $t$ .

En la descripción lagrangiana del continuo, se efectúa el movimiento de cada una de las partículas involucradas. Se hace la introducción de mapeo  $\varphi$  que en cada instancia del tiempo  $t$  indica la posición  $x$  en el dominio espacial de la partícula  $X$  en el dominio material, (Figura 2.7).

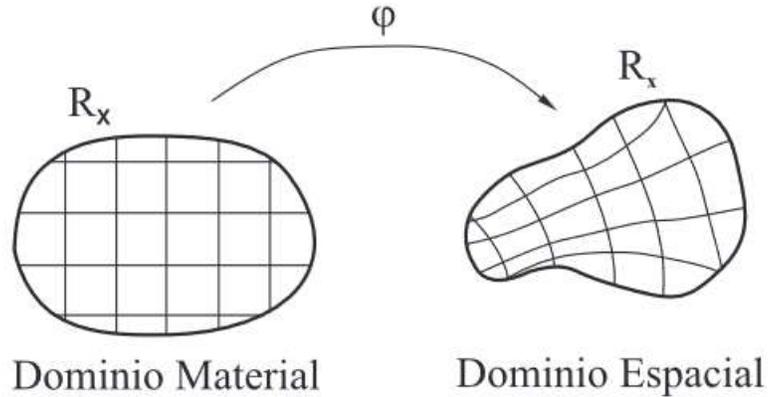


Figura 1.7 Dominios y mapeo de la descripción lagrangiana. Tomada de (Castro, 2007)

Llamaremos  $\Omega_x$  al dominio espacial y  $\Omega_X$  al dominio material, y sea  $I$  el intervalo de definición temporal, el mapeo  $\varphi$  se define como:

$$\varphi: \Omega_X \times I \rightarrow \Omega_x \times I \quad (35)$$

$$(X, t) \rightarrow (x, t) = \varphi (X, t) \quad (36)$$

En el ámbito de la elasticidad es de utilidad la descripción antes mencionada.

La derivada material es el cambio de una cantidad  $f$  dado que la partícula  $X$  se mantiene fija

$$\frac{Df}{Dt} = \frac{\partial f}{\partial t} \Big|_X \quad (37)$$

Mientras que en la formulación euleriana se da la aparición de términos convectivos al realizar el computo de la derivada material de las cantidades físicas. Se relaciona la derivada parcial con la velocidad de la partícula que en el tiempo  $t$  se encuentra en la posición  $x$  del espacio mediante la relación:

$$\frac{Df}{Dt} = \frac{\partial f}{\partial t}\bigg|_x + v \cdot \nabla_x f \quad (38)$$

Se sabe que la velocidad de la partícula es:

$$v = \frac{\partial x}{\partial t}\bigg|_x \quad (39)$$

En los casos en que el dominio sufre deformaciones con el tiempo, la descripción euleriana resulta impráctica, pues se necesita que el dominio permanezca fijo en el tiempo. En los problemas de fluidodinámica resulta útil la descripción euleriana pero la descripción lagrangiana es de mayor utilidad en interfaces móviles.

### 2.8 Arbitrario Lagrangiano-Euleriano (ALE)

El tratamiento de problemas en los cuales el dominio evoluciona en el tiempo es conocido como Arbitrary Lagrangian–Eulerian (ALE). Esta descripción no utiliza los dos dominios de referencia anteriores si no que se agrega un tercero, (Figura 2.8).

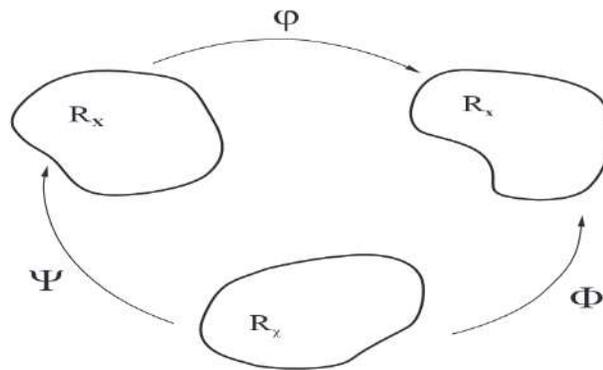


Figura 2.8 Descripción ALE dominios y mapeos, tomada de castro (Castro, 2007)

Como ya se sabe  $\varphi$  relaciona el dominio material con el espacial. Los nuevos mapeos son  $\Phi$  que relaciona el dominio de referencia  $\Omega_\chi$  con el dominio espacial  $x$ . Se interpreta como el movimiento de los puntos de la malla, y se define como:

$$\Phi: \Omega_\chi \times I \rightarrow \Omega_x \times I \quad (40)$$

$$(\chi, t) \rightarrow (x, t) = \Phi(\chi, t) \quad (41)$$

Se define la velocidad de la malla  $w$  como:

$$w = \left. \frac{\partial x}{\partial t} \right|_{\chi} \quad (42)$$

El nuevo mapeo  $\Psi$  relaciona al dominio de referencia  $\Omega_{\chi}$  con el dominio material:

$$\Psi: \Omega_{\chi} \times I \rightarrow \Omega_X \times I \quad (43)$$

$$(\chi, t) \rightarrow (X, t) = \Phi(\chi, t) \quad (44)$$

Es de conveniencia trabajar con este mapeo, y definir la velocidad  $\tilde{v}$  como:

$$\tilde{v} = \left. \frac{\partial \chi}{\partial t} \right|_X = \left. \frac{\partial \Psi^{-1}}{\partial t} \right|_X \quad (45)$$

La cual se interpreta como la velocidad de una partícula dada  $X$  en el dominio de referencia.

La relación entre las velocidades  $w, v$  y  $\tilde{v}$  se obtiene derivando la composición  $\varphi = \Phi \circ \Psi^{-1}$  respecto al tiempo, siendo el resultado:

$$c = v - w = \frac{\partial x}{\partial \chi} \cdot \tilde{v} \quad (46)$$

## 2.10 Método de Volumen Finito (FVM)

El Método de Volumen Finito (FVM) utiliza la forma integral de la conservación de las ecuaciones como punto de partida. Este método es utilizado para resolver problemas de ingeniería, física y matemáticas. En este trabajo se hace uso del software ANSYS en la plataforma WORKBENCH FLUENT la cual hace uso FVM para resolver las ecuaciones que gobiernan. Para mayor detalle sobre el método se sugiere consultar (Ferziger, 2002).

El método consiste en la subdividir el dominio en una cantidad finita de volúmenes de control o celdas, (Figura 2.9). Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento son integradas en cada celda. En el centroide de cada celda se encuentra un nodo computacional en el cual el

valor de la variable será calculado. Como resultado se obtiene una ecuación algebraica para cada celda en el cual una serie de valores nodales vecinos aparecen.



Figura 2.9 Discretización del dominio

FVM tiene muchos campos de aplicaciones, incluyendo la dinámica de fluidos, transferencia de calor, combustión y electromagnetismo. La versatilidad de este método para adaptarse a cualquier tipo de mallado lo hace adecuado para analizar geometrías complejas que son difíciles o imposibles de resolver de una manera analítica. Este método es conservador, preciso y robusto, y es ampliamente usado en la investigación científica.

### 2.10.1 Ecuación general de transporte

La ecuación general que expresa conservación de momento, energía, concentración, etc., en dos dimensiones puede ser escrita en coordenadas cartesianas en su forma general como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y}\right) + S \quad (47)$$

En condiciones estacionarias el término principal se desvanecería. En (Patankar , 1980) se discute cada término de la ecuación, así como las aplicaciones de condiciones de frontera.

Para solucionar las ecuaciones pertinentes por FVM, como se mencionó primero se genera una malla que cubra el dominio de interés. Un volumen de control típico dentro de dicha cuadrícula se denota por el área sombreada en la (Figura 2.10 a). La ecuación 47 es integrada bajo este volumen, y cada término en el balance integral resultante se aproxima en términos de los valores discretos de  $\phi$  en los puntos nodales (es decir, de P, E, N, etc.). el valor promedio del término fuente sobre el volumen S se aproxima por la relación lineal:

$$\bar{S} = S_c + S_p \phi_p \quad (48)$$

La aproximación de la integral de balance para el volumen de control P en la (Figura 2.10 a) es:

$$a_p \phi_p = \sum a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (49)$$

Donde la sumatoria es sobre los puntos vecinos de la malla. El coeficiente  $a_p$  esta dado por:

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S - S_p \Delta V \quad (50)$$

Una ecuación similar es aplicada para cada volumen de control de la malla. Para más detalles consultar (Patankar , 1980)

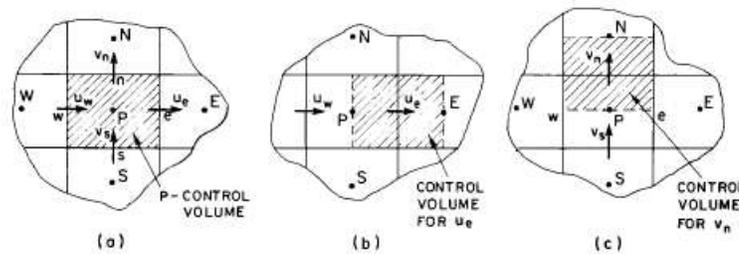


Figura 2.10 Volumen de control de una sección de malla cartesiana. Tomada de (Van Dormaal & Raithby, 1984)

Los coeficientes de la ecuación 49 pueden depender de ellos mismos de la solución de una o más de las variables dependientes representadas por  $\phi$ . Para tener en cuenta las interconexiones y las no linealidades resultantes, se requieren soluciones repetidas de la forma nominalmente lineal de la ecuación 49. cada una de estas soluciones se define como un ciclo. Al inicio de cada ciclo, los coeficientes son evaluados utilizando los valores de  $\phi$  obtenidos en el ciclo anterior. Con el cambio ciclo a ciclo en los coeficientes de la ecuación 49, los cambios resultantes en los valores  $\phi$  pueden ser bastante grandes, y esto puede causar una convergencia lenta o incluso una divergencia. para moderar los cambios en soluciones consecutivas para  $\phi$ , y por lo tanto mejorar la convergencia, el termino conocido como “Under- Relaxtion” es introducido. En (Patankar , 1980) hacen este cambió directo en la (ecuación 49) a través de  $\alpha$  como se muestra:

$$\frac{a_p}{\alpha} \phi_p = \sum a_{nb} \phi_{nb} + b + \frac{1 - \alpha}{\alpha} a_p \phi_p^0 \quad (51)$$

Donde  $\phi_p^0$  es el valor de  $\phi_p$  del ciclo anterior.

Un cambio recomendable, aunque superficialmente trivial es sustituir la ecuación 51 por

$$a_p \left(1 + \frac{1}{E}\right) \phi_p = \sum a_{nb} \phi_{nb} + b + \frac{a_p}{E} \phi_p^0 \quad (52)$$

La transformación realizada se dio por la relación:

$$\alpha = \frac{E}{1 + E} \text{ o } E = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (53)$$

## 2.11 Algoritmo SIMPLE

SIMPLE es acrónimo de Semi- Implicit Method for Pressure- linked Equations. Este método brinda una manera iterativa de calcular el campo de presión y velocidad convirtiendo la ecuación de continuidad en una ecuación de corrección para la presión.

El método consiste en proponer un campo de presión. Con este campo de presión inicial se pueden calcular los valores iniciales del campo de velocidad. Este campo de velocidad generalmente no será correcto por lo que es necesario hacer modificaciones. Utilizando lo que se conoce como “Staggered grid” mostrado en la (Figura 2.10, b y c) las ecuaciones de volumen finito para u y v respectivamente, tienen la forma de la ecuación 52. Rescribiendo la ecuación u-momento para el volumen de control centrado en  $e$  para mostrar explícitamente el término de presión:

$$a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b_e + A_e (p_p - p_E) \quad (54)$$

Donde  $p$  es presión,  $A_e$  es el área de la cara del volumen de control  $P$  en  $e$ , y

$$a_e = \left( \sum a_{nb} - S_e \Delta V \right) \left( 1 + \frac{1}{E} \right) \quad (55)$$

$S_e$  es el coeficiente del término fuente linealizado  $u_e$  (ver ecuación 48). Para cualquier distribución de presión estimada  $p^*$ , la velocidad obtenida  $u^*$  por la solución de la ecuación u-momento (como ecuación 54) satisface:

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b_e + A_e(p_p^* - p_E^*) \quad (56)$$

Las velocidades  $u$  obtenidas de (ecuación 54) usa la correcta (pero generalmente desconocida) distribución de presión  $p$  la cual satisface la condición de continuidad, mientras que las velocidades  $u^*$  de (ecuación 56) en general no cumplen esta regla. La corrección de la presión estimada por  $p' = p - p^*$  es por lo que es necesario corregir el campo  $u^*$  por  $u' = u - u^*$ . La relación entre  $p'$  y  $u'$  es obtenida mediante la substracción de la (ecuación 56) de la (ecuación 54):

$$a_e u_e' = \sum \underline{a_{nb} u_{nb}'} + A_e(p_p' - p_E') \quad (57)$$

La presión  $p$  y velocidad  $u$  que satisfacen la condición de conservación de masa y momento son:

$$u = u^* + u' \quad (58)$$

$$p = p^* + p' \quad (59)$$

La ecuación exacta para  $p'$  se deduce de las (ecuaciones 57 y 58) y la condición de continuidad, es complicado e inadecuado para economizar cálculos. El procedimiento SIMPLE usa una ecuación más adecuada despreciando el termino subrayado en la (ecuación 57). Combinando de forma simplificada la (ecuación 57) con los campos de la (ecuación 58)

$$u_e = u_e^* + d_e(p_p' - p_E') \quad (60)$$

Donde  $d_e = \frac{A_e}{a_e}$

Utilizando las ecuaciones de continuidad (51 y 52) para el volumen de control mostrado en la (Figura 2.10 a) se tiene:

$$(\rho u A)_w - (\rho u A)_e + (\rho v A)_s - (\rho v A)_n = 0 \quad (61)$$

Introduciendo la (ecuación 60) para  $u$  y  $v$  directo en (ecuación 61) se tiene:

$$a_p p'_p = a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S + b \quad (62)$$

Donde  $a_E = (\rho Ad)_e$ ,  $a_W = (\rho Ad)_w$ ,  $a_N = (\rho Ad)_n$ ,  $a_S = (\rho Ad)_s$  es decir;

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S \quad (63)$$

$$b = (\rho u A)_w - (\rho u A)_e + (\rho v A)_s - (\rho v A)_n \quad (64)$$

El procedimiento SIMPLE implementa una serie de exhaustivos pasos descritos a continuación:

- I. Adivinar un campo de presión  $p^*$
- II. Evaluar los coeficientes de momento de la (ecuación 56) y solucionar para obtener  $u^*$  y  $v^*$
- III. Evaluar la masa en (ecuación 64) y solucionar (ecuación 62)
- IV. Corregir el campo de velocidad, usando la (ecuación 60). Corregir el campo de presión usando la (ecuación 59)
- V. Solucionar otras ecuaciones  $\phi$ ; añadiendo propiedades, coeficientes, etc.
- VI. Usar la presión  $p$  encontrada en el paso IV como nueva  $p^*$ , regresar al paso II. Y así cíclicamente hasta converger

Este trabajo hace uso de este algoritmo, para más detalles sobre el método se sugiere consultar (Van Dormaal & Raithby, 1984), (Patankar, 1980). Sin embargo, cabe resaltar que existen más algoritmos que permiten calcular el campo de velocidad y presión. Algunos de estos algoritmos son modificaciones que se han hecho al algoritmo SIMPLE para mejorar su convergencia y precisión. Algunos ejemplos son los enlistados a continuación:

- SIMPLER (SIMPLE - Revisado)
- SIMPLEC (SIMPLE- Consistente)
- PISO (Pressure- Implicit with Splitting of Operators)
- PIMPLE (combinación de SIMPLE y PISO)
- Fractional Step

## 2.11 Mallado

El mallado es un paso crucial en la configuración de una simulación CFD. Este proceso consta de la discretización del dominio computacional en un número finito de elementos o celdas, que se puede resolver mediante métodos numéricos para obtener el comportamiento del flujo dentro del dominio. Se pueden enlistar los pasos del proceso de la siguiente manera:

1. Geometría: El primer paso consiste en la creación de la geometría del dominio el cual se desea simular.
2. Tipo de malla: La elección del tipo de malla puede tener un impacto significativo en la precisión de la eficiencia de la simulación. Se debe seleccionar el tipo de mallada adecuado en función de la geometría y la física del problema (Figura 2.11).
3. Densidad del mallado: Este paso consiste en determinar la cantidad apropiada de elementos que se requiere para capturar las características del flujo de interés. Esto puede depender en factores como el número de Reynolds, el tamaño de la geometría y el nivel de precisión deseado.
4. Generación del mallado: Una vez definidos los pasos anteriores, se puede proceder con la creación de la malla. Esto implica la creación de volúmenes finitos o celdas que conformarán la malla.
5. Calidad de mallado: Después de la creación de la malla es importante checar la calidad para asegurarse de la forma y tamaño apropiadas de las celdas, y verificar que no contenga errores o inconsistencias. Las mallas mal generadas pueden conducir a resultados de simulación inestables.
6. Refinamiento: En algunos casos, es necesario refinar la malla en ciertas regiones del dominio para capturar características específicas del flujo de interés.

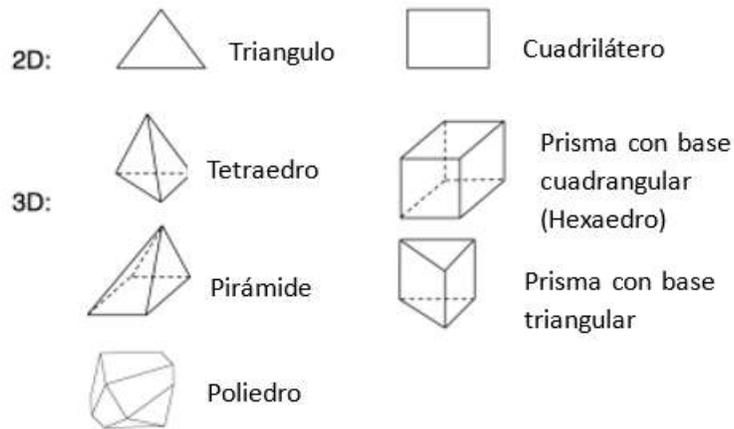


Figura 2.11 Tipos de celdas que se pueden emplear para discretizar el dominio

Este proceso es de suma importancia en la configuración de la simulación CFD, ya que puede afectar directamente la calidad y fiabilidad de los resultados. Se requiere de mucha atención en la geometría, física del problema, y el nivel de precisión, así como la atención al detalle y el control de calidad exhaustivo.

Existen dos parámetros importantes los cuales son indispensables de analizar para validar la calidad del mallado, dichos parámetros son oblicuidad (la desviación del propio elemento) y ortogonalidad (representa la relación entre el elemento y los elementos adyacentes) representados en la (Figura 2.12), además las recomendaciones del manual proporciona valores que permiten garantizar la calidad del mallado en relación con los parámetros antes mencionados dichos valores se muestran en la (Tabla 2.1).

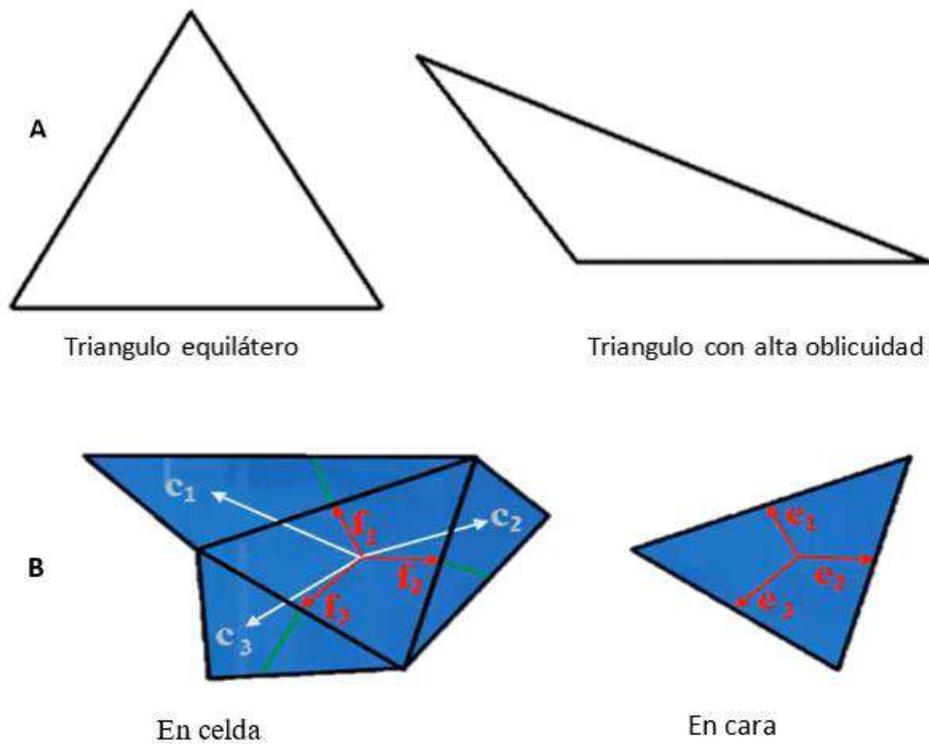


Figura 2.12 A) Oblicuidad de la celda y B) Ortogonalidad de la celda

Tabla 2.1 Valores que permiten definir la calidad del mallado

	Excelente	Muy buena	Buena	Aceptable	Mala	Inaceptable
Oblicuidad	0 - 0.25	0.25 - 0.50	0.50 - 0.80	0.80 - 0.94	0.95 - 0.97	0.98 - 1.00
Ortogonalidad	0.95 - 1.00	0.70 - 0.95	0.20 - 0.69	0.15 - 0.20	0.001 - 0.14	0 - 0.001

### 2.11.1 Medida $y^+$

La distancia adimensional  $y^+$ , es a menudo utilizada para describir que tan gruesa o fina es una malla para un patrón de flujo. Es importante determinar el tamaño apropiado de las celdas cerca de las paredes, ya que las leyes de pared del modelo de turbulencia tienen restricciones en el valor  $y^+$  en la pared.

Para predecir la altura de la primera capa se utiliza el valor  $y^+$  de la siguiente manera:

$$y^+ = \frac{\rho * u_* * y_p}{\nu} \quad (65)$$

Donde:

$\rho$  Es la densidad del fluido,

$u_*$  Es la velocidad de fricción,

$y_p$  Es la distancia del centro de la celda a la pared más cercana,

$\nu$  Es la viscosidad cinemática local del fluido.

## **2.12 Condiciones de Frontera (BC)**

Las Condiciones de Frontera (BC por sus siglas en inglés) son una parte esencial de las simulaciones CFD. Se definen los valores de las variables del fluido como: (temperatura, presión y velocidad) en el perímetro del dominio computacional. Esto es necesario para solucionar las ecuaciones que gobiernan y obtener el comportamiento del flujo a través del dominio. A continuación, se describen los tipos de más comunes de BC utilizados en la simulación CFD:

1. Entrada: En esta se especifica usualmente el valor de la velocidad.
2. Salida: Este tipo de condición define la presión de salida donde usualmente se dan los valores de presión.
3. Muro: Este tipo de condición es usada para los muros, pudiendo modificar parámetros como: (rugosidad del muro, condiciones de cortante del muro y movimientos de muro). Por ejemplo: los muros de un túnel, las caras de un sólido, las paredes de un tanque, etc.
4. Simetría: Este tipo de condición se utiliza para geometrías simétricas, especificando que las variables de flujo son simétricas con respecto al límite.

Estas condiciones se pueden aplicar a diferentes tipos de flujos teniendo un impacto significativo en la calidad y estabilidad de los resultados de la simulación. Por lo que es importante escoger adecuadamente las condiciones de frontera basado en la física del problema.

Las BC necesitan ser nombradas en el dominio del flujo que se esté trabajando. Las caras pueden pertenecer a una figura 2D o 3D, dándole a cada cara un nombre ver (Figura 2.13).

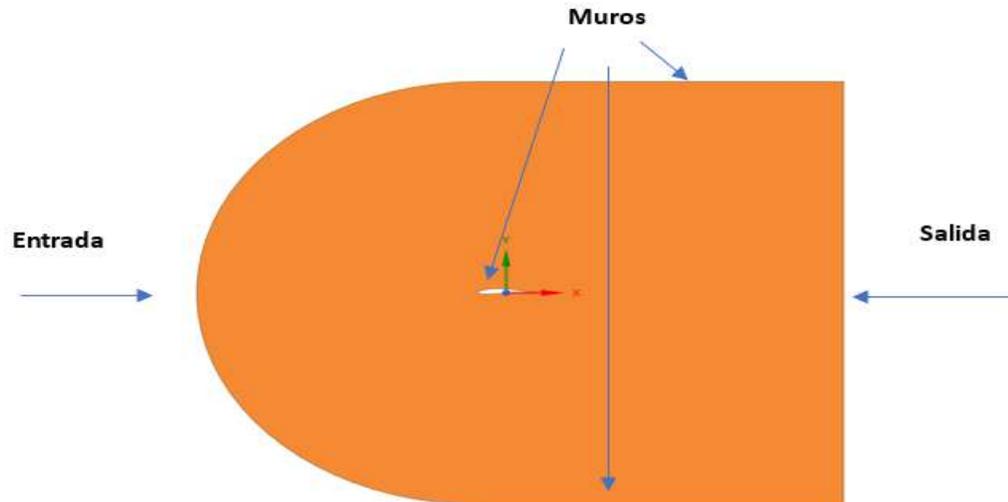


Figura 2.13 Condiciones de frontera

### 2.12.1 Capa Limite Atmosférica (ABL)

La Capa Limite Atmosférica (ABL por sus siglas en inglés), se utiliza como dato de entrada en el perfil de velocidad, con valor 0 a nivel de piso el cual incrementa gradualmente con la altura  $z$ . Para ello se utilizan ecuaciones las cuales se acoplan al modelo turbulento  $k - \epsilon$ .

El perfil logarítmico tiene la siguiente formulación:

$$u = \frac{u^*}{K} \cdot \ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right) \quad (66)$$

Donde:

$K$  Es la constante de Von Karman igual a 0.4.

$z_0$  Es la altura de rugosidad aerodinámica este parámetro se da en  $m$ .

$z$  Es la altura en la cual la velocidad es calculada.

$u^*$  Es la velocidad de fricción, dada por:

$$u^* = K \cdot \frac{u_{ref}}{\ln\left(\frac{z_{ref} + z_0}{z_0}\right)} \quad (67)$$

Donde:

$u_{ref}$  Es la velocidad de referencia, este dato se da como entrada en  $m/s$ .

$z_{ref}$  Es la altura de referencia, este dato se da en  $m$ .

La energía cinemática turbulenta  $k$  se muestra a continuación. Donde  $c_\mu$  es la constante de viscosidad la cual es igual a 0.09.

$$k = \frac{u^{*2}}{\sqrt{c_\mu}} \quad (68)$$

Finalmente, la relación de disipación  $\epsilon$ , la fórmula es:

$$\epsilon = \frac{u^{*3}}{K(z + z_0)} \quad (69)$$

Los valores asignados a las constantes del modelo turbulento usualmente se dan con los siguientes valores encontrado en la investigación de (Hargreaves & Wright, 2007).

$$C_1 = 1.44; C_2 = 1.92; C_{3,RDT} = 0.09; \sigma_k = 1; \sigma_\epsilon = 1.11$$

### 2.13 Número de Reynolds

Para determinar el régimen del flujo laminar o turbulento, se depende básicamente de cuatro variables:

- 1) La densidad  $\rho$  del fluido.
- 2) La viscosidad  $\mu$  del fluido.
- 3) El diámetro  $D$  del conducto.

4) La velocidad promedio  $v$  del flujo del fluido

Estas variables permiten determinar el conocido número de Reynold,  $N_{Re}$  :

$$N_{Re} = \frac{Dv\rho}{\mu} \quad (70)$$

Donde:

$N_{Re} < 2000 \rightarrow$  Flujo laminar.

$2000 < N_{Re} < 4000 \rightarrow$  Región de transición.

$N_{Re} > 4000 \rightarrow$  Flujo turbulento

### **2.14 Métodos numéricos para flujos turbulentos**

La mayoría de los flujos encontrados en la práctica son turbulentos por lo que requieren de un tratamiento especial. Para mayor detalle en este apartado consultar (Ferziger, 2002) (Pedrozo Acuña & Torres-Freyermuth, 2011) (Alonzo García, Gutiérrez Torres, Jiménez Bernal, López Aguado, & Barbosa Saldaña, 2011). Los flujos turbulentos se caracterizan por las siguientes propiedades:

- Los flujos turbulentos son altamente inestables.
- Son tridimensionales.
- Contiene una gran cantidad de vorticidad.
- La turbulencia aumenta a la velocidad que se agitan las cantidades conservadas.
- La turbulencia pone en contacto fluidos con diferente contenido de cantidad en movimiento.
- Contienen estructuras coherentes, repetibles y esencialmente deterministas que son responsables de gran parte de la mezcla.
- Fluctúan en una amplia gama de escalas de longitud y tiempo.

Todas las propiedades son importantes, en la mayoría de los casos los efectos provocados por la turbulencia no son deseados y dependen del uso que se desee. Para los ingenieros es necesario entender y poder predecir sus efectos para poder lograr buenos diseños.

Los métodos numéricos surgieron como consecuencia de las necesidades para facilitar el tiempo, gasto económico, resolución y calidad de las técnicas pasadas. Por tanto, los métodos numéricos juegan un papel importante.

#### **2.14.1 Simulación Numérica Directa (DNS)**

Esta aproximación por Simulación Numérica directa (DNS por sus siglas en inglés) resuelve numéricamente las ecuaciones de Navier- Stokes con un enfoque más preciso sin ninguna simplificación. Para su solución se hace uso de una malla fina que permita captar las fluctuaciones más pequeñas (como la escala de Kolmogorov,  $\eta$ ) y que puedan cubrir todo el dominio de la resolución. Para tener una idea más general, el mallado que se necesita en cada dirección para representar un flujo isotrópico homogéneo es del orden de  $\frac{L}{\eta}$  siendo esta relación proporcional a  $N_{Re}^{3/4}$  el número de Reynold está basado en la magnitud de las fluctuaciones de velocidad y la escala integral siendo estos parámetros del orden de 0.01 veces el número de Reynold microscópico, esto genera costes computacionales muy altos.

Sin embargo, no quiere decir que no tenga utilidad a pesar de su alto costo computacional, pues las simulaciones directas son un medio único para estudiar la turbulencia. Los resultados obtenidos de DNS contienen información muy detallada sobre el flujo, siendo esto de mucho interés para el usuario. Así, se puede obtener información detallada de la velocidad, la presión y muchas otras variables de interés. Los resultados obtenidos mediante la implementación de este método pueden ser considerados equivalentes a lo obtenidos en una experimentación y pueden ser empleados para producir información estadística o simplemente para visualizar la simulación. Además de que se puede ver a gran detalle las estructuras presentes en el flujo. Esta información puede ser usada para desarrollar conocimiento de calidad en la física del flujo o construir modelos cuantitativos. Esta herramienta permitió desarrollar otros modelos como RANS que se mostrará en el siguiente apartado.

#### **2.14.2 Navier Stokes Reynolds Promedio (RANS)**

Muchas de las veces el interés por parte de los ingenieros sobre el conocimiento cuantitativo de las propiedades de los flujos turbulentos, son los promedios de las fuerzas en un cuerpo,

así como su distribución. El método de Navier Stokes Reynolds promedio (RANS por sus siglas en inglés) es utilizado. Con él se obtiene el promediado de las ecuaciones de Navier-Stokes en una discretización del dominio mucho mayor, logrando obtener velocidades, presión, temperatura y transporte medio en el flujo, despreciando el detalle en las fluctuaciones. Este método supone una reducción significativa en el tiempo de análisis y capacidad computacional.

### 2.14.3 Simulación de grandes remolinos (LES)

Como se ha visto los flujos turbulentos contienen un amplio espectro de escalas tanto espaciales como temporales, El rango de medidas de remolinos que se pueden encontrar un flujo se muestra en la (Figura 2.14).

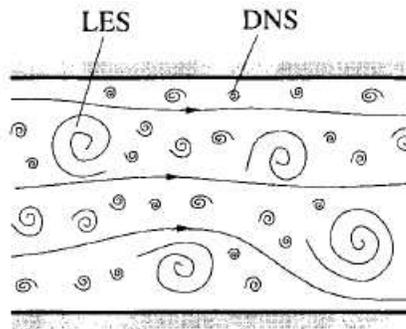


Figura 2.14 Representación esquemática del movimiento turbulento, tomada de (Ferziger, 2002)

En el modelo LES los remolinos más grandes se resuelven, mientras que el resto son modelados, haciendo de los más grandes efectivos de las propiedades conservadoras y dependientes de las características propias del problema (de la geometría y condiciones de frontera).

Por otro lado, los remolinos más pequeños se pueden considerar independientes de las características antes mencionadas, pues tienen tendencia a la isotropía por lo que su comportamiento es más universal haciendo más fácil encontrar un modelo turbulento para remolinos de pequeña escala.

Como conclusión el modelo LES resuelve remolinos relativamente grandes, permitiendo la implementación de mallados más grandes y pasos temporales mayores respecto a DNS, pero con mallas más finas que las empleadas en el modelo RANS. Para obtener resultados confiables se requiere emplear largos periodos de tiempo. Usualmente este método se emplea para flujos cuando el número de Reynolds es alto o cuando la geometría es muy compleja para poder emplear DNS.

#### 2.14.4 Modelo $k - \epsilon$

Este es un modelo turbulento el cual soluciona dos ecuaciones diferenciales, que implica las variables dependientes  $k$  y  $\epsilon$  (ver ecuación 53). Es un muy modelo que brinda importancia para flujos adyacentes a paredes sólidas y el cual es muy empleado en la literatura para fines similares al de este trabajo. Para mayor detalle del método se sugiere consultar (Launder & Spalding, 1974).

La energía turbulenta cinética también conocida por su abreviación en inglés como TKE, mide la energía que es contenida en las fluctuaciones y se define como:

$$\frac{D}{DT}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + P - \rho \epsilon \quad (71)$$

En donde:

$k$  = energía turbulenta cinética [ $m^2/s^2$ ]

$D_k$  = Difusividad efectiva para  $k$  [-]

$P$  = Tasa de producción de energía cinética turbulenta [ $m^2/s^3$ ]

$\epsilon$  = Tasa de disipación de energía cinética turbulenta [ $m^2/s^3$ ]

La tasa de disipación de energía turbulenta  $\epsilon$ , es la medida de la velocidad a la que se disipa la energía cinética turbulenta y se define como:

$$\frac{D}{Dt}(\rho\epsilon) = \nabla \cdot (\rho D_\epsilon \nabla \epsilon) + \frac{C_1 \epsilon}{k} \left( P + C_3 \frac{2}{3} k \nabla \cdot \mathbf{u} \right) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (72)$$

Donde:

$D_\epsilon$  = Difusividad efectiva para  $\epsilon$  [-]

$C_1$  = Coeficiente del modelo [-]

$C_2$  = Coeficiente del modelo [-]

Por último, la viscosidad turbulenta,  $\nu_t$  [ $m^2/s$ ]

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (73)$$

Donde:

$C_\mu$  = Coeficiente del modelo para la viscosidad turbulenta [-]

Cuando se presenta un alto número de Reynolds, la ecuación de transporte en el software ANSYS FLUENT para  $\epsilon$  se puede expresar:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho \epsilon) + \nabla \cdot (\alpha \rho \mathbf{u} \epsilon) - \nabla^2(\alpha \rho D_\epsilon \epsilon) = \\ & C_1 \alpha \rho G \frac{\epsilon}{k} - \left( \left( \frac{2}{3} C_1 - C_3, \text{RDT} \right) \alpha \rho \nabla \cdot \mathbf{u} \epsilon \right) - \left( C_2 \alpha \rho \frac{\epsilon}{k} \epsilon \right) + S_\epsilon + S_{fvOptions} \end{aligned} \quad (74)$$

Donde:

$\alpha$  = Fracción de fase de la fase dada [-]

$\rho$  = Densidad del fluido [ $kg/m^3$ ]

$G$  = parte anisotrópica del tensor de tensión de Reynolds [ $m^2/s^3$ ]

$D_\epsilon$  = Difusividad efectiva para  $\epsilon$  [-]

$C_1$  = Coeficiente del modelo [s]

$C_2$  = Coeficiente del modelo [-]

$C_3$  = Coeficiente del término de compresión de la teoría de la distorsión rápida [-]

$S_\epsilon$  = Término fuente interno para  $\epsilon$

$S_{fvOptions}$  = Términos fuente introducidos por el diccionario fvOptions para  $\epsilon$

Y la ecuación de la energía cinética turbulenta  $k$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho k) + \nabla \cdot (\alpha\rho\mathbf{u}k) - \nabla^2(\alpha\rho D_k k) = \\ \alpha\rho G - \left(\frac{2}{3}\alpha\rho\nabla \cdot \mathbf{u}k\right) - \left(\alpha\rho\frac{\epsilon}{k}k\right) + S_k + S_{fvOptions} \end{aligned} \quad (75)$$

Donde:

$S_k$  = Término fuente interno para  $k$

$S_{fvOptions}$  = Términos fuente introducidos por el diccionario fvOptions para  $k$

De acuerdo con las recomendaciones de (Launder & Spalding, 1974) y la guía de usuario de ANASYS las constantes que aparecen en las ecuaciones toman los valores de:

$$C_\mu = 0.09; C_1 = 1.44; C_2 = 1.92; C_{3,RDT} = 0.0; \sigma_k = 1; \sigma_\epsilon = 1.3$$

### 2.15 Procedimiento conforme al manual (CFE 2020)

El proceso correspondiente para la determinación de presiones ejercidas por viento para estructuras con una altura no mayor a 15 m, se hace uso del manual de la Comisión Federal de Electricidad (CFE 2020), la cual enlista una serie de fórmulas correspondientes al método estático.

Uno de los primeros pasos es determinar la presión ejercida por el viento al actuar en una superficie que varía su intensidad según la velocidad y dirección del viento. La presión dinámica de la base  $q_z$  determina esta presión y se calcula con la ecuación:

$$q_z = 0.0048 GV_D^2 \left[ \frac{kg}{m^2} \right] \quad (76)$$

Donde  $V_D$  es la velocidad básica de diseño en km/h, y  $G$  el factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar.

El valor de  $G$ , adimensional, se determina con la siguiente ecuación:

$$G = \frac{0.392\Omega}{273 + \tau} \quad (77)$$

donde  $\Omega$  es la presión barométrica y  $\tau$  es el valor medio anual de temperaturas mínimas diarias, en °C.

siguiendo los pasos enlistados en el manual la presión actuante  $p_z$  se determina en la ecuación 78 la cual tiene sus variaciones según sea el caso si es una construcción cerrada o abierta para mayor detalle consultar el manual.

$$p_z = C_p q_z \quad (78)$$

En donde  $C_p$  es el coeficiente de presión, obtenido de estudios en túnel de viento

La velocidad básica de diseño  $V_D$  tiene como finalidad calcular los efectos del viento sobre la estructura y se determina con la siguiente ecuación:

$$V_D = F_T F_{Tz} V_R \quad (79)$$

el factor adimensional que depende de la topografía local,  $F_{Tz}$  es el factor adimensional que toma en cuenta el efecto de las características de la exposición local,  $V_R$  es la velocidad regional de ráfaga (en Km/h) que le corresponde al sitio en donde se construirá la estructura.

Donde,  $C_p$  es el coeficiente de presión, obtenido de estudios en túnel de viento.  $A_E$  es el área expuesta que es la proyección del cuerpo sobre un plano ortogonal a la dirección del viento.

Esta expresión es la que se propone en la mayoría de los reglamentos para diseño por viento. Para el caso de esta nación, esta expresión es la única propuesta por los dos reglamentos más significativos, el Manual de la Comisión Federal de Electricidad de las y las Normas Técnicas Complementarias para el Distrito Federal.

## 2.16 Procedimiento conforme al Euro Código

El valor fundamental de la velocidad básica del viento  $v_{b,0}$  es la velocidad media característica del viento en 10 minutos, la velocidad básica  $v_b$  se puede calcular como:

$$v_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot v_{b,0} \quad (80)$$

Donde:  $C_{dir}$  es el factor de dirección,  $C_{season}$  es el factor de estación del año.

Los valores característicos se determinan a partir de la velocidad de referencia  $v_{b,0}$  de la presión dinámica de referencia  $q_b$ . El cálculo de la presión dinámica se establece aplicando el teorema de Bernoulli a partir de la velocidad del viento en m/s:

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (81)$$

Con  $\rho$  densidad del aire =  $1.225 \text{ kg/m}^3$

La velocidad media  $v_m(z)$  a una altura  $z$  sobre el nivel del suelo depende en la rugosidad, la topografía y la velocidad básica  $v_b$ .

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b \quad (82)$$

Donde:  $c_r(z)$  es el factor de rugosidad y  $c_0(z)$  es el factor topográfico.

El factor de rugosidad  $c_r(z)$  se puede determinar con las siguientes ecuaciones:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ para } z_{min} \leq z < z_{max} \quad (83)$$
$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \text{ para } z \leq z_{min}$$

Donde:

$l_0$  Es la longitud de rugosidad.

$k_r$  Es el factor del terreno dependiente de la longitud de rugosidad  $l_0$  y se calcula como:

$$k_r = 0.19 \left( \frac{l_0}{z_0} \right)^{0.007} \quad (84)$$

Donde:

$z_0$ , Se puede obtener de la Tabla 2.2

$z_{min}$  Es la longitud mínima definida en Tabla 2.2

$z_{max}$  Se puede tomar como 200m

Tabla 2.2 Categorías del terreno

Categoría del terreno	$z_0$	$z_{min}$
<b>0)</b> Mares o áreas de costa expuestas al océano.	0.003	1
<b>1)</b> Lagos o planicies y áreas horizontales con vegetación despreciable y sin obstáculos.	0.01	1
<b>2)</b> Área con vegetación pequeña y grande, con obstáculos aislados (árboles, construcciones) con separaciones de al menos 20 obstáculos de longitud.	0.05	2
<b>3)</b> Área cubierta de vegetación normal, edificios, obstáculos aislados (árboles edificios) con separación máxima de 20 obstáculos de longitud como; ciudades, suburbios, bosques etc.	0.3	5
<b>4)</b> Área en la cual al menos el 15% de las caras son cubiertas por edificios y su altura promedio excede los 15 m.	1	10

### III Antecedentes

La forma de estudiar los efectos del viento en estructuras de baja altura a través del sector de la investigación científica se basa prácticamente en las siguientes metodologías: (1) el uso de túnel de viento o experimentación a gran escala; (2) el uso de simulaciones CFD. Ambas metodologías surgieron como dispositivos para abordar la necesidad de comprender y predecir fenómenos relacionados con el flujo, dando como resultado una gran cantidad de aplicaciones multidisciplinarias tales como:

- Aeronáutica.
- Ingeniería Civil, Arquitectura.
- Energías Renovables.
- Meteorología.
- Entre otras.

Para entender mejor en qué consiste cada metodología, se hace una breve descripción. El túnel de viento consiste en una instalación en la que se obtiene un flujo de aire de características controladas en una cámara de ensayo. De esta forma se pueden determinar los efectos del viento sobre objetos o modelos a escala (Figura 3.1). Por otro lado, los laboratorios que permiten pruebas a gran escala tienen características más amplias. Por ejemplo, la velocidad del viento es similar a la de un gran huracán, al igual que los efectos de la lluvia y los escombros (Figura 3.2). Finalmente, la simulación CFD puede considerarse como un análisis de sistemas que involucran flujo de fluidos, transferencia de calor y fenómenos asociados como reacciones químicas por medio de simulación computacional (González Mora, 2018) (Figura 3.3). Las ecuaciones de Navier Stokes generalmente se resuelven en CFD con FVM.



Figura 3.1 Túnel de viento y modelo a escala tomada de

<https://www.youtube.com/watch?v=UEgk2Bgz16s>



Figura 3.2 Prueba de viento a escala real en el laboratorio WOW, tomada de

<https://www.youtube.com/watch?v=kkI0UjmFFDs>

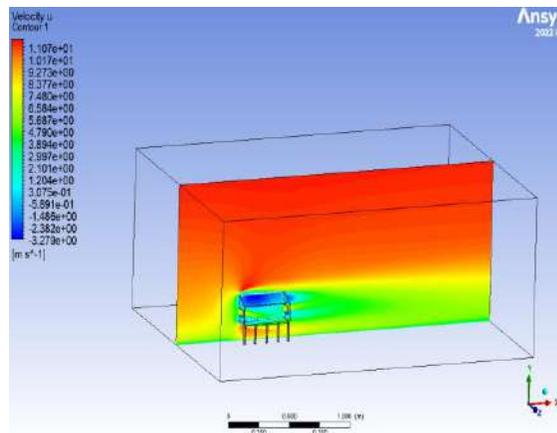


Figura 3.3 Simulación CFD de una vivienda en software ANSYS FLUENT

Como se mencionó anteriormente, México, Centroamérica y el Caribe son vulnerables a la presencia de huracanes. Durante estos eventos se ha recopilado valiosa información de campo para determinar características y problemas comunes en caso de grandes ráfagas de viento. Los huracanes Gilbert 1988 y Odile 2014 azotaron la República Mexicana, dejando grandes pérdidas económicas y humanas como consecuencia de normas de construcción inadecuadas y materiales de construcción de bajo rendimiento. Las investigaciones de sitio realizadas por (Rosengaus Moshinsky & Sánchez Sesma, 1990) y (Murià-Vila, y otros, 2018) presentan un informe que detalla estos eventos, destacando la falta de estudios para reducir los daños

causados. La necesidad de medidas más robustas frente a los problemas generados por los vientos extremos en los países antes mencionados se discute en los informes de (Reinoso Angulo, Jaimes Tellez, Ordaz Schroeder, & Niño Lázaro, 2010) y (Comarazamy, 2005) así como en el trabajo de (Balbastro & Sonzogni, 2008). Hasta la fecha, se sabe que partes de una casa son las más vulnerables a los vientos extremos. En la búsqueda de una solución para evitar el colapso de los techos de fibrocemento liviano, común en la región del Caribe, (Estrada Cingualbres, Rodríguez Peña, Lengarán Ávila, & Campos Mobilla, 2017) presentó una investigación para determinar las capacidades mecánicas del material utilizado mediante el uso de modelos de métodos finitos, demostrando su insuficiencia para soportar huracanes categoría 5. Este estudio también proporciona una alternativa simple para estabilizar techos contra vientos extremos mediante el uso de eslingas de carga.

Estados Unidos ha tomado medidas más estrictas en la búsqueda de soluciones para reducir los daños causados por huracanes en sus costas, invirtiendo en proyectos millonarios para realizar investigaciones de punta que permitan generar estrategias de mitigación ante el riesgo de huracanes, con los siguientes objetivos: mejorar los manuales y normas de construcción, desarrollo de materiales de construcción y el aprendizaje de los estudiantes e investigadores del área. Laboratorios como Wall of The Wind (WOW) y Three Little Pigs fueron creados para este fin en las investigaciones de (Kopp G., Morrison, Gavanski, Henderson, & Hong, 2010) y (Leatherman, Gan Chowdhury, & Robertson, 2007) se brinda más detalles sobre estos laboratorios. Una de las ventajas que ofrecen estos proyectos es poder representar una casa con medidas reales y características geométricas típicas y materiales utilizados en la región de análisis. En (Kopp, Morrison, & Henderson, Full-scale testing of low-rise, residential buildings with realistic wind loads, 2012) se propusieron mejoras para las regulaciones, estándares de seguridad de productos y modelos de pérdidas.

Otros países también han abordado el tema por los daños que generan los vientos extremos: Australia, Japón, India entre otros, han presentado sus propuestas e iniciativas para mitigar los efectos causados a las estructuras de baja altura. Las siguientes secciones presentan las alternativas utilizadas en diferentes partes de las estructuras para reducir las presiones del viento.

### 3.2 Variación en Bordes

Otra solución muy utilizada para mitigar los efectos del viento es modificar las esquinas de las estructuras. De hecho, las esquinas afiladas pueden conducir a una separación del flujo de viento, lo que genera altas cargas inducidas por la interacción entre el viento y la estructura. La sustitución de las esquinas de  $90^\circ$  por formas aerodinámicas tuvo una respuesta positiva en los edificios de gran altura. Por ejemplo, el rascacielos Taipei 101 (Taiwán) y los edificios Mitsubishi Heavy Industries Yokohama (Japón). En ocasiones las modificaciones no necesariamente tienen que ser complicadas ya que el hecho de variar la típica forma rectangular o cuadrada por esquinas redondeadas, achaflanadas, biseladas, entre otros (Figura 3.4), es una estrategia menor que se ha utilizado para mejorar el comportamiento frente al viento de edificios altos (Gaur & Raj, 2020) (Mooneghi & Kargarmoakhar, 2016). Por otro lado, también existen formas más sofisticadas o complejas de hacer que las estructuras sean más aerodinámicas con importantes modificaciones estructurales y arquitectónicas. Por ejemplo, la variación en la forma del edificio y los retranqueos en altura, ahusamiento, inclusión de vanos en la parte superior y torsiones del edificio, entre otros (Figura 3.5). El famoso rascacielos Burj Khalifa es un ejemplo del método mencionado. Este tipo de estrategias se han trasladado a estructuras de menor altura, utilizando el mismo principio. En (Aly A.-M. , 2014) se exploraron diferentes configuraciones con varios bordes, destacando la propuesta de un borde aerodinámico inspirado en las alas de los aviones para ayudar a reducir las cargas de viento. Esto también ayuda a interrumpir la formación de vórtices y desvía el flujo de la zona de separación en el borde del techo lejos de los elementos débiles. En (Aly, Chokwitthaya, & Poche, 2017) se implementó una combinación de varias aristas y la implementación de un panel solar como elemento estructural de la casa, presentando una técnica de mitigación amigable con el medio ambiente.

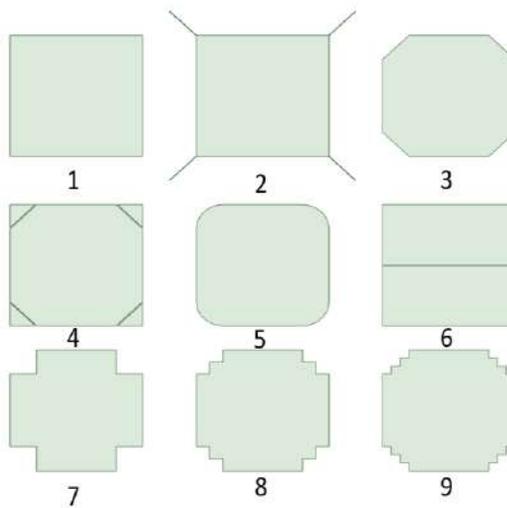


Figura 3.4 Modificaciones simples de esquinas (1 básica, 2 con aletas, 3 sin esquina o biselada, 4 ranurada, 5 redondeada, 6 aperturas ,7 recesión, 8 doble recesión, 9 triple recesión) para modificar la aerodinámica, tomada (Mooneghi & Kargarmoakhar, 2016)

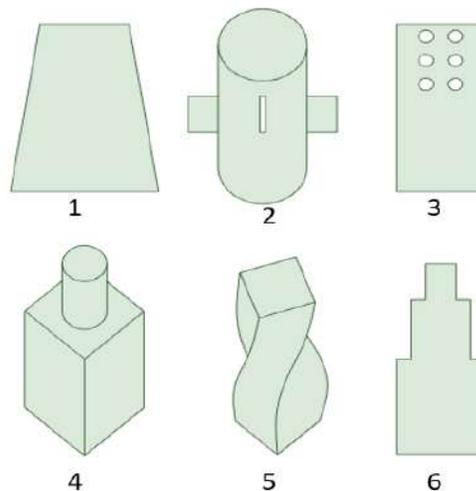


Figura 3.5 Modificaciones más sofisticadas (1 variando el tamaño de la sección transversal, 2 spoilers, 3 aperturas o porosidades, 4 variando la forma de la sección transversal, 5 retorciendo la geometría y 6 regresión escalonada) para mejorar la aerodinámica, tomada de (Mooneghi & Kargarmoakhar, 2016).

### 3.3 Geometrías en techos

Las casas con estructuras de madera son comunes en muchas regiones costeras del mundo, exponiéndose a grandes cargas de viento. Actualmente existe una gran variedad de formas

arquitectónicas para las viviendas y, en consecuencia, para las cubiertas. La pérdida parcial o total de techos es un problema común en estructuras de baja altura debido a los vórtices que se generan en esta zona. Además de dañar gravemente la estructura, también provoca la entrada de agua al interior, aumentando los costes incurridos. Este daño es causado por espesores de chapa inadecuados, sujetadores insuficientes, dispositivos de sujeción inadecuados y procesos de construcción mal ejecutados (Keote , Kumar , & Singh, 2015). Se ha demostrado que el ángulo de inclinación, los materiales utilizados, la forma de la cubierta y el ángulo de incidencia del viento son factores determinantes en el buen comportamiento de esta. Los siguientes trabajos de investigación han abordado la mejora de la estabilidad de las estructuras de cubierta. Por ejemplo, en (Navaratnam, Humphreys, Mendis, & Nguyen, 2020) se menciona que una de las áreas más vulnerables es la conexión techo-pared. Dado que este elemento es el encargado de transmitir y distribuir las cargas generadas, este estudio determinó las posibles causas de su falla y enumeró una serie de recomendaciones para un mejor desempeño. Hoy en día existen muchas formas de techo, por ejemplo: a dos aguas, a cuatro aguas, piramidal, plana, esférica, entre otras (Figura 3.6). Se ha explorado su comportamiento para determinar qué factores y características los hacen vulnerables (Gumley, 1984) (Singh & Roy, 2019) (Xing , Mohotti, & Chauhan, 2018). Se encontró que el techo piramidal presenta un mejor comportamiento aerodinámico.

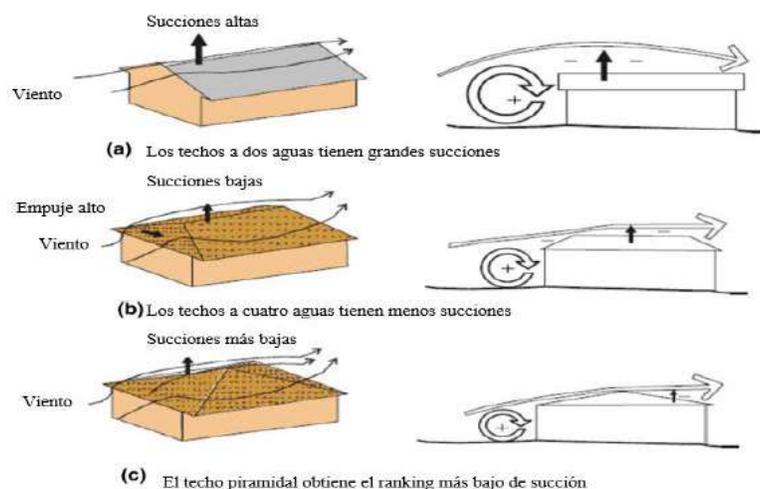


Figura 3.6 Ejemplo de geometrías en techos, tomada de (Keote , Kumar , & Singh, 2015)

### 3.4 Pretil como una estrategia de mitigación

Los pretils juegan un papel importante en la disipación de los efectos del flujo durante el impacto con la estructura. Se han realizado un gran número de estudios al respecto, explorando una amplia gama de diseños y el uso de materiales para mejorar el comportamiento de este sistema de mitigación. Uno de los primeros en realizar estudios al respecto fue (Stathopoulos & Baskaran, 1988), en tiempos más recientes también se ha continuado con el estudio de los parapetos con (Blessing, Chowdhury, Lin, & Huang, 2009) (Suaris & Irwin, 2010) (Pindado & Meseguer, 2003) (Kopp, Mans, & Surry, 2005). Se han probado muchas configuraciones que incluyen: a) parapetos sólidos; b) parapetos porosos; c) parapetos discontinuos; d) parapetos parciales, e) revelación perimetral; f) bordes aerodinámicos; entre otros (Figura 3.7). Se encontró que los parapetos parciales no lograron reducir las presiones negativas en las esquinas en comparación con el caso sin parapetos. Por el contrario, se encontró que los parapetos continuos reducían la presión máxima en las esquinas hasta en un 56% (Kopp, Mans, & Surry, 2005).

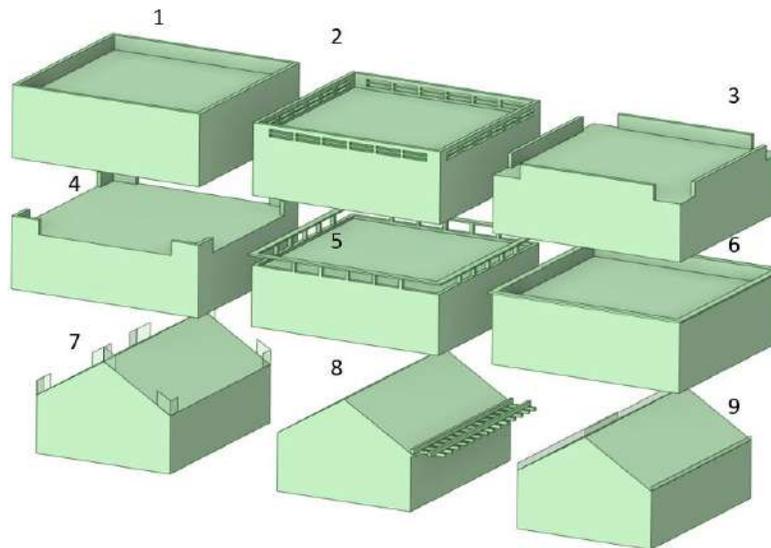


Figura 3.7 Ejemplo de distintos diseños de pretils (1 sólido, 2 poroso, 3 discontinuo, 4 parcial, 5 spoiler perimetral, 6 lados aerodinámicos, 7 perforado discontinuo, 8 pérgola, 9 placa de borde de tejado de longitud completa tomada de (Mooneghi & Kargarmoakhar, 2016).

### 3.5 Casas elevadas

Las casas elevadas han surgido como una alternativa a los daños causados por huracanes. Se colocan sobre una cimentación tipo pilote que les permite elevarse sobre el nivel del suelo. El objetivo principal de estas construcciones es evitar los daños causados por las inundaciones. La variedad existente de este tipo de construcciones se puede observar en diferentes zonas costeras del mundo. Sin embargo, los estándares de construcción no brindan suficiente información sobre las acciones del viento en este tipo de estructuras. Los huracanes recientes han demostrado que las casas elevadas sufren graves daños estructurales a causa de los vientos extremos. Las partes más vulnerables son el techo y la parte baja de la casa, debido a las importantes presiones negativas que provocan el desprendimiento del revestimiento y del techo; en algunos casos, la cimentación se desprende de su ubicación. Para obtener más información sobre este daño, consulte (Amini & Memari, 2021). Por ello, varios investigadores han estado trabajando en el tema tratando de hacer de esta estrategia una opción para combatir los estragos tanto de las inundaciones como de los vientos extremos. En In (Holmes, 1994), se realizaron pruebas en un túnel de viento con un modelo a escala (1:100) de una casa elevada común en la zona costera australiana, encontrando que elevar la casa aumenta el coeficiente de presión promedio en las superficies frontales en un 30%. La propuesta de una técnica innovadora en el diseño de una casa a nivel del suelo, con capacidad de elevarse cuando está expuesta a inundaciones (Figura 3.8) es presentada por (English, Friedland, & Orooji, 2017), mostrando además un buen comportamiento frente a los efectos del viento. El estudio en (Amini & Memari, 2021) mostró que diferentes configuraciones proporcionaron una mejor comprensión del comportamiento de las casas elevadas, recomendando la continuidad de más variables y técnicas de mitigación para mejorar la estabilidad frente a las presiones del viento. En (Abdelfatah, Elawady, Irwin, & Chowdhury, 2022), se presentaron diferentes configuraciones con diferentes elevaciones para determinar los efectos en diferentes partes de la casa.

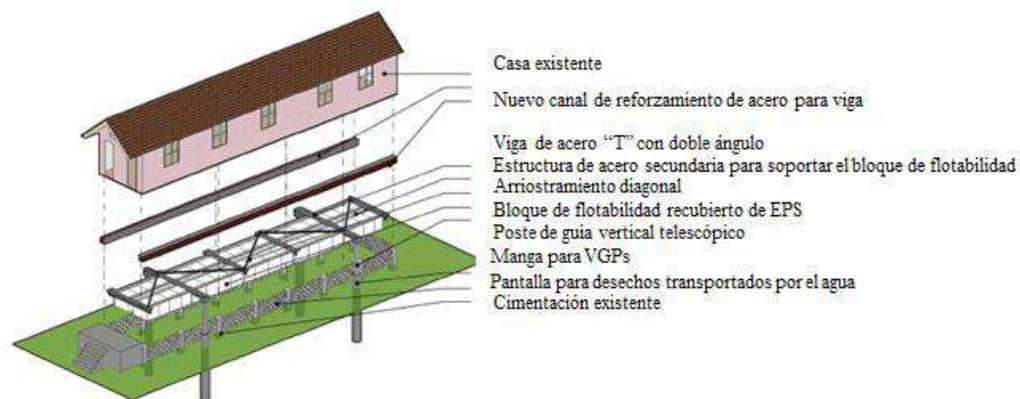


Figura 3.8 Casa anfibia, tomada de (English, Friedland, & Orooji, 2017)

Como se ha visto, existe un amplio campo de investigación en cuanto a las diferentes técnicas que permiten disipar las presiones del viento sobre estructuras de baja altura. Todas las técnicas descritas anteriormente se llevaron a cabo utilizando metodologías como: túnel de viento, laboratorios que permiten la experimentación a escala real y simulaciones CFD. Cabe señalar que cada una de estas técnicas tiene sus propias ventajas y desventajas. Sin embargo, recientemente, gracias a los avances en informática, la metodología CFD se ha desarrollado considerablemente, permitiendo generar simulaciones confiables y precisas. Al obtener resultados similares a los hallazgos experimentales, esta ventaja ha permitido optimizar costos y tiempos, elementos extremadamente valiosos en la investigación y la industria.

### 3.6 Investigaciones UAQ

Cabe destacar que la investigación por parte del cuerpo de profesores y alumnos de la facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro en el área de CFD así como el uso de técnicas en el diseño de experimentos, ha sido abordada de manera exitosa particularmente en el área de estructuras, que es una de los pioneros en el uso de la herramienta CFD. Esto ha permitido de enfocar al análisis del flujo dentro de invernaderos de variables como: temperatura, humedad y  $\text{CO}_2$  y que han sido analizadas de manera eficiente mediante soluciones numéricas (de la Torre-Gea, y otros, 2014), siguiendo con (Horta Rangel, Lara, Váldez Vázquez, & Arreola Sifuentes, 2016) que propusieron un edificio alto irregular con ciertas características en los materiales que lo componen, en el que se realizaron pruebas en

túnel de viento así como una simulación CFD representando las características, las presiones ejercidas por el viento se trasladaron a la estructura haciendo el uso de FSI mediante el algoritmo ALE para obtener el comportamiento mecánico de la estructura obteniendo resultados interesantes sin embargo debido a las capacidades computacionales requeridas existen algunos puntos pendientes que son de gran interés. A demás otras investigaciones similares fue llevada a cabo tal es el caso de (Díaz-Briceño, Horta Rangel, Valdés Vázquez, Pérez Lara y Hernández, & Arroyo Contreras, Aeroelastic Revision of an Atypical Geometry Building through One-way Fluid-structure, 2020) (Díaz-Briceño, Horta Rangel, Valdés Vázquez, Pérez Lara y Hernández, & Arroyo Contreras, 2018) quienes presentaron un modelo de un edificio con una geometría atípica la cual fue revisada mediante técnicas de CFD para poder obtener las presiones ejercidas por el viento las cuales se trasladaron posteriormente haciendo uso de FSI, para poder determinar el comportamiento mecánico, obteniendo información valiosa que es omitida por la normativa mexicana. Una de las investigaciones más recientes fue la de (Espinoza Valdez, y otros, 2023) derivado de los daños causados por el huracán Odile en 2014 a torres eléctricas del estado de baja california se hizo una investigación utilizando la metodología CFD para analizar los coeficientes de presión y poder comparar con la normativa de la CFE teniendo un diferencial negativo conforme a la normativa de aproximadamente de entre el 25 – 30 % en las presiones ejercidas.

A pesar de los esfuerzos de los investigadores por encontrar estrategias de mitigación para mejorar la estabilidad estructural, todavía queda un largo camino por recorrer. Actualmente, más del 50% de la población mundial vive a menos de 200 km de la costa (Appendini & Salles, 2014). En 1996, (Abdelfatah, Elawady, Irwin, & Chowdhury, 2022) estimó que para 2025 aproximadamente el 70% de la población mundial vivirá dentro de los 200 km de la zona costera. Su enfoque de investigación es sumamente importante para México y el mundo. En México, el problema de las casas construidas con materiales precarios se suma a los problemas que plantea, por ejemplo, el tema de las casas elevadas o ángulos de incidencia del viento distintos a  $0^\circ$  o  $90^\circ$ , que no están contemplados en las normas existentes, así como como por la insuficiente investigación científica en esta área.

Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo establecer la propuesta de línea base de investigación para la zona costera de la República Mexicana utilizando CFD que permita explorar nuevas formas de optimizar costos y tiempo de cómputo. Para este propósito se realizó un análisis del comportamiento del viento para 36 configuraciones obtenidas de un CCD, y finalmente se enlista una serie de propuestas que permitan mitigar los efectos de grandes ráfagas de viento. Cada uno de los puntos antes mencionados se describen detalladamente en el siguiente apartado.

### **Hipótesis**

El estudio de los efectos de vientos fuertes sobre edificaciones de poca altura haciendo uso de un diseño central compuesto CCD a través de la Dinámica de Fluidos computacionales CFD permite mejorar el entendimiento del comportamiento del flujo ante distintas configuraciones posibles reduciendo costos y tiempo, además es posible hacer uso de la Metodología de Superficie de Respuesta RSM para generar un modelo predictivo que permita determinar los coeficientes de presión,  $C_p$ .

### **Objetivo general**

Modelar una estructura de poca altura tipo vivienda de zona costera con características diversas mediante la implementación de un diseño central compuesto  $2^{k-p}$ , para generar un total de 36 simulaciones con 5 factores cada uno con 5 parámetros y así obtener un panorama más completo del comportamiento del flujo, obtener los coeficientes de presión en cada una de las configuración y poder formular una base de datos que permita hacer uso de RSM para poder determinar si es un modelo predictivo en términos estadísticos.

### **Objetivos específicos**

- Generar una amplia recopilación de información respecto al tema de estudio que sirva como base y validación de este trabajo.
- Generar un diseño central compuesto ( $k$  factores) en función de parámetros de interés que de acuerdo con la literatura influyen directamente en el comportamiento

del fluido, (ángulo de incidencia del viento  $\theta$ , pendiente de techo  $\alpha$ , aperturas para el paso del flujo %, relación (largo entre ancho  $L/b$ ), altura de pilotes  $h$ .)

- Generar los modelos CFD en el software ANSYS FLUENT.
- Analizar los resultados obtenidos de los modelos revisando cuales son los escenarios más adversos y cuál es el que mejor comportamiento en términos de disipación del flujo.
- Generar regresiones lineales para puntos aleatorios de las simulaciones y así obtener el coeficiente de determinación  $R^2$  para poder determinar que tan bueno es el modelo en términos predictivos.

## IV Materiales y Métodos

La metodología de este proyecto se esquematiza en el diagrama de flujo en la (Figura 4.1), posteriormente se detalla cada punto del proceso.

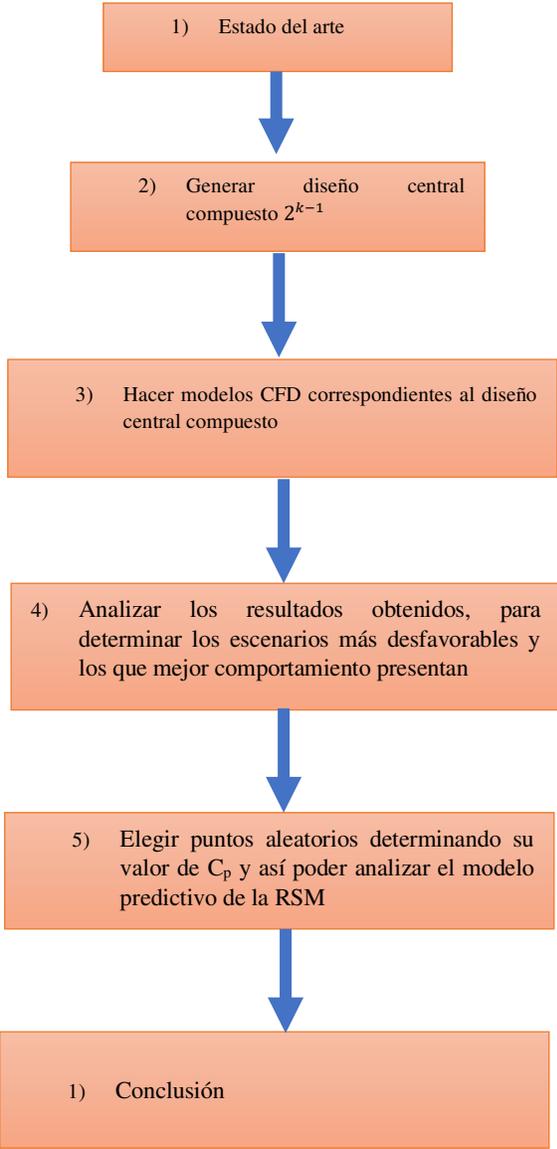


Figura 4.1 Diagrama de flujo de la metodología correspondiente a este trabajo

#### 4.1 Estado del arte

Como se mencionó en el capítulo anterior existe un gran interés por parte del sector científico y gubernamental por: (1) analizar el comportamiento del flujo con distintas configuraciones al interactuar con la estructura; (2) encontrar aquellos factores que hacen vulnerables a las estructuras de poca altura ante huracanes; (3) generar estrategias de mitigación que permitan mejorar la aerodinámica de estructura ante grandes ráfagas de viento. Sabiendo que es un problema de actualidad y se espera tenga un incremento desfavorable debido al calentamiento global este trabajo se centra en continuar con esta línea de investigación haciendo uso de la metodología CFD.

Este capítulo usó como referencia los trabajos de (Abdelfatah, Elawady, Irwin, & Chowdhury, 2022) (Amini & Memari, 2021) (Holmes, 1994) (Xing, Mohotti, & Chauhan, 2018), (Tominaga, y otros, 2008) para extraer los factores significativos para el CCD, configuración del dominio, valores para condiciones de frontera, modelos numéricos y que permitieran servir como marco comparativo.

#### 4.2 Diseño Central Compuesto CCD $2^{k-1}$

CCD se utilizó para explorar 5 factores en 5 niveles. La (Tabla 4.1) proporciona los factores y niveles utilizados, y la (Figura 4.2) muestra los factores de entrada para las configuraciones de los edificios. Se sabe por la literatura que estos factores son significativos en los resultados de  $C_p$  y comportamiento del flujo. Se utilizó la ecuación 3 para determinar el número de simulaciones realizadas.

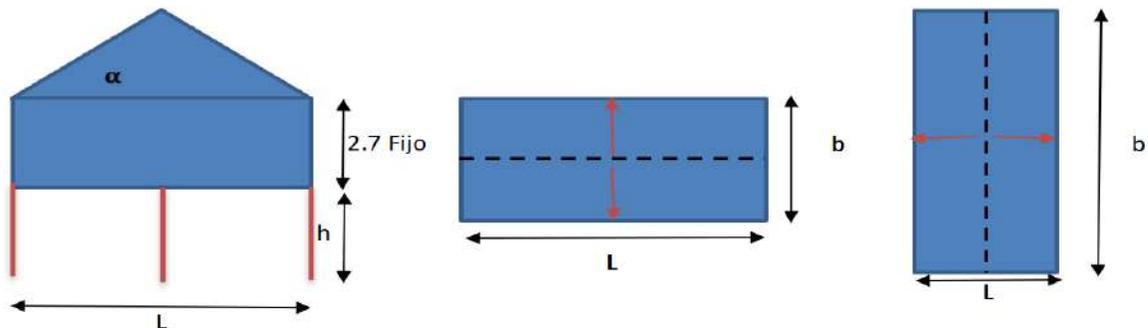


Figura 4.2 Factores a explorar en el CCD

Tabla 4.1 Factores que conforman las entradas del CCD

Entrada	Nivel -2	Nivel -1	Nivel 0	Nivel 1	Nivel 2
Angulo de incidencia del viento, $\theta$ ( $^{\circ}$ )	0	45	45	45	90
Pendiente del techo, $\alpha$ ( $^{\circ}$ )	3	10	20	30	35
Aperturas de la construcción, %	0	15	20	25	30
Relación, L/b	0.5	1	1.5	2	2.5
Altura del pilote sobre el nivel del piso, h (m)	0	1.5	2.5	3	3.5

Se utilizó el software MATLAB para determinar las diferentes configuraciones correspondientes al CCD que se muestran en la (Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Combinaciones del diseño central compuesto

#	$\theta$ ( $^{\circ}$ )	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	%	L/b	h (m)	#	$\theta$ ( $^{\circ}$ )	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	%	L/b	h (m)
1	45	10	15	1	3	19	45	3	20	1.5	2.5
2	45	10	15	2	1.5	20	45	35	20	1.5	2.5
3	45	10	25	1	1.5	21	45	20	0	1.5	2.5
4	45	10	25	2	3	22	45	20	30	1.5	2.5
5	45	30	15	1	1.5	23	45	20	20	0.5	2.5
6	45	30	15	2	3	24	45	20	20	2.5	2.5
7	45	30	25	1	3	25	45	20	20	1.5	0
8	45	30	25	2	1.5	26	45	20	20	1.5	3.5
9	45	10	15	1	1.5	27	45	20	20	1.5	2.5
10	45	10	15	2	3	28	45	20	20	1.5	2.5
11	45	10	25	1	3	29	45	20	20	1.5	2.5
12	45	10	25	2	1.5	30	45	20	20	1.5	2.5
13	45	30	15	1	3	31	45	20	20	1.5	2.5
14	45	30	15	2	1.5	32	45	20	20	1.5	2.5
15	45	30	25	1	1.5	33	45	20	20	1.5	2.5
16	45	30	25	2	3	34	45	20	20	1.5	2.5
17	0	20	20	1.5	2.5	35	45	20	20	1.5	2.5
18	90	20	20	1.5	2.5	36	45	20	20	1.5	2.5

### 4.3 Modelo CFD

El proceso que se utilizó para realizar las 36 configuraciones CFD consta de 3 pasos descritos en el diagrama de flujo (Figura 4.3). La escala utilizada para cada simulación fue 1:20. La relación L/b se describe en la (Tabla 4.3) considerando características importantes como el mínimo de metros cuadrados de construcción considerados por la normativa mexicana, así como una altura estática promedio a nivel de alero de 2.7 m.

Tabla 4.3 Descripción de la relación L/b Propuesta en las geometrías del CCD

Unidades en metros a escala real.				
	L	b	Relación L/b	M <sup>2</sup>
Longitud	5	10	0.5	50
	8	8	1	64
	8	5.3	1.5	42.4
	10	5	2	50
	13	5.2	2.5	67.6

ANSYS WORKBECH FLUENT 2022 R2 se utilizó en este estudio para realizar los cálculos constantes de RANS. Los modelos de construcción se crearon en base a las dimensiones dadas por CCD. El software ayudó a resolver las ecuaciones de Navier-Stokes mediante el uso de FVM, las ecuaciones de presión y momento se acoplan utilizando el algoritmo SIMPLE. El modelo de turbulencia RNG k- $\epsilon$  se considera en este estudio para modelar ABL.

#### 4.3.1 Geometría

Las geometrías fueron creadas en ANSYS CAD SPAICE CLAIM respetando: escala 1:20; altura de entrepiso de 135 mm; pilotes cuadrados de 15×15 mm<sup>2</sup> correspondientes a la cimentación; cada ventana se colocó a 45 mm del piso y se centró en el ancho de la pared como se muestra en la (Figura 4.4). La altura de la ventana se consideró en función del porcentaje de apertura del edificio: 50 mm para valores  $\leq 20\%$  y 75 mm para valores  $\geq 25\%$ . El dominio

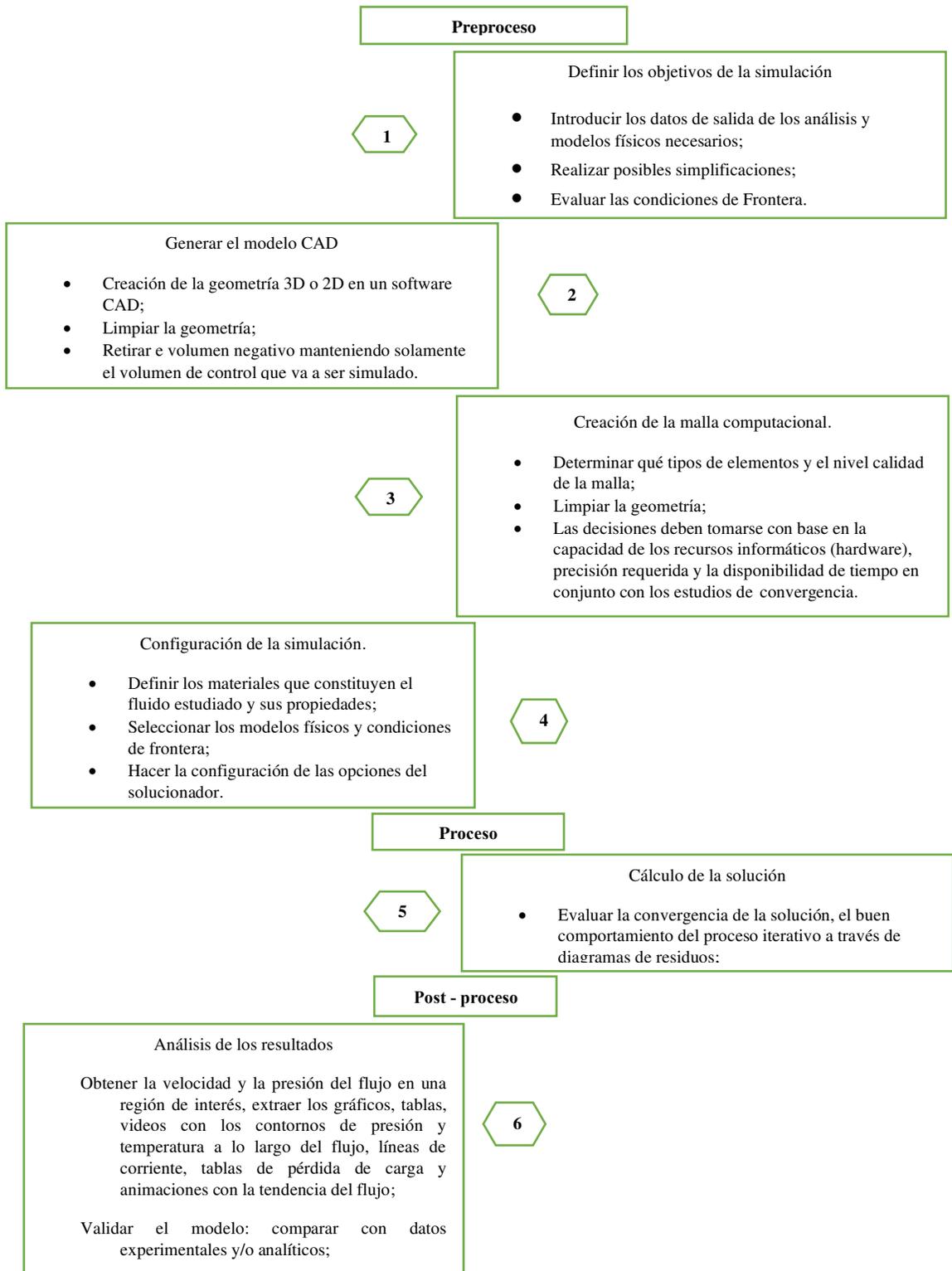


Figura 4.3 Diagrama de flujo del procedimiento para una simulación CFD

de flujo fue delimitado por las condiciones de contorno correspondientes, con  $H = 183 \text{ mm}$ . Para reducir el tiempo de cálculo, se utilizaron las distancias límite mínimas recomendadas, en la (Figura 4.5). Cada modelo se dividió en dos partes para cada análisis. Además, se nombró cada una de las condiciones de contorno (entrada, salida y paredes) ya que el software reconoce los nombres para su posterior procesamiento.

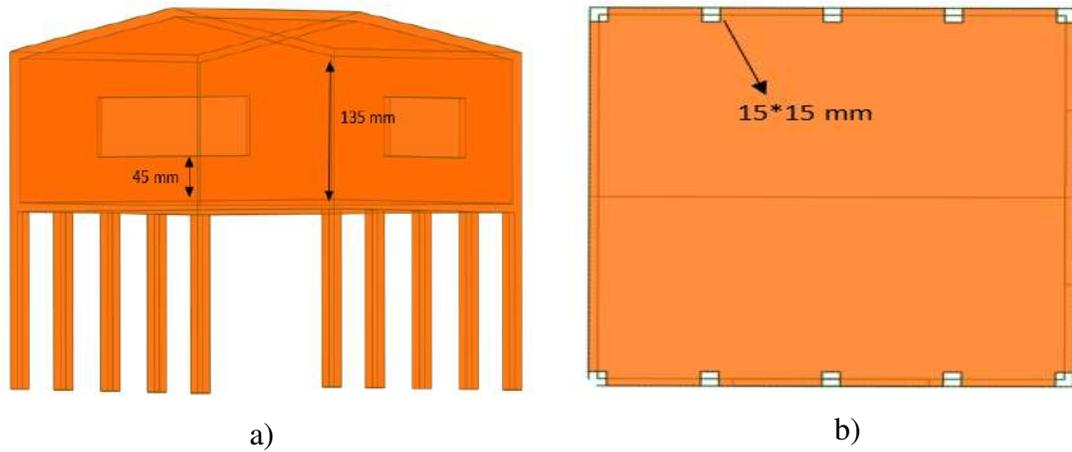


Figura 4.4 Geometría: a) Dimensiones fijas de cada modelo; b) Dimensiones y distancia de pilotes (la distancia es equidistante procurando no exceder los 100 mm de separación)

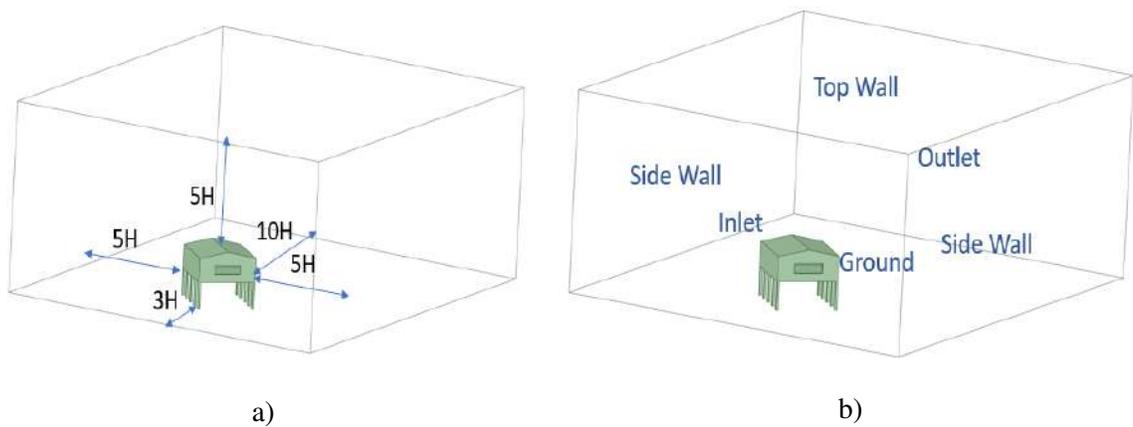


Figura 4.5 a) Medidas generales para la generación del dominio del flujo; b) Asignación de nombres en fronteras

### 4.3.2 Mallado

El mallado se generó en ANSYS FLUENT WITH MESHING en donde se exporto cada modelo CAD teniendo en cuenta cada una de las características importantes para la calidad del modelo, se realizó un análisis de sensibilidad de malla para todos los casos garantizando así la independencia de la resolución del mallado. Con la finalidad de minimizar el costo computacional se optó por dividir en dos partes el análisis de cada configuración como se muestra en la (Figura 4.6) partiendo justo a la mitad en el sentido longitudinal. Se seleccionó una malla fina para cada configuración con la celda más pequeña de 2.5 mm en las paredes de la casa. Además, cada escenario presenta una combinación de celdas poliédricas utilizando la herramienta Poly-Hexacore (Zore, Parkhi, Sasanapuri, & Varghese, 2019) (Figura 4.7). Cada configuración de la Figura 4.4 está entre el orden de 3.000.000 y 5.000.000 celdas. Para las paredes de la casa se utilizaron 10 capas con un espesor de la primera capa de 0,6 mm y una relación de transición de 0.272, por lo que se  $y^+ < 5$  para todos los casos. Finalmente, se verificaron las configuraciones de todas las mallas para varios factores, como la ortogonalidad máxima y la asimetría.

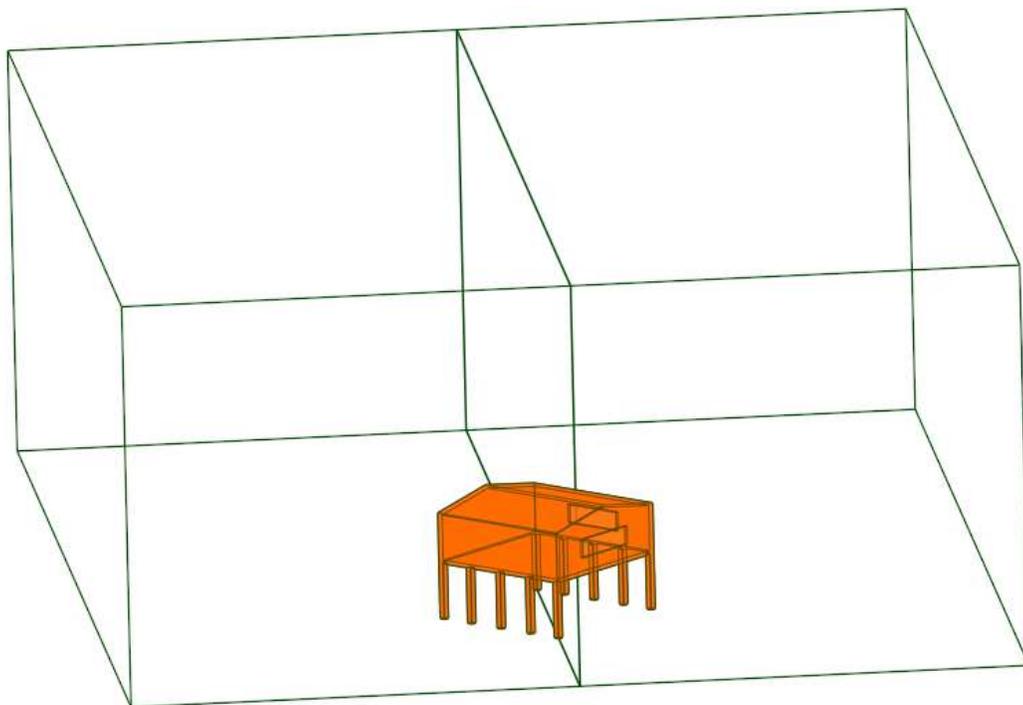


Figura 4.6 Ejemplo de corrida experimental particionada en dos para ahorrar costo computacional

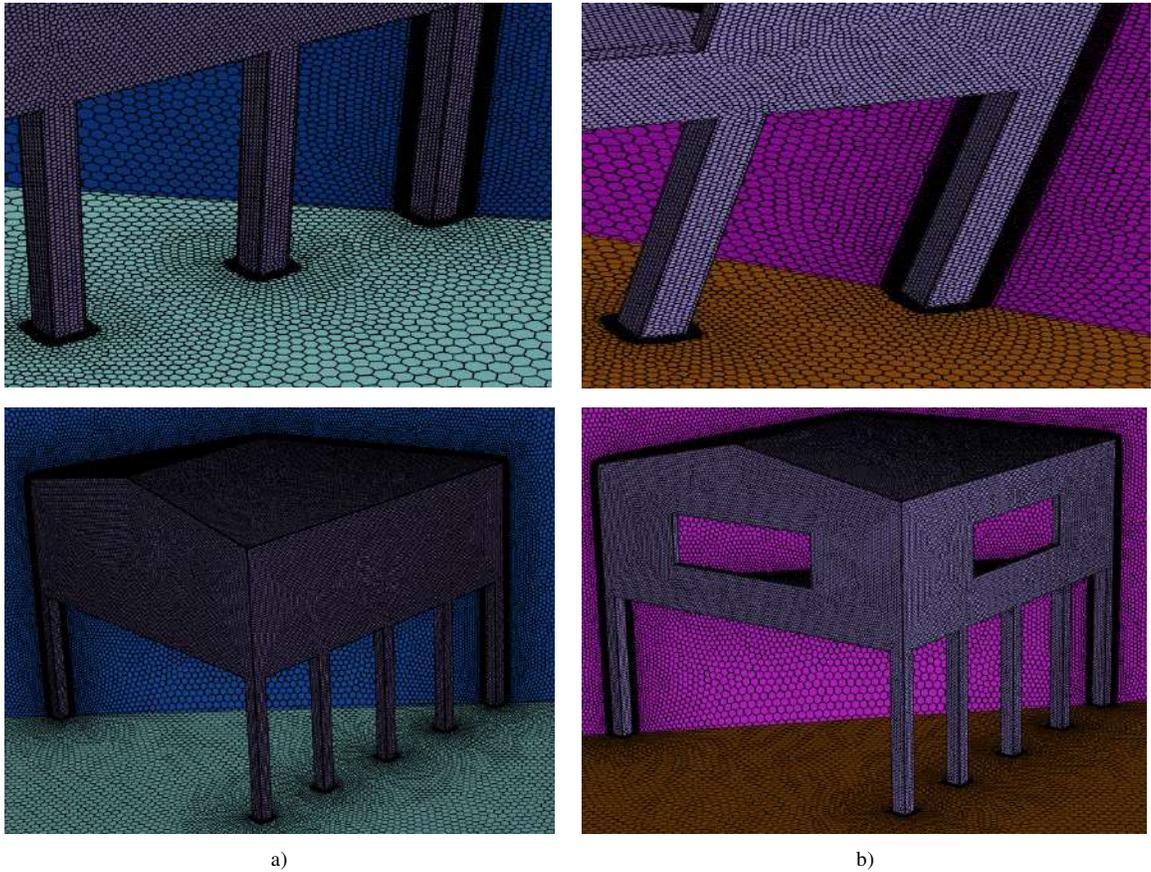


Figura 4.7 Características del mallado final para cada una de las corridas. a) Lado izquierdo; b) Lado derecho

### 4.3.3 Configuración y solución

Todas las simulaciones se realizaron en una computadora personal con un procesador Intel(R) Core (TM) i7-8750H CPU a 2,21 GHz y 16,0 GB de RAM. Se utilizó doble precisión y seis procesadores para las simulaciones. Se seleccionó el modelo de turbulencia RNG k- $\epsilon$  con  $\sigma_k = 1.11$ . Los valores iniciales seleccionados fueron gravedad =  $9.81 \text{ m/s}^2$ , y las características de flujo, densidad  $\rho = 1.255 \text{ kg/m}^3$  y viscosidad  $\nu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/(m*s)}$ . Los valores de entrada para las condiciones de frontera, en particular el perfil de velocidad del viento, se calcularon mediante un algoritmo realizado en lenguaje C++ con las ecuaciones (66, 67, 68 y 69) y con los siguientes valores:  $u_{\text{ref}} = 8.5 \text{ m/s}$ ;  $C_{\mu} = 0.09$ ;  $k = 0,4$ ;  $z_{\text{ref}} = 0.135 \text{ m}$  y  $z_0 = 3 \times 10^{-4} \text{ m}$ . La (Figura 4.8) muestra el perfil de la velocidad del viento. La presión

estática cero se usa en la salida del dominio, y la velocidad normal cero y los gradientes normales cero de todas las variables están en los lados superior y laterales. Las superficies de la casa se tratan como una pared antideslizante sujeta a esfuerzo cortante. Las ecuaciones de presión y momento se acoplan utilizando el algoritmo SIMPLE. Los esquemas de discretización utilizados para los términos de convección y difusión (presión, cantidad de movimiento, TKE,  $\epsilon$ ) son esquemas contra el viento de segundo orden. La convergencia se logra cuando todos los residuos escalados son inferiores a  $1 \cdot 10^{-5}$  (Figura 4.9).

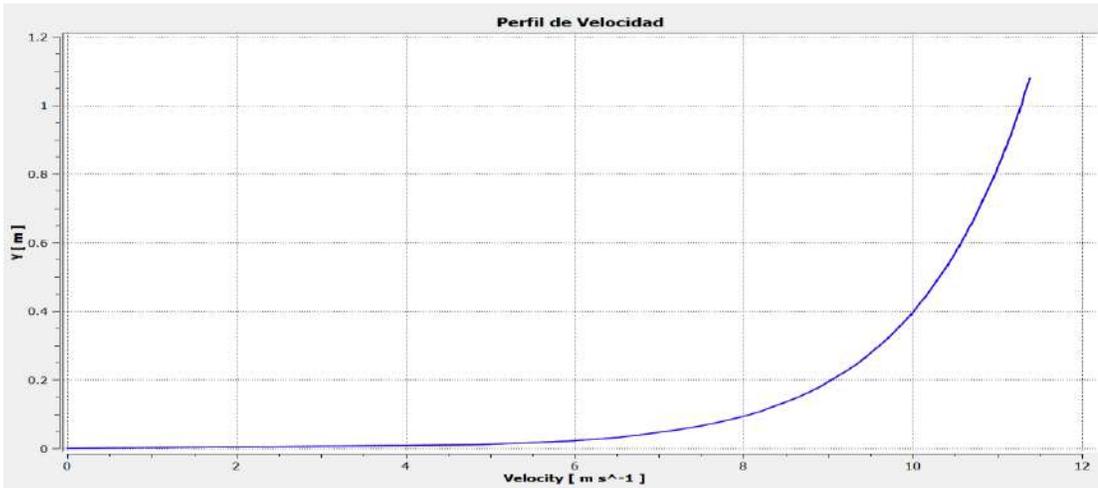


Figura 4.8 Perfil de velocidad para las simulaciones

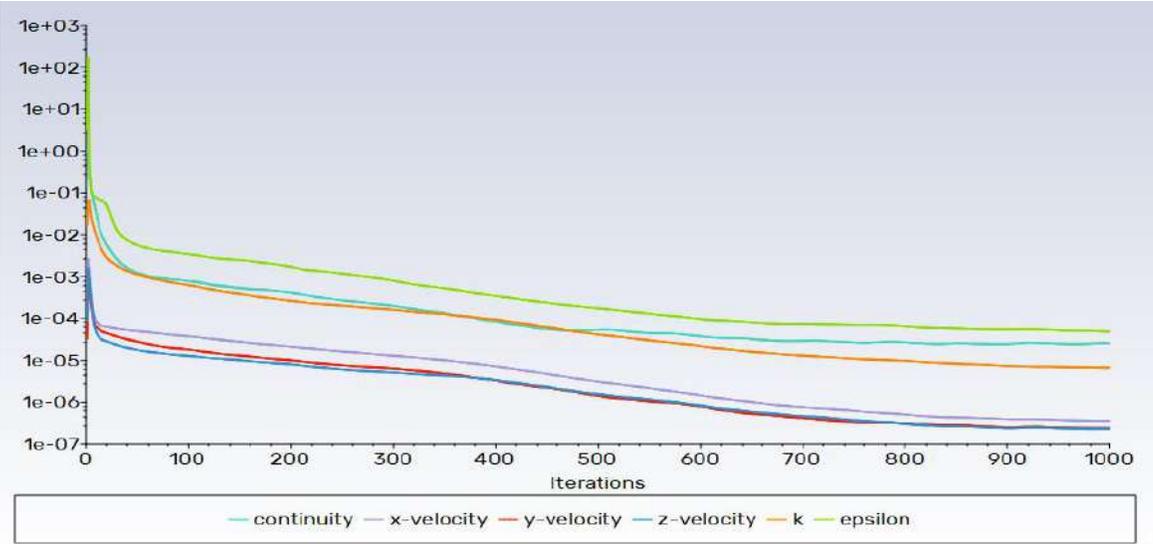


Figura 4.9 Gráfica de convergencia

## V Resultados y discusión

El post procesamiento CFD arrojó los resultados de  $C_p$  y velocidad del viento que se muestran en la (Tabla 5.1). Para verificar los resultados, se consideraron todos los factores recomendados por las guías de buenas prácticas (Tominaga, y otros, 2008). Para la validación se utilizó la literatura existente ya que debido a la falta de información es necesario comparar con la experimentación o, en este caso, con estudios similares. Hubo algunas diferencias debido a la configuración actual, sin embargo, en las (Figuras 5.1, 5.2 y 5.3) se muestran resultados similares a los obtenidos por (Abdelfatah, Elawady, Irwin, & Chowdhury, 2022), (Amini & Memari, 2021), (Xing , Mohotti, & Chauhan, 2018) y (Holmes, 1994). Se seleccionaron la velocidad (contornos, líneas de corriente y vectores) y los contornos TKE en las configuraciones número 17, 18 y 25 para comparar con la literatura. Los resultados obtenidos muestran que los valores negativos de  $C_p$  y velocidad son más importantes, lo que significa que los efectos de succión tienen un mayor impacto en el edificio que los efectos de sobrepresión. Al elevar la estructura, el comportamiento del viento a su alrededor provoca vorticidad, lo que a su vez genera presiones negativas, especialmente en los techos, piso inferior y paredes aguas abajo (Figuras 5.1 a, 5.2 a, 5.3 a).

Tabla 5.1 Resultados de los valores de  $C_p$  y Velocidad de configuraciones del CCD

# Simulación	$C_p$ Valores		Valores de velocidad (m/s)	
	Min	Max	Min	Max
1	-3.96734	1.65079	-4.25	12.57
2	-3.96615	1.3945	-4.28	12.35
3	-3.51461	1.41952	-5.09	12.42
4	-5.27917	1.6053	-6.29	13.63
5	-2.62301	1.59208	-5.96	13.04
6	-3.52491	1.67406	-5.36	13.65
7	-2.72515	1.74649	-5.59	13.49
8	-3.20831	1.42484	-4.47	13.05
9	-3.49846	1.4362	-5.39	12.08
10	-5.783	1.67973	-5.19	14.25
11	-3.78578	1.64995	-3.80	12.51
12	-4.32101	1.38949	-6.11	12.48
13	-2.89798	1.9072	-4.76	13.73

14	-3.548	1.54672	-5.44	13.24
15	-2.67538	1.59032	-6.37	13.17
16	-3.66177	1.70496	-4.75	13.70
17	-2.73507	1.54373	-2.69	11.54
18	-2.0292	1.50667	-3.27	11.66
19	-6.50004	1.55127	-4.53	14.72
20	-4.92323	1.70331	-5.15	15.52
21	-3.50098	1.58285	-4.88	13.20
22	-3.6075	1.58285	-5.61	13.15
23	-4.36163	1.59513	-4.18	13.02
24	-4.1635	1.57618	-4.22	12.57
25	-2.60452	1.17963	-4.38	11.87
26	-3.75827	1.70324	-4.39	13.51
27-36	-3.49029	1.58318	-5.31	13.37

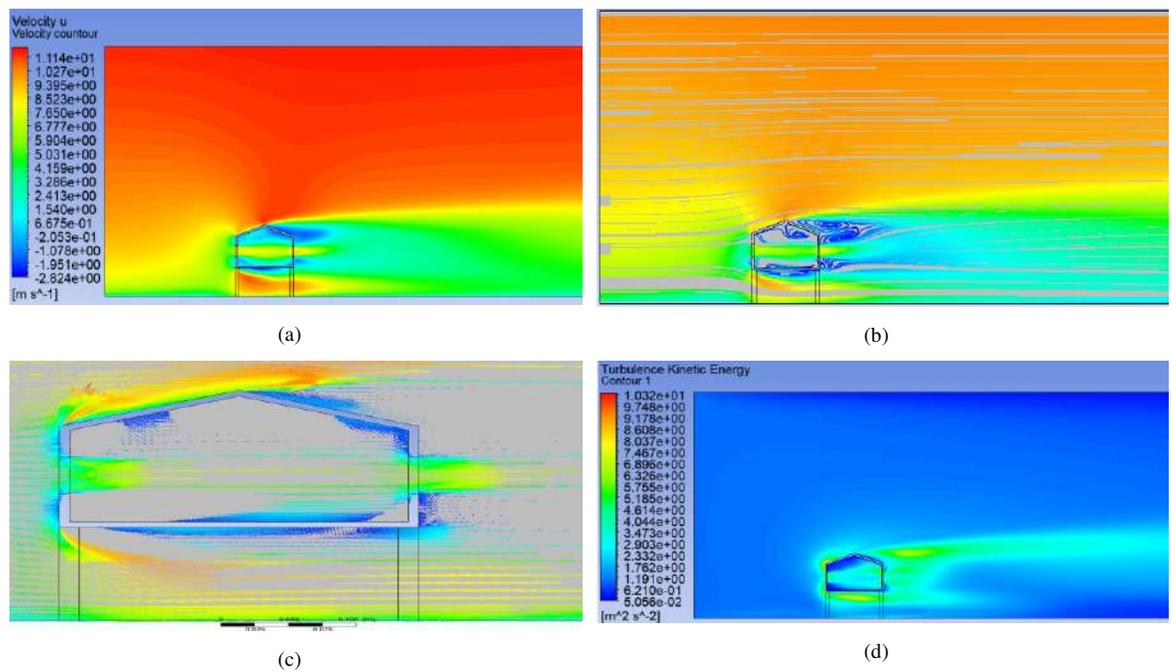


Figura 5.1 Simulación 17: a) Contorno de velocidad; b) líneas de corriente; c) contorno de vectores; d) contorno TKE

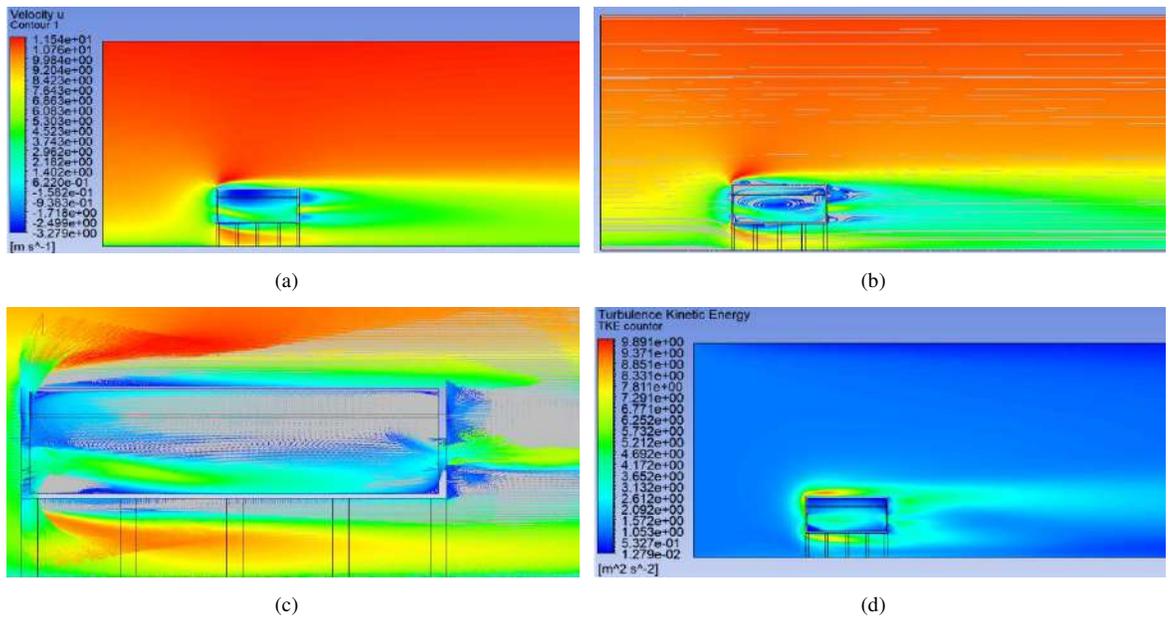


Figura 5.2 Simulación 18: a) Contorno de velocidad; b) líneas de corriente; c) contorno de vectores; d) contorno TKE

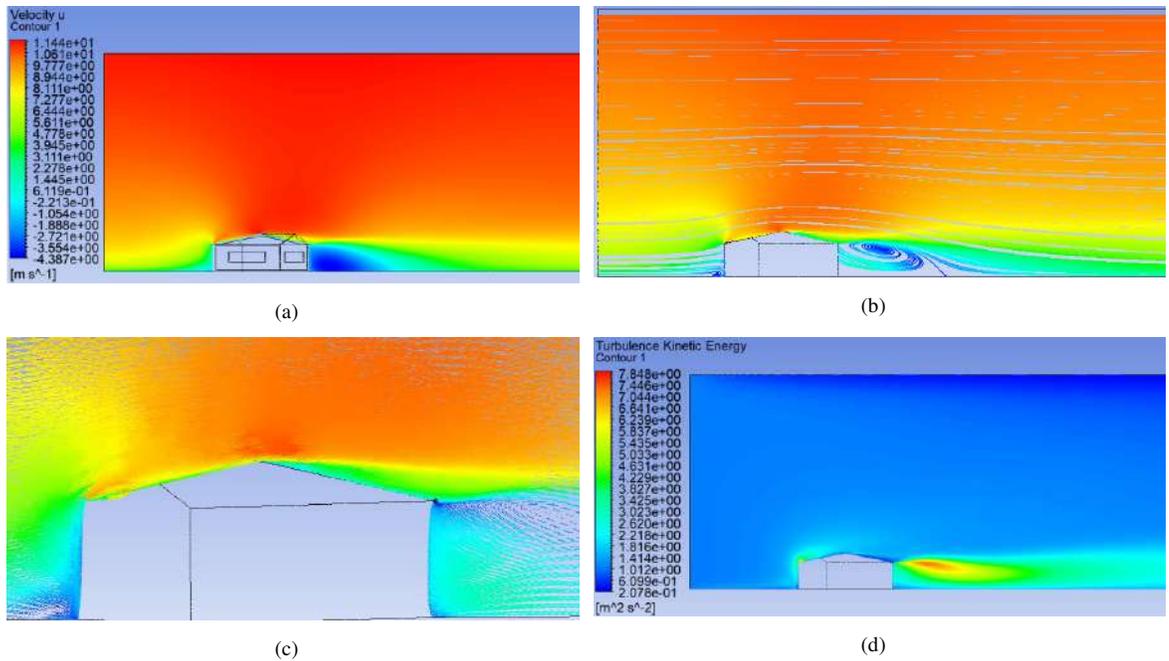


Figura 5.3 Simulación 25 a) Contorno de velocidad; b) líneas de corriente; c) contorno de vectores; d) contorno TKE

De los resultados más destacados se tiene que la configuración 13 cuenta con el valor de  $C_p$  más positivamente con un valor máximo de 1.90 y se encuentra en la zona de barlovento como se muestra la (Figura 5.4) mientras que el valor de -6.50 máximo negativo de  $C_p$  corresponde a la corrida 19 la cual representa la zona más desfavorable en términos de succiones las cuales parecen ser causadas por la poca pendiente con la que cuenta el techo y se encuentra en la zona inmediata en donde el flujo es cortado por la estructura (Figura 5.5)

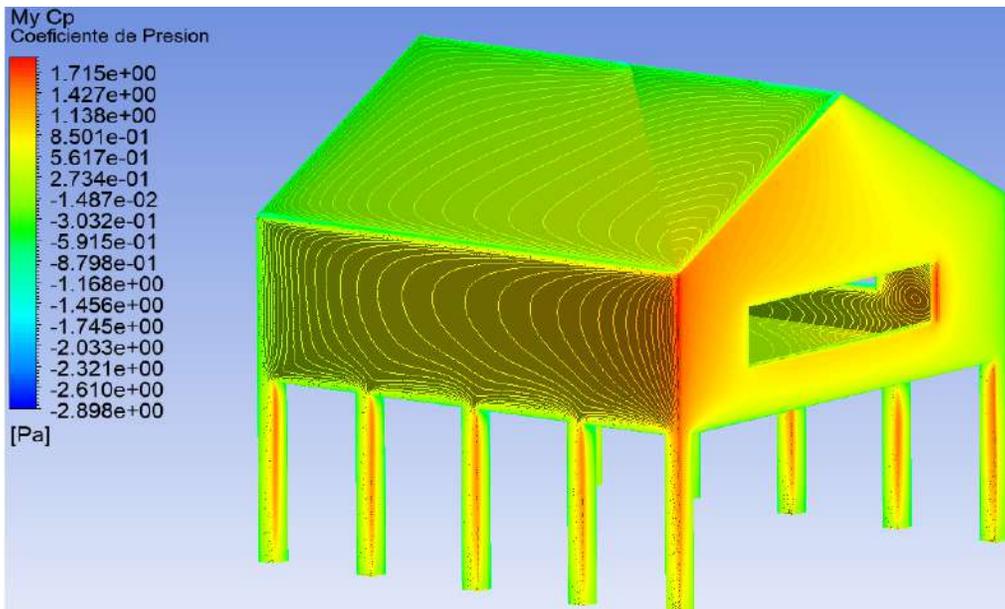


Figura 5.4 Simulación 13 con el  $C_p$  positivo más grande con un valor de 1.90

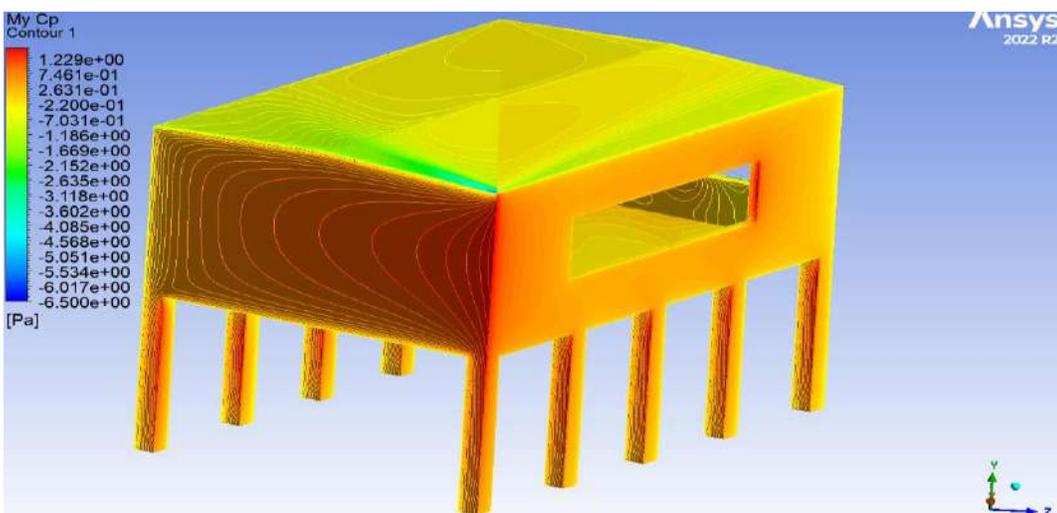


Figura 5.5 Simulación 19 con el  $C_p$  negativo más grande con un valor de -6.5

Finalmente cabe resaltar que los valores de  $C_p$  más desfavorables se presentan en zonas de succión y éstas varían significativamente entre cada configuración presentada, por otro lado los  $C_p$  máximos positivos presentan una tendencia menos significativa pues en términos generales los valores oscilan en la unidad, por tanto la configuración con la succión menos importante o que mejor comportamiento presenta en términos de disipación de presión es la configuración 18, con un valor de  $C_p$  de -2.02 como se muestra en la (Figura 5.6)

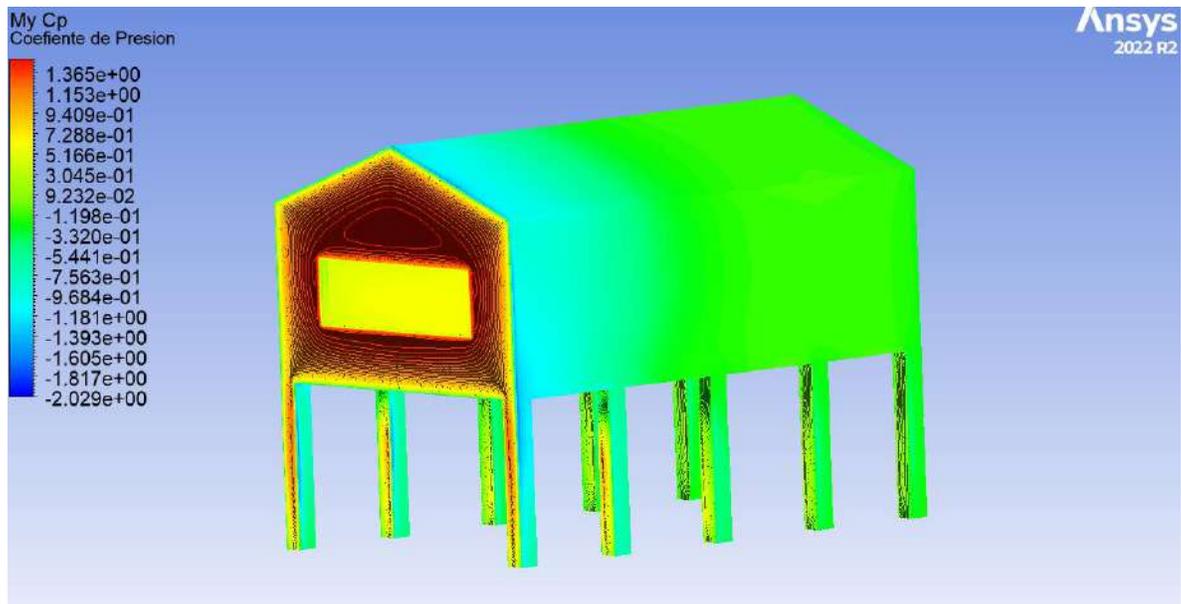


Figura 5.6 Simulación 18 con el  $C_p$  negativo menos desfavorable con un valor de -2.02

Por otro lado, el haber utilizado un CCD tuvo como un segundo propósito poder determinar mediante RSM que tan bueno es el modelo para tener un polinomio representativo para la obtención de los  $C_p$  ante las posibles configuraciones dentro de los límites antes propuestos. Para este paso fue necesario la selección de 5 puntos aleatorios como los mostrados en la (Figura 5.7) y así poder obtener el valor de los  $C_p$  de cada una de las 36 configuraciones en los puntos seleccionados (Tabla 5.2).

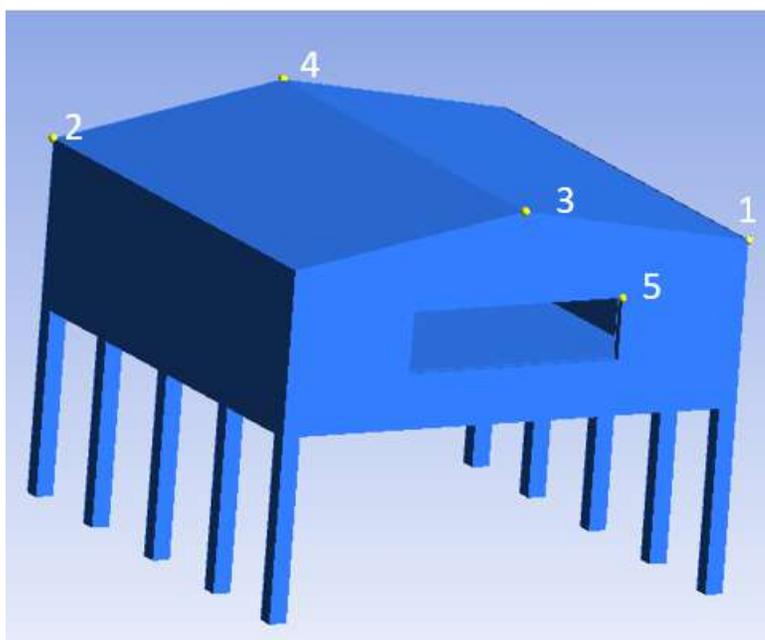


Figura 5.7 Puntos 1 – 5 seleccionados para determinar los  $C_p$

Tabla 5.2 Valores obtenidos de los  $C_p$  del punto 1-5

# Simulación	$C_p$ Valores				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
1	-0.76189	-0.717805	-2.61114	-0.563251	1.18441
2	-0.620347	-0.833619	-0.939103	-0.494821	0.69386
3	-0.678339	-0.578622	-2.20396	-0.488762	1.09531
4	-0.696297	-0.912204	-1.02605	-0.629128	0.892828
5	-0.8366	-0.767698	-0.334409	-0.506753	0.957085
6	-0.698071	-0.915885	-0.940243	-0.542218	0.847022
7	-0.808608	-0.789253	-0.85523	-0.68755	1.14503
8	-0.715127	-0.817307	-0.909925	-0.570589	0.799178
9	-0.665211	-0.596882	-2.31922	-0.5083	1.00788
10	-0.670502	-0.960867	-1.09561	-0.59629	0.776253
11	-0.691463	-0.734869	-2.43157	-0.562869	1.28874
12	-0.555939	-0.853526	-0.930354	-0.558674	0.727725
13	-0.910829	-0.824813	-0.981171	-0.711426	1.0957
14	-0.637108	-0.844253	-0.949636	-0.498967	0.745767
15	-0.770253	-0.84743	-0.851689	-0.654816	1.01356
16	-0.797069	-0.89507	-1.02029	-0.608779	0.877702
17	-0.474854	-1.15736	-0.977952	-0.974537	0.245807
18	-0.319616	-1.09072	-0.996006	-0.297787	0.726833

19	-0.693495	-0.884101	-1.26215	-0.637223	0.991934
20	-0.688916	-0.851291	-0.813563	-0.603371	0.970592
21	-0.665837	-0.904867	-0.980052	-0.62096	0
22	-0.904683	-0.85928	-0.927729	-0.690582	1.09012
23	-0.791918	-0.63099	-0.99628	-0.588354	0.835908
24	-0.661909	-0.903134	-1.15076	-0.551504	0.577587
25	-0.400405	-0.580877	-0.689689	-0.573734	0.64824
26	-0.641638	-0.903171	-1.03406	-0.666028	1.045
27-36	-0.76189	-0.717805	-2.61114	-0.563251	1.18441

Posteriormente se realizó una regresión lineal en donde se analizó el coeficiente de regresión múltiple  $R^2$  para determinar qué tan bueno es el modelo en términos predictivos para ello se utilizó MRS en cada uno de los puntos antes seleccionados, las (Figuras 5.8 - 5.12) representan gráficamente el comportamiento analizado.

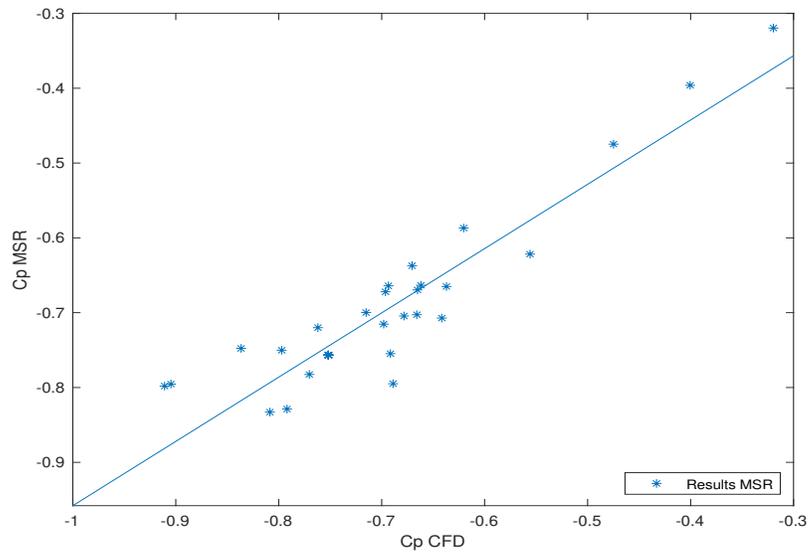


Figura 5.8 Regresión de punto 1 con  $R^2 = 0.8591$

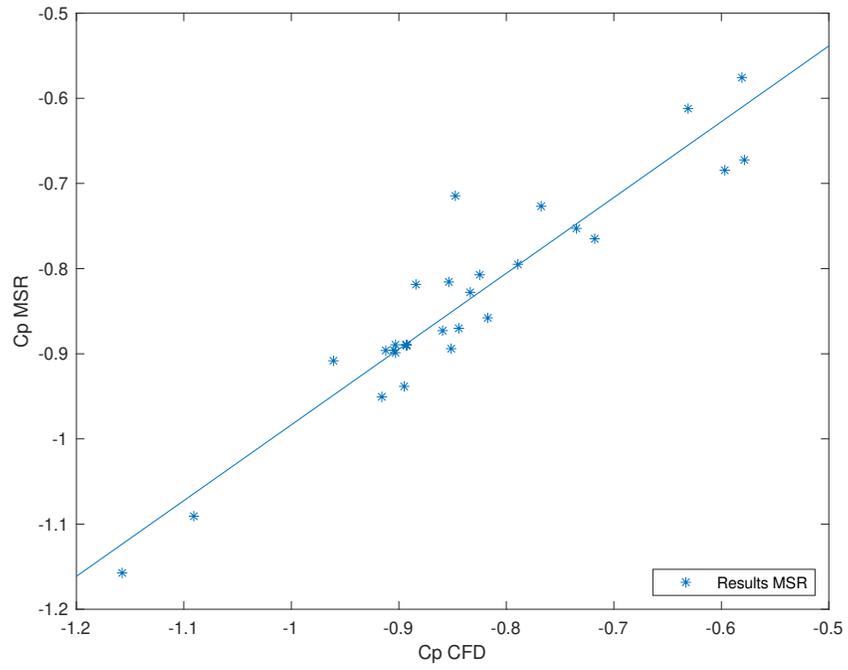


Figura 5.9 Regresión de punto 2 con  $R^2 = 0.8898$

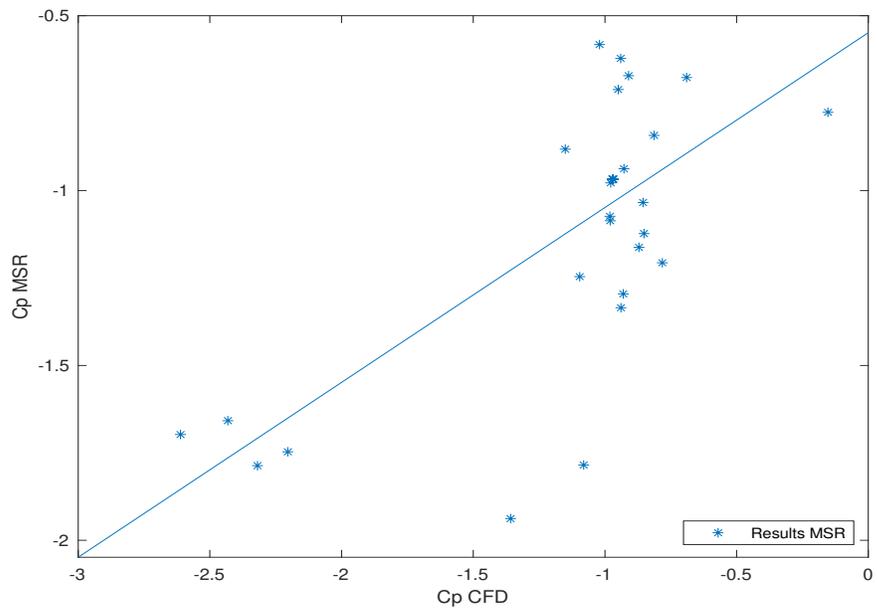


Figura 5.10 Regresión de punto 8 con  $R^2 = 0.4999$

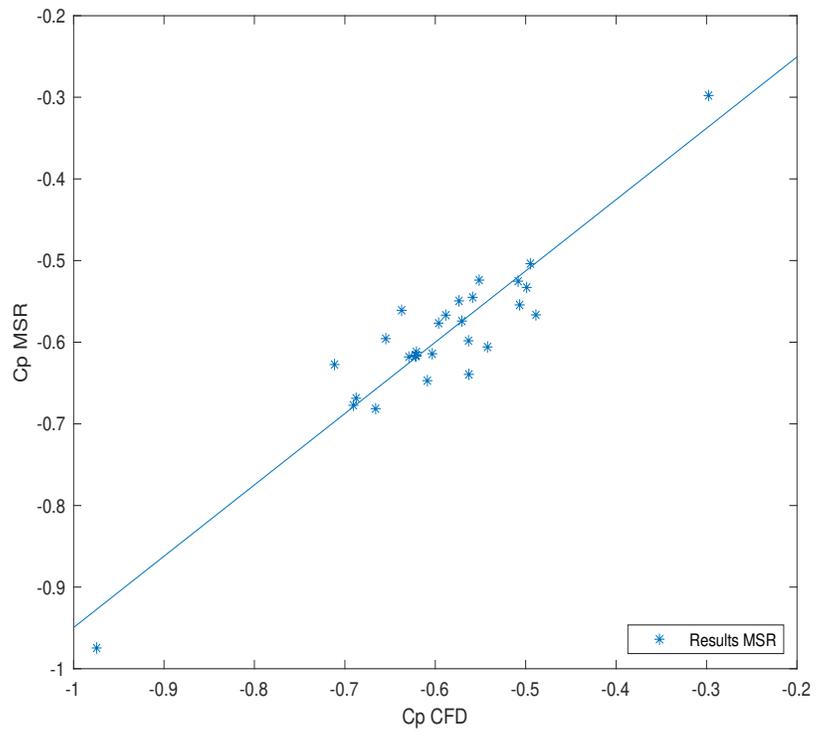


Figura 5.11 Regresión de punto 4 con  $R^2 = 0.8737$

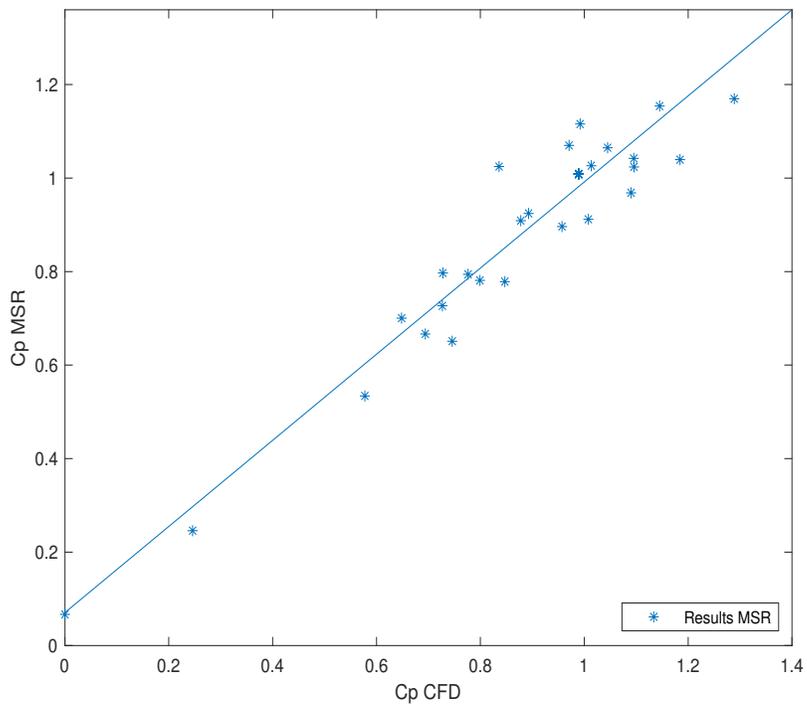


Figura 5.12 Regresión de punto 5 con  $R^2 = 0.9208$

Además de los 5 puntos antes analizados también se seleccionaron los  $C_p$  máximos y mínimos de cada configuración con los valores presentados en la (Tabla 5.1) y así poder obtener los coeficientes de regresión correspondientes mostrados en la (Figura 5.13 y 5.14) respectivamente.

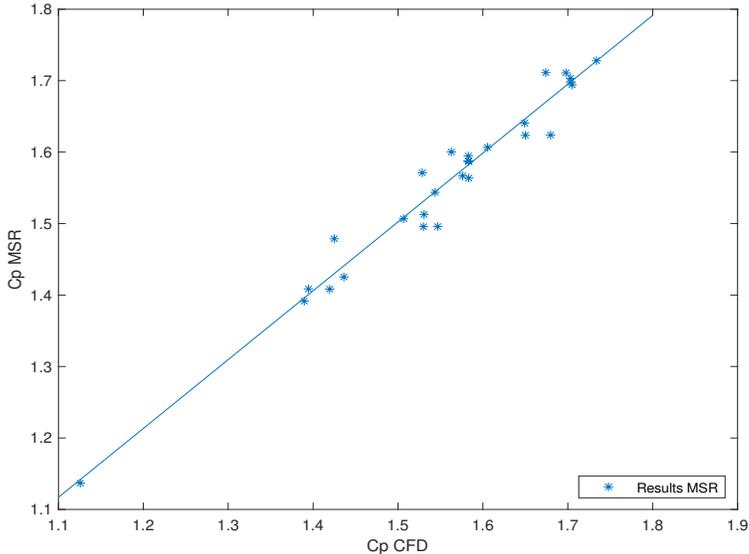


Figura 5.13 Regresión de punto máximo con  $R^2 = 0.9632$

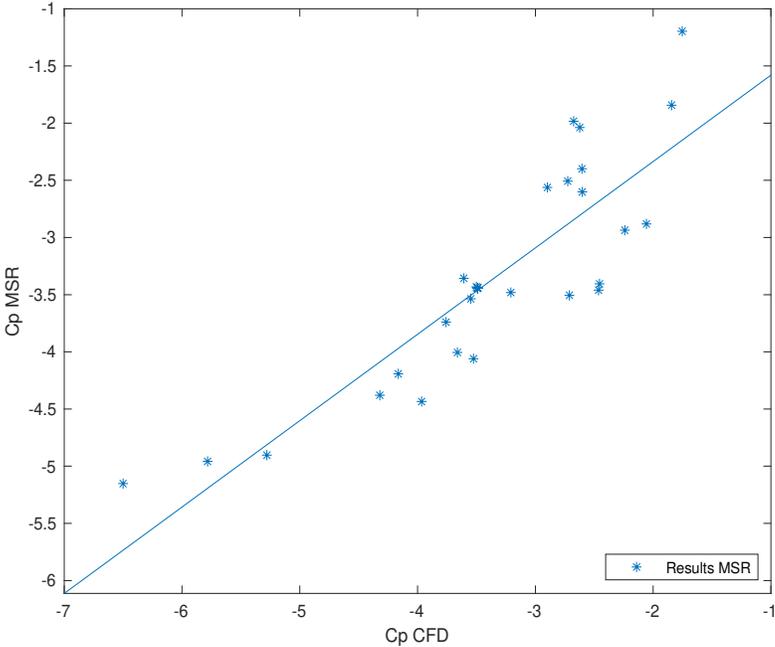


Figura 5.14 Regresión de punto mínimo con  $R^2 = 0.7554$

Considerando los criterios establecidos para contemplar en términos predictivos que tan buenos son los puntos es necesario obtener valores mayores a 85% por lo tanto de los 7 puntos antes analizados poco más del 71% fueron buenos, por lo que al haber cierta incertidumbre de cómo se comportarían más puntos arbitrrios fue necesario tomar 10 nuevos puntos acomodados a lo largo de la estructura como se muestra en la (Figura 5.15) y los resultados de los  $C_p$  se muestran en la (Tabla 5.3)

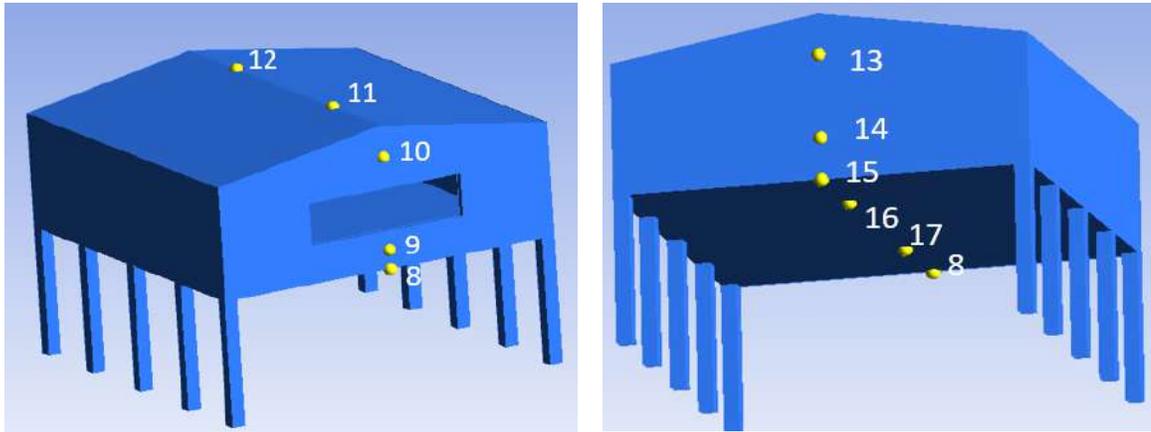


Figura 5.15 Puntos 8-17 seleccionados para determinar  $C_p$

Tabla 5.3 Valores obtenidos de  $C_p$  del punto 8 - 17

# Simulación	$C_p$ Valores									
	Punto 8	Punto 9	Punto 10	Punto 11	Punto 12	Punto 13	Punto 14	Punto 15	Punto 16	Punto 17
1	-0.3433	0.7372	0.7379	-1.5175	-1.2057	-0.5085	-0.5640	-0.5925	-0.2382	0.0357
2	-0.6665	0.9136	0.9785	-0.8932	-0.4942	-0.4516	-0.5189	-0.5821	-0.1558	-0.2338
3	-0.2405	0.5767	0.6387	-1.3112	-1.1054	-0.4406	-0.5195	-0.5389	-0.2552	0.0222
4	-0.4543	1.0908	1.1245	-0.9798	-0.5348	-0.5552	-0.5120	-0.5821	-0.1389	-0.3815
5	-0.4583	0.6545	0.7947	-0.7222	-0.6730	-0.5632	-0.5984	-0.6457	-0.3181	-0.0233
6	-0.8520	1.1543	1.1936	-0.9849	-2.0379	-0.3998	-0.6253	-0.6919	-0.1999	-0.4459
7	-0.4468	0.7756	0.8928	-0.7886	-0.7417	-0.6087	-0.6558	-0.7081	-0.2482	0.0159
8	-0.7207	0.9626	1.0338	-0.9119	-1.8663	-0.4544	-0.5585	-0.6047	-0.1580	-0.2669
9	-0.2889	0.6015	0.6419	-1.4050	-1.1254	-0.4474	-0.4897	-0.5255	-0.2732	0.0212
10	-0.7592	1.1474	1.1709	-1.0371	-0.5444	-0.5414	-0.5560	-0.6149	-0.1554	-0.3916
11	-0.2860	0.7345	0.7354	-1.4535	-1.2057	-0.5090	-0.5676	-0.5926	-0.2366	0.0375
12	-0.6657	0.9161	0.9770	-0.8950	-0.4969	-0.5044	-0.4723	-0.5154	-0.1425	-0.2314
13	-0.5245	0.7603	0.8875	-0.7862	-0.7458	-0.6202	-0.6668	-0.7272	-0.3002	-0.0077
14	-0.7629	1.0543	1.1134	-0.9559	-1.8969	-0.4082	-0.5610	-0.6138	-0.1965	-0.2776
15	-0.4240	0.6568	0.8013	-0.7541	-0.6800	-0.5623	-0.5979	-0.6470	-0.3171	-0.0254

16	-0.8576	1.1812	1.2121	-0.9861	-2.0286	-0.5019	-0.5620	-0.6309	-0.1657	-0.4479
17	-0.3651	-0.5139	-0.4643	-1.8210	-1.7344	-0.4670	-0.5177	-0.3682	-0.6042	-0.6032
18	-0.8533	1.2759	1.4643	-0.6541	-0.1220	-0.1744	-0.2467	-0.2873	-0.1853	-0.6009
19	-0.6546	0.9083	0.9318	-0.5939	-0.3224	-0.5439	-0.5521	-0.5516	-0.1990	-0.2466
20	-0.7294	0.9908	1.0501	-0.7710	-0.7980	-0.4796	-0.7099	-0.7923	-0.2770	-0.3625
21	-0.6787	0.9415	0.9875	-2.2859	-2.1247	-0.4249	-0.5627	-0.5914	-0.2705	-0.2812
22	-0.6764	0.9419	0.9867	-2.2909	-1.9867	-0.5304	-0.5356	-0.6033	-0.1949	-0.2831
23	-0.9593	1.0701	1.2126	-1.6269	-1.4317	-0.3992	-0.4938	-0.4122	-0.2251	-0.2855
24	-0.8788	1.1607	1.2019	-1.0807	-1.0277	-0.4001	-0.5671	-0.6284	-0.1399	-0.3251
25	0.5826	0.5321	0.7291	-1.4022	-1.7810	-0.4325	-0.2792	-0.2874	0.0000	0.0000
26	-0.0377	1.0102	1.0270	-2.5477	-2.0733	-0.4760	-0.7133	-0.7660	-0.2225	-0.3776
27-36	-0.6772	0.9418	0.9866	-2.2908	-2.0943	-0.4767	-0.6141	-0.6833	-0.2265	-0.2828

Posteriormente en el análisis de las regresiones lineales para los 10 puntos antes mencionados en términos de predicción los resultados fueron los siguientes: (Figuras 5.16 – 5.25)

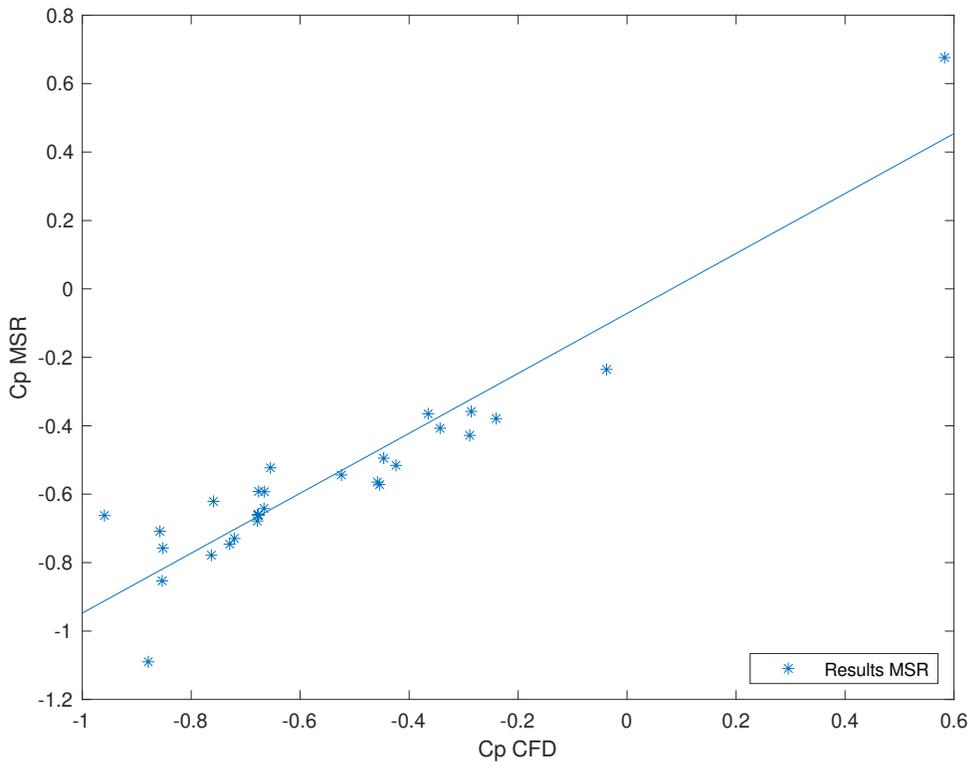


Figura 5.16 Regresión de punto 8 con  $R^2 = 0.8759$

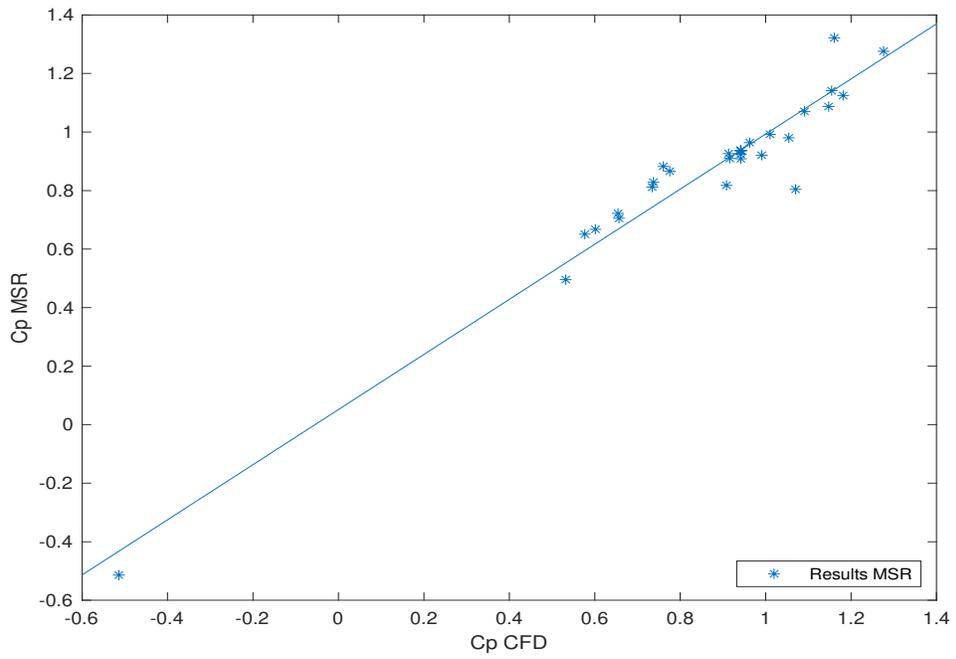


Figura 5.17 Regresión de punto 9 con  $R^2 = 0.9413$

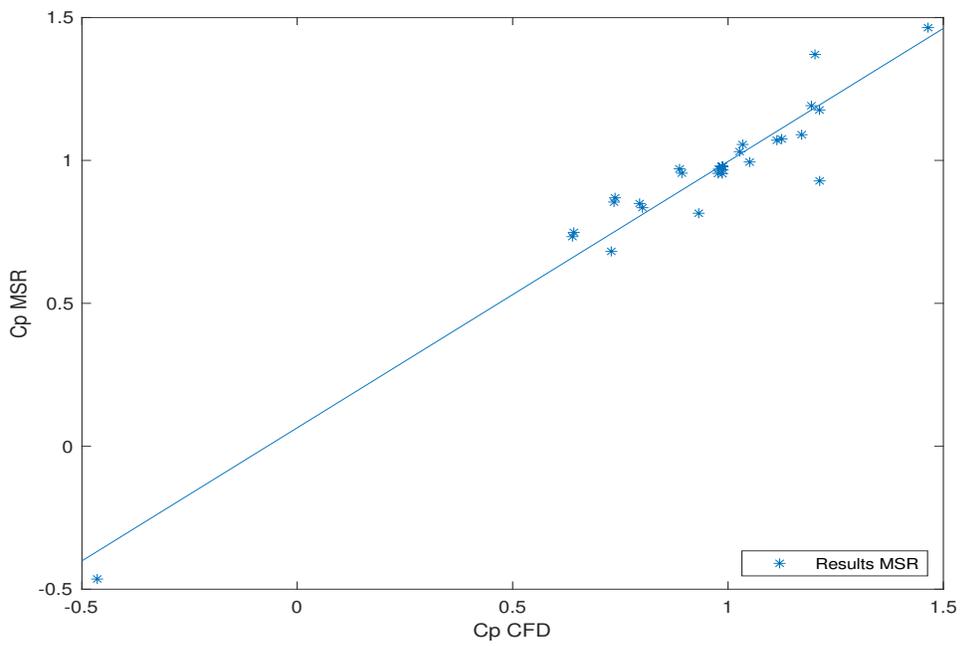


Figura 5.18 Regresión de punto 10 con  $R^2 = 0.9313$

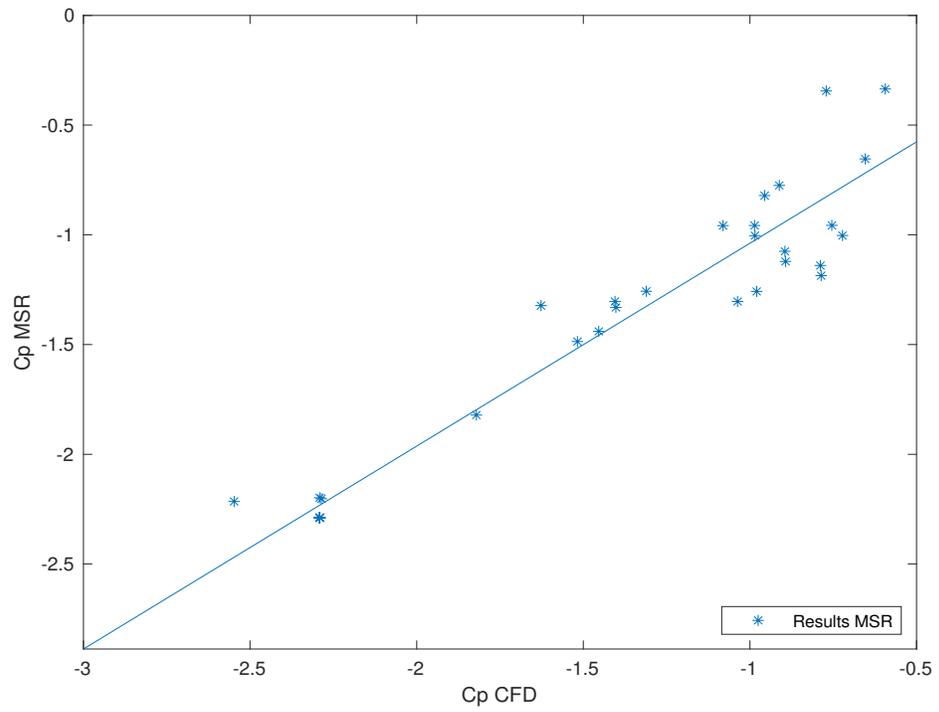


Figura 5.19 Regresión de punto 11 con  $R^2 = 0.9244$

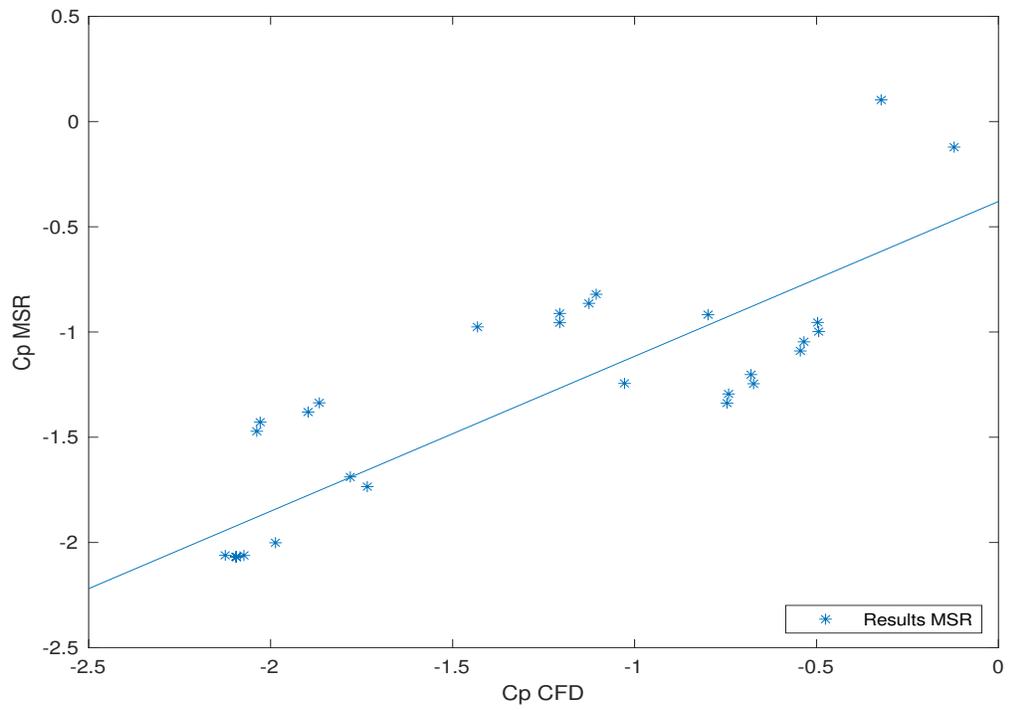


Figura 5.20 Regresión de punto 12 con  $R^2 = 0.7357$

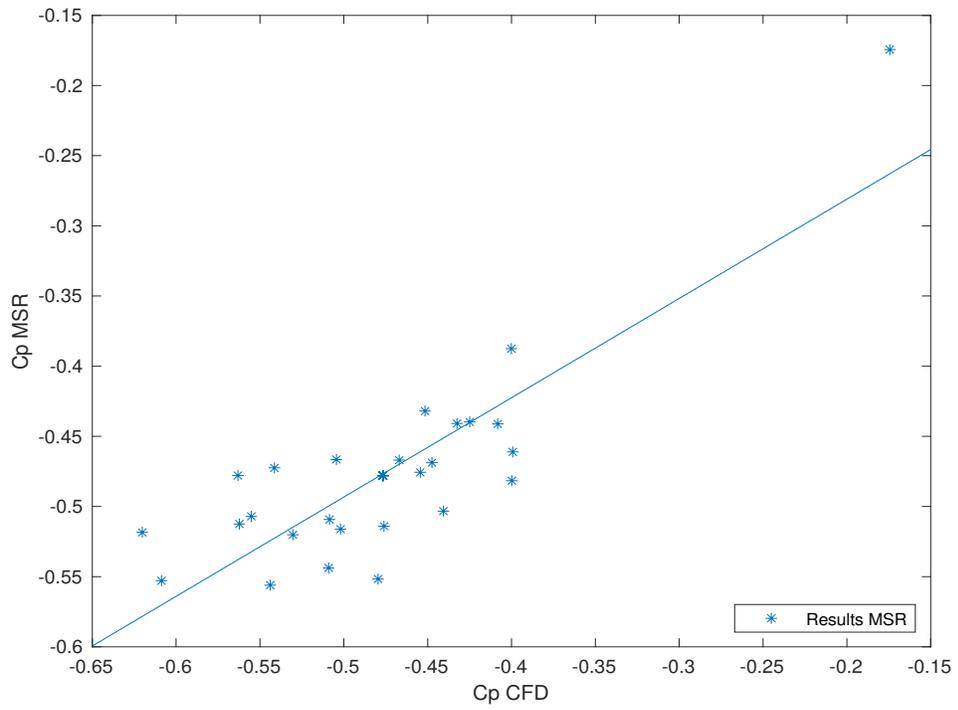


Figura 5.21 Regresión de punto 13 con  $R^2 = 0.7074$

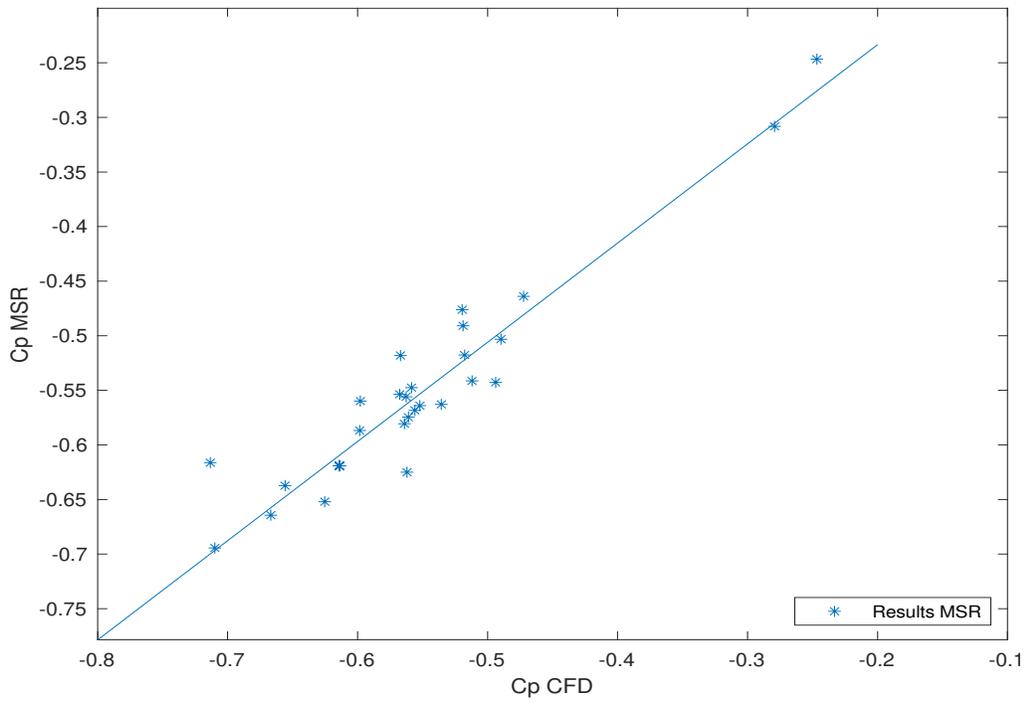


Figura 5.22 Regresión de punto 14 con  $R^2 = 0.9086$

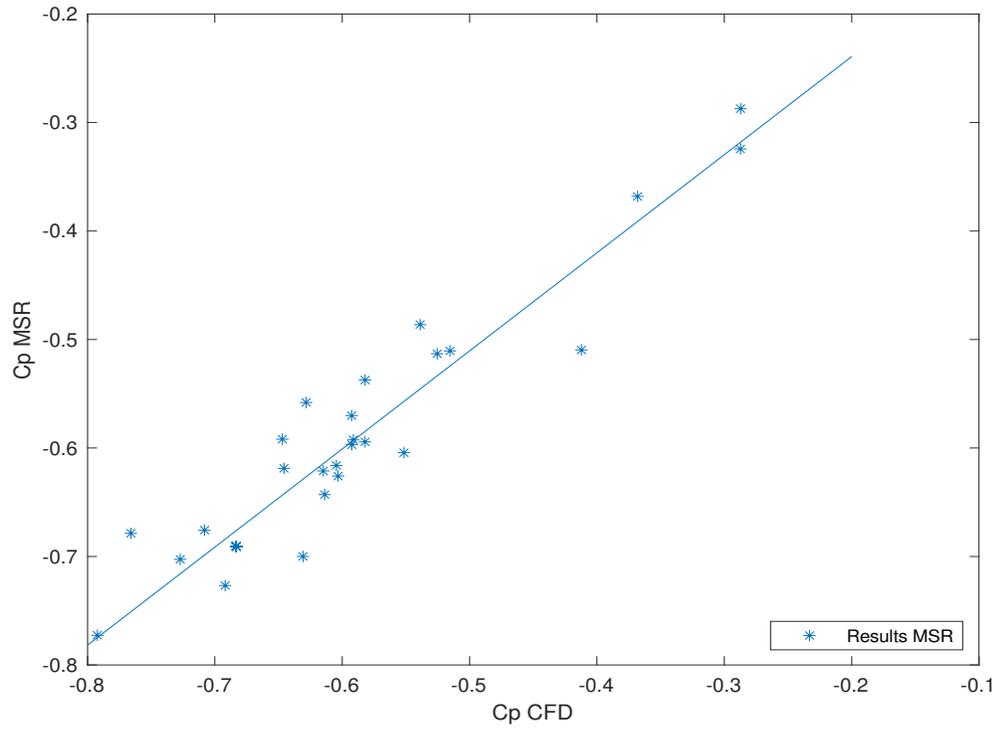


Figura 5.23 Regresión de punto 15 con  $R^2 = 0.9043$

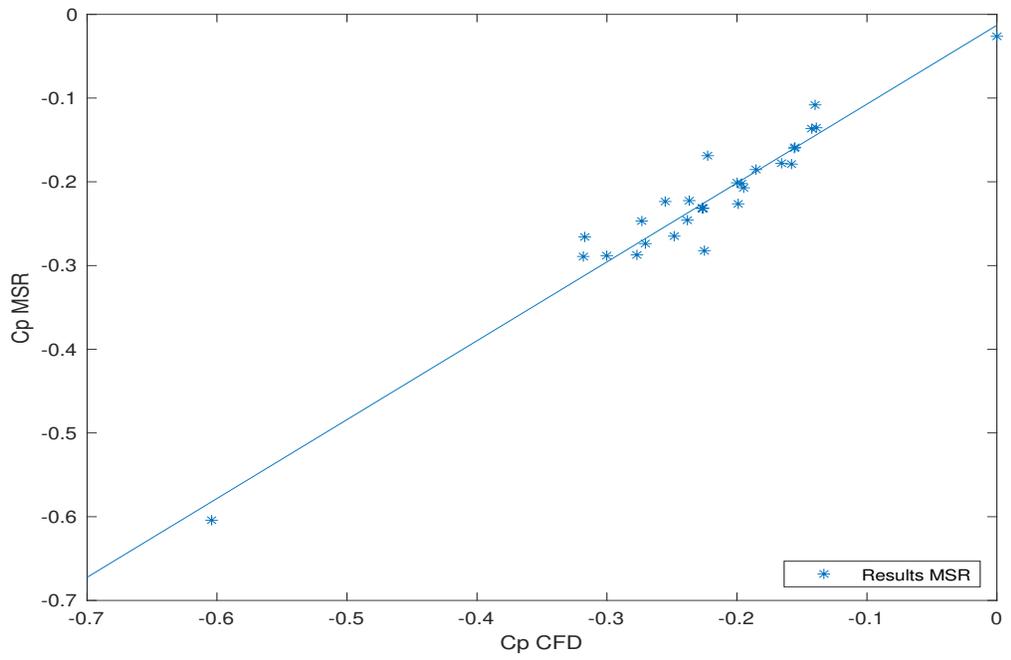


Figura 5.24 Regresión de punto 16 con  $R^2 = 0.9419$

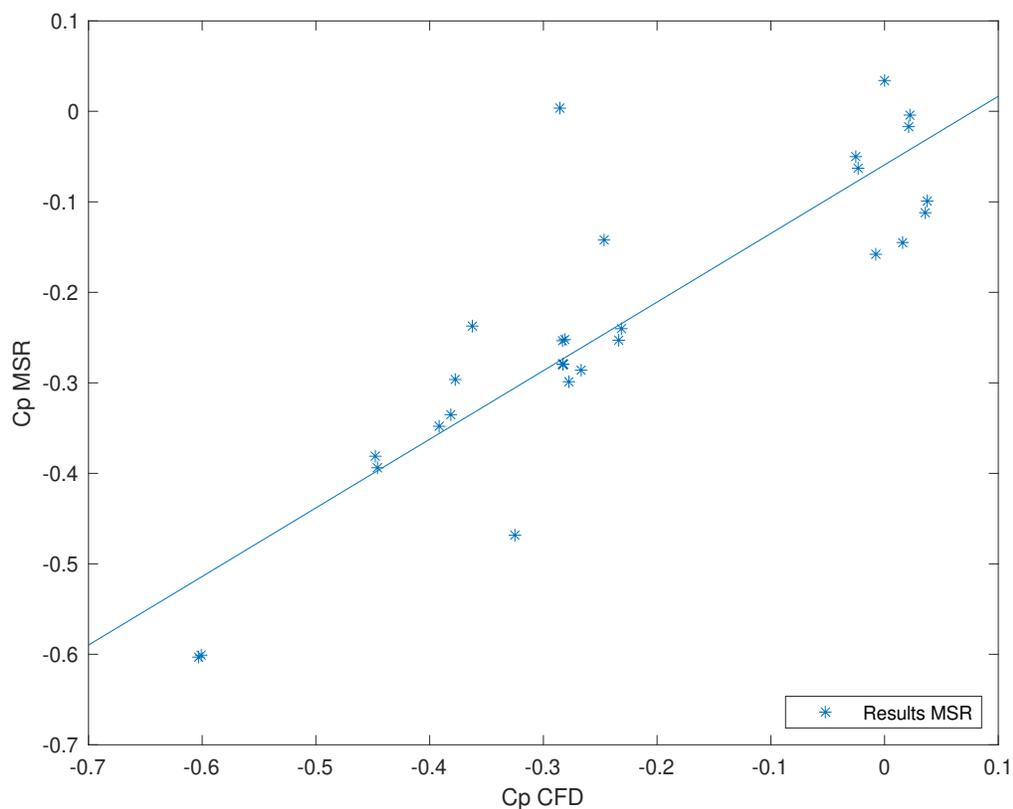


Figura 5.25 Regresión de punto 17 con  $R^2 = 0.7581$

Nuevamente de los puntos seleccionados el 70% de los puntos son buenos en términos predictivos, al tener miles de puntos es imposible al menos en este trabajo analizar todos para determinar si es posible contar con una superficie de respuesta para predecir sin necesidad de realizar simulaciones los  $C_p$  de estructuras con características que se engloben en los factores explorados.

Por otro lado, si se observa detalladamente hay regiones de la estructura que cuentan con buenos resultados, al menos eso parece desde el punto de vista de los puntos explorados tienen un buen comportamiento predictivo. Por ejemplo: la zona expuesta a barlovento presenta resultados en términos estadísticos arriba del 90% usando superficies de respuesta lo que habla de un buen modelo para la zona, sin embargo, debido a la complejidad de las configuraciones y el comportamiento del flujo para el resto de las zonas es menos preciso el modelo.

## VI Conclusiones

La Dinámica de Fluidos Computacionales es una herramienta que ha tenido un crecimiento importante en los últimos años, en gran parte debido a los avances tecnológicos que facilitan a un mayor número de usuarios poder adquirir cómputos con características apropiadas para simulaciones de calidad. Los resultados obtenidos en esta investigación son satisfactorios, es decir se cuenta con resultados parecidos a los tomados como referencia de investigaciones similares y parámetros dentro de los proporcionados por las guías de la buena práctica sin embargo la cantidad de factores tan diversos como: Software empleado, la solución numérica, la discretización del dominio, los parámetros empleados, etc. Pudieran generar ligeras diferencias.

Por otro lado, la cantidad de simulaciones realizadas se llevaron a cabo en un periodo considerablemente corto comparado con el tiempo que hubiese tomado si se realizaban en túnel de viento. A demás los costos en términos económicos se reducen significativamente ya que gracias al apoyo por parte de la UAQ en proporcionar el SOFTWARE y contar con un cómputo adecuado no ocasionaron grandes costos contrario a la experimentación. Es importante resaltar que la experimentación sigue siendo una herramienta muy utilizada ya que sirve como marco de referencia para comparar con las simulaciones, ya que estas aún carecen de información suficiente para poder ser 100% confiables. Por cuestiones de tiempo, recurso y falta de equipo fue imposible para este trabajo llevar a cabo la parte experimental.

De los resultados más relevantes en los  $C_p$  obtenidos a causa de las presiones ejercidas por el viento son los siguientes:

- 1) De las 36 simulaciones llevadas a cabo el rango del coeficiente de presión máximo positivo generado en zonas de Barlovento tiene poca variación oscilando en un rango entre 1 y 2, de lo que se puede deducir que de todas las variables exploradas en sus distintas configuraciones no son tan significativos.
- 2) Los coeficientes de presión máximos negativos ocasionan succiones, contrario a las presiones positivas el flujo en estas zonas tiende a tener comportamientos muy

agresivos y distintos en cada simulación, con  $C_p$  muy altos sobre todo en zonas de techo y debajo de la estructura.

- 3) La configuración que cuenta con un mejor comportamiento en la disipación de las presiones ejercidas por el viento es la configuración 18, de esta parte se resalta que la normativa mexicana en términos de ángulos de incidencia solo maneja 2 a  $0^\circ$  y  $90^\circ$  por lo que los ángulos comprendidos entre estos no se toman en cuenta, sin embargo en este trabajo las presiones más altas se encuentran en ángulos distintos a los de la normativa.

Estadísticamente el haber empleado un diseño central compuesto nos brindó dos puntos interesantes:

- 1) Fue posible la exploración entre 5 factores en 5 niveles, con un total de 36 simulaciones, brindando combinaciones de interés para el análisis en el comportamiento del flujo.
- 2) Derivado de una superficie de respuesta se exploraron puntos arbitrarios con los valores de  $C_p$  para determinar un modelo predictivo, para este caso no fue posible ya que solo el 70% de puntos analizados presentaron buen ajuste.

## **6 .1 Expectativas y recomendaciones**

Con investigaciones de este tipo busca motivar e impulsar al sector científico ingenieril en continuar explorando los efectos de grandes ráfagas de viento provocadas por fenómenos naturales, hoy día es una problemática nacional e internacional que amenaza la seguridad social.

Probar otros factores que se sabe pueden afectar los resultados de la simulación, por ejemplo: probar otros Softwares, métodos numéricos, técnicas de mallado, criterios de convergencia, entre otros, con la finalidad de tratar de mejorar el modelo.

El diseño central compuesto puede presentar un mejor comportamiento si la variable de ángulo de incidencia se explorara en dos niveles más por ejemplo 30° y 60° ya que por cuestiones de mallado en este trabajo no fue posible ampliar este factor.

## Referencias

- Abdelfatah, N., Elawady, A., Irwin, P., & Chowdhury, A. (2022). Experimental investigation of wind impact on low-rise elevated residences. *Engineering Structures*, 257, 096-114.
- Alonzo García, A., Gutiérrez Torres, C., Jiménez Bernal, J., López Aguado, J. L., & Barbosa Saldaña, J. G. (2011). Large Eddy Simulation of flow over a cylinder; Simulación de Grandes Remolinos del flujo sobre un cilindro ( $RE=1.4E+5$ ). *XVII Congreso Internacional anual de la SOMIM*, 1310-1316.
- Aly, A. M., & Bresowar, J. (2016). Aerodynamic mitigation of wind-induced uplift forces on low-rise buildings: A comparative study. *Journal of Building Engineering*.
- Aly, A. M., Chokwitthaya, C., & Poche, R. (2017). Retrofitting building roofs with aerodynamic features and solar panels to reduce hurricane damage and enhance eco-friendly energy production. *Sustainable Cities and Society*, 581-593.
- Aly, A.-M. (2014). Aerodynamic mitigation of wind uplift loads on low-rise buildings. *Advances in civil, environmental, and materials research*.
- Amini, M., & Memari, A. M. (2021). CFD-Based evaluation of elevated coastal residential buildings under hurricane wind loads. *Journal of Architectural Engineering*.
- Appendini, C. M., & Salles, P. (2014). Vulnerabilidad y peligro: costas mexicana. *Sistema de Videomonitoreización Costera del Instituto de Ingeniería*, 4.
- Appendini, C. M., & Salles, P. (2014). Vulnerability and danger: Mexican coasts; Vulnerabilidad y peligro: costas mexicanas. *Sistema de Videomonitoreización Costera del Instituto de Ingeniería*, 4.
- Azuz, I., Cervantes, O., Espinoza Tenorio, A., & Santander Monsalvo, J. (2018). Numeralia de la Costa Mexicana. *Red Internacional de Costas y Mares*, 1-10.
- Balbastro, G. C., & Sonzogni, V. E. (2008). Collapse of shed structures on severe storms; Colapso de estructuras de galpones durante tormentas severas. *Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 8*, 1-20.
- Billah, Y. K., & Scaln, R. H. (1990). Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks. *American Journal of Physics*, 7.

- Blessing, C., Chowdhury, A., Lin, J., & Huang, P. (2009). Full-scale validation of vortex suppression techniques for mitigation of roof uplift. *Engineering Structures*, 2936-2946.
- Caracoglia, L., Sangree, R. H., Jones, N. P., & Schafer, B. W. (2008). Interpretation of full-scale strain data from wind pressures on low rise structure. *Journal Of Winf Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2363-2382.
- Castro, A. M. (2007). *Interacción Fluido Estructura: Elementos Finitos en Acústica, Formulación ALE y Esquemas Staggered*. Argentina : Universidad Nacional de Cuyo.
- CENAPRED. (2022). *Socioeconomic impact of the main disasters that occurred in Mexico executive summary 2021; Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México resumen ejecutivo 2021*. México.
- CEPAL. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Santiago: Naciones Unidas.
- Comarazamy, D. (2005). *Mitigación de desastres en instalaciones de salud*.
- de la Torre-Gea, G., Delfín Santisteban, O., Torres Pacheco, I., Soto Zarazúa, G., Guevara González, R., & Rico García, E. (2014). Redes bayesianas aplicadas a un modelo CFD del entorno de un cultivo en invernadero. *Agrociencia scielo*.
- Díaz-Briceño, N., Horta Rangel, J. M., Valdés Vázquez, J. G., Pérez Lara y Hernández, M. Á., & Arroyo Contreras, G. M. (2018). Aeroelastic Analysis of an Atypical Geometry Building by Solving Fluid-structure Interaction Problem through Load Transmission Method. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 1-13.
- Díaz-Briceño, N., Horta Rangel, J. M., Valdés Vázquez, J. G., Pérez Lara y Hernández, M. Á., & Arroyo Contreras, G. M. (2020). Aeroelastic Revision of an Atypical Geometry Building through One-way Fluid-structure. *Recent advances in science and technology research*, 33-49.
- English, E., Friedland, C. J., & Orooji, F. (2017). Combined flood and wind mitigation for hurricane damage prevention: case for amphibious construction. *Journal of Structural Engineering*.
- English, E., Friedland, C. J., & Orooji, F. (2017). Combined Flood and Wind Mitigation for Hurricane Damage Prevention: Case for Amphibious Construction. *Journal of Structural Engineering*.

- Espinoza Valdez, J. A., Horta Rangel, J. M., Pérez Lara Y. Hernandez, M. Á., Hernández Zaragoza, J. B., Pérez Rea, M. L., Rico García, E., . . . Rojas Gonzalez, E. (2023). Analysis of an Electrical Transmission Tower by CFD: A Comparison to the Mexico Standards. *Current journal of applied science and technology*, 1-12.
- Estrada Cingualbres , R., Rodríguez Peña, J., Lengarán Ávila, Y., & Campos Mobilla, S. (2017). Mitigación del colapso de las cubiertas ligeras de fibrocemento ante vientos huracanados. *Informes de la construcción*, 547.
- Ferziger, J. (2002). *Computational methods for fluid dynamics*. Alemania: Springer.
- Föster, C. (2007). *Robust methods for fluid-structure interaction with stabilised finite elements*. stuttgart: Universität Stuttgart.
- Gaur, N., & Raj, R. (2020). Aerodynamic mitigation by corner modification on square model under wind loads employing CFD and wind tunnel. *Ain Shams Engineering* .
- González Mora, A. (2018). Historia de la dinámica de fluidos computacionales (CFD). *Curso de Ingeniería en Aeronáutica*, 5.
- Gumley, S. (1984). A parametric study of extreme pressures for the static design of canopy structures. *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* , 16(03), 43-56.
- Gurtin, M. (1981). *An Introduction to Continuum Mechanics*. London: Academic Press Inc.
- Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar , R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México: Mc Graw Gill.
- Habit, O. (2018). *Vivienda y ODS en México*. México: Naciones Unidas.
- Hargreaves, D., & Wright, N. (2007). *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 95, 335-369.
- Holmes, J. (1994). Wind pressures on tropical housing. *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* , 105-123.
- Horta Rangel, J. M., Lara, L. J., Váldez Vázquez, J., & Arreola Sifuentes, I. (2016). Fluid-Structure interaction and aeroelastic balance on the analysis of a tall building with irregular geometry. *British Journal of Applied Science & Technology*, 1-14.

- Hou, G., Wang, J., & Layton, A. (2012). Numerical methods for Fluid - Structure Interaction. *Mechanical & Aerospace Engineering*, 337-377.
- IhI, T., & Martínez, F. (2014). El cambio climático y los huracanes en la Península de Yucatán. *Monitoreo de riesgo y desastre asociado a fenómenos hidrometeorológicos y cambio climático*, 43-50.
- INEGI. (2020). *INEGI*. Retrieved from INEGI: <https://www.inegi.org.mx/>
- Keote , S., Kumar , D., & Singh, R. (2015). Constuction of low rise buildins in cyclone prone areas and modification of cyclone. *Energy and Power Sources* , 2(7), 247-252.
- Kopp, G., Mans, C., & Surry, D. (2005). Wind effects of parapets on low buildings: part 4. mitigation of corner loads with alternative geometries. *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93, 873-888.
- Kopp, G., Morrison, M., & Henderson, D. (2012). Full-scale testing of low-rise, residential buildings with realistic wind loads. *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 25-39.
- Kopp, G., Morrison, M., Gavanski, E., Henderson, D., & Hong, H. (2010). “Three Little Pigs” Project: Hurricane Risk Mitigation by Integrated Wind Tunnel and Full-Scale Laboratory Tests. *Natural Hazards Review* , 151-161.
- Lauder, B., & Spalding, D. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 269-289.
- Leatherman, S., Gan Chowdhury, A., & Robertson, C. (2007). Wall of Wind Full-Scale Destructive Testing of Coastal Houses and Hurricane Damage Mitigation. *Coastal Research*, 1211-1217.
- Mooneghi, M., & Kargarmoakhar, R. (2016). Aerodynamic Mitigation and Shape Optimization of Buildings: Review. *Building Engineering*.
- Mooneghi, M., Irwin, P., & Chowdhury, A. (2014). Large-scale testing on wind up lift of roof pavers. *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 22-36.
- Murià-Vila, D., Jaimes, M., Pozos Estrada, A., López, A., Reinoso, E., Chávez, M. M., . . . López, O. (2018). Effects of hurricane Odile on the infrastructure of Baja California Sur, Mexico. *Natural Hazards*, 963-981.

- Murià-Vila, D., Jaimes, M., Pozos-Estrada, A., López, A., Reinoso, E., & Chávez, M. M. (2018). Effects of hurricane Odile on the infrastructure of Baja California Sur, Mexico. *Natural Hazards*, 19.
- Navaratnam, S., Humphreys, M., Mendis, P., & Nguyen, K. (2020). Effect of roof to wall connection stiffness variations on the load sharing and hold-down forces of Australian timber-framed houses. *Structures*, 141-150.
- Nourhan, A., & Amal, E. (2021). Numerical investigation of wind actions on elevated houses. *American Association for Wind Engineering Workshop*, 5.
- Nourhan, A., Amal, E., Peter, I., & Arindam Gan , C. (2020). *Wind Pressure Distribution on Single-Story and Two-Story Elevated Structures*.
- Nourhan, A., Amal, E., Peter, I., & Arindam Gan, C. (2022). Experimental investigation of wind impact on low-rise elevated residences. *Engineering Structures*.
- Patankar , S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: Mc Graw - Hill.
- Pedrozo Acuña , A., & Torres-Freyermuth, A. (2011). Sobre el uso de las ecuaciones de Navier-Stokes con el promedio de Reynolds en el campo de la ingeniería de costas. *Tecnología y ciencias del agua*.
- Pindado, S., & Meseguer, J. (2003). Wind tunnel study on the influence of different parapets on the roof pressure distribution of low rise buildings. *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* , 91, 1133-1139.
- Reinoso Angulo, E., Jaimes Tellez, M. A., Ordaz Schroeder, M., & Niño Lázaro, M. A. (2010). Pérdidas en la infraestructura en México ante sismos y huracanes. *Revista Digital Universitaria UNAM*, 15.
- Rosengaus Moshinsky, M., & Sánchez Sesma, J. (1990). Gilbert: ejemplo de huracanes de gran intensidad. *Instituto Mexicano de Tecnología del agua, CNA.*, 23.
- Singh, J., & Roy, A. K. (2019). Effects of roof slope and wind direction on wind pressure distribution on the roof of a square plan pyramidal low-rise building using CFD simulation. *International Journal of Advanced Structural Engineering* ( , 231-254.

- Slone, A., Pericleous, K., Bailey, C., & Cross, M. (2002). Dynamic fluid-structure interactions using finite volume unstructure mesh procedures. *Computer & Structures*, 371-390.
- Sparks, P., Schiff, S., & Reinhold, T. (1994). Wind damage to envelopes of houses and consequent insurance losses. *Journal of Wind Engineering and industrial Aerodynamics* , 145-155.
- Stathopoulos, T., & Baskaran, A. (1988). Roof corner wind loads and parapet configurations. *Engineering and Industrial Aerodynamics* , 29, 79-88.
- Suaris , W., & Irwin , P. (2010). Effects of roof-edge parapets on mitigating extreme roof suction . *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* , 98, 483-491.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., & Shirasawa, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Wind Engineering*, 1749-1761.
- Torkian, B., Pinelli, J.-P., Gurley, K., & Hamid, S. (2014). Cost and Benefit Evaluation of Windstorm Damage Mitigation Techniques in Florida. *Natural Hazards Review*, 150157.
- Van Dormaal , J., & Raithby, G. (1984). Enhanced of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows. *Numerical heat transfer*, 7, 147-163.
- Xing , F., Mohotti, D., & Chauhan, K. (2018). Study on localised wind pressure developed in gable roof buildings having different roof pitches with experiments, RANS and LES simulation models. *Building and Environment* , 143, 240-257.
- Yang, W., Quan, Y., Jin, X., Tamura, Y., & Gu, M. (2008). Influences of equilibrium atmosphere boundary layer and turbulence parameter on wind loads of low-rise buildings. *Wind Engineering*, 2080-2092.
- Zore, K., Parkhi, G., Sasanapuri, B., & Varghese, A. (2019). ANSYS mosaic Poly-Hexacore mesh for high-lift aircraft configuration. *21th Annual CFD Symposium*. Bangalore.