



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“SIMULACIÓN CFD DE LOS COEFICIENTES DE PRESIÓN EN
UNA ESTRUCTURA DE PANELES SOLARES PARA EL
DISEÑO POR VIENTO DE LOS SOPORTES METÁLICOS”**

TESIS

PRESENTADA POR:

I. C. LUIS GABRIEL VALLADARES VÁZQUEZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

OPCIÓN ESTRUCTURAS

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2020

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

AGRADECIMIENTOS

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

RESUMEN

En este trabajo se presenta la obtención de los coeficientes de presión sobre una estructura conformada por paneles solares soportados por una estructura metálica de 4 apoyos anclados en tierra e inclinados 20° con respecto a la horizontal y sometidos a la acción del viento, a través de la utilización de la dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés). La modelación se realizó para 5 direcciones de viento (0° , 45° , 90° , 135° y 180°).

Además, se compararon los resultados de las presiones obtenidas durante una tormenta con la presión máxima que los paneles son capaces de soportar. Para esto, se utilizaron paneles de la marca ERDM, modelo 300-M6 HE, cuya resistencia máxima a la presión ejercida sobre ellos es igual a 5,400 pascales (550.65 Kg/m^2) según el fabricante.

Los resultados obtenidos indican que los paneles tienen una capacidad de carga mayor a los efectos provocados por el viento generado durante una tromba. Además se obtuvieron los coeficientes de presión netos sobre la superficie de los paneles solares, para cada una de las direcciones de viento mencionadas.

Posteriormente, se compararon los resultados obtenidos con los establecidos por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para techos inclinados con una pendiente, encontrándose que los coeficientes propuestos por el reglamento son menores a los obtenidos durante este trabajo, por lo que se sugirió que los coeficientes en el reglamento no deben ser utilizados para este tipo de estructuras.

Finalmente, se proponen los coeficientes de presión para las direcciones de viento mas desfavorables (con mayor área de oposición al viento), los coeficientes de presión propuestos deberán ser utilizados para el diseño de los soportes metálicos.

ABSTRACT

Computer Fluid Dynamics (CFD) was used to obtain the pressure coefficients on a structure formed by solar panels with a 20° slope, supported by a metallic structure with 4 columns anchored to the ground and subjected to the action of the wind. The modelling was performed for 5 wind directions (0°, 45°, 90°, 135° and 180°).

In addition, the results of the pressures obtained during a storm were compared with the maximum pressure that the panels are able to withstand. For this work, panels of the brand ERDM, model 300-M6 HE were used, which maximum resistance to the pressure exerted on them is equal to 5,400 Pascals (550.65 Kg / m²) according to the manufacturer.

The results obtained indicate that the panels have a higher load capacity than the effects caused by the wind generated during a storm. In addition, the pressure coefficients were obtained on the upper and lower faces of the solar panels, for each of the mentioned wind directions.

Subsequently, the results obtained were compared with those established by the Comision Federal de Electricidad (CFE) for inclined roofs with a single slope, finding that the coefficients proposed by the regulation are different from those obtained in this work so the former should not be used.

Finally, the pressure coefficients for each of the wind directions studied on the solar panels are proposed, these coefficients should be used for the design of the metallic supports.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	6
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	6
1.3.2 OBJETIVOS PARTICULARES.....	6
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 ESTUDIOS PREVIOS.....	8
2.2 CONTEXTO DE LA PROBLEMÁTICA.....	12
2.3 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES.....	14
2.3.1 ECUACIONES NAVIER-STOKES.....	14
2.3.2 PROCESO DE SOLUCIÓN DE UN PROBLEMA CON CFD.....	16
2.4 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	17
2.5 CONCLUSIONES DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	18
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	19
3.1 INTRODUCCIÓN.....	19
3.2 PREPROCESO PARA ESTUDIO DE PANEL SOLAR.....	20
3.2.1 DOMINIO COMPUTACIONAL.....	20
3.2.2 CONDICIONES DE FRONTERA.....	24
3.2.3 MALLADO.....	28
3.2.4 MODELO DE TURBULENCIA.....	29
3.2.5 PROPIEDADES DEL FLUIDO.....	30
3.3 PROCESO PARA ESTUDIO DE PANEL SOLAR.....	30
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
4.1 INTRODUCCIÓN.....	32
4.2 DIRECCIÓN DEL VIENTO A 0°.....	32
4.3 DIRECCIÓN DEL VIENTO A 45°.....	35
4.4 DIRECCIÓN DEL VIENTO A 90°.....	38
4.5 DIRECCIÓN DEL VIENTO A 135°.....	40

4.6 DIRECCIÓN DEL VIENTO A 180°.....	44
4.7 PROPUESTA DE COEFICIENTES DE PRESIÓN.....	47
4.7.1 DIRECCIÓN DE FLUJO A 0°.....	47
4.7.2 DIRECCIÓN DE FLUJO A 45°.....	48
4.7.3 DIRECCIÓN DE FLUJO A 90°.....	49
4.7.4 DIRECCIÓN DE FLUJO A 135°.....	50
4.7.5 DIRECCIÓN DE FLUJO A 180°.....	51
4.8 COMPARACIONES CON REGLAMENTO CFE.....	53
4.9 PROPUESTA DE COEFICIENTES PARA REGLAMENTO.....	56
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	60
5.1 CONCLUSIONES.....	60
5.2 RECOMENDACIONES.....	61
REFERENCIAS.....	63
ANEXO A. PRUEBAS DE SENSIBILIDAD.....	67
ANEXO B. COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON CFD VS TÚNEL DE VIENTO.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de panel solar y soporte metálico.....	1
Figura 2. Radiación solar media diaria en la República Mexicana.....	2
Figura 3. Resumen de datos meteorológicos del 4 de mayo de 2017.....	4
Figura 4. Modelo de panel solar simulado por Bitsuamlak et al (2010)	9
Figura 5. Resultados de simulación obtenidos por Bitsuamlak et al (2010)	9
Figura 6. Modelo de panel solar para hacer mediciones por Liu (2014)	10
Figura 7. Simulación de presiones en la superficie de paneles solares por Liu (2014)	10
Figura 8. Modelo de panel solar probado por López Llanusa et al. (2014)	12
Figura 9. Estructura metálica de soporte para paneles solares.	17
Figura 10. Modelación de una estructura de paneles solares con soportes metálicos.....	19
Figura 11. Esquema de los ángulos de incidencia del viento estudiados.....	20
Figura 12. Vista frontal de la estructura de paneles solares, unidades en metros.....	21
Figura 13. Vista lateral de la estructura de paneles solares, unidades en metros.....	21
Figura 14. Criterio frontal del dominio del fluido.....	22
Figura 15. Criterio longitudinal del dominio del fluido.....	23
Figura 16. Dimensiones del dominio del fluido (vista frontal)	23
Figura 17. Dimensiones del dominio del fluido (vista lateral)	24
Figura 18. Condiciones de frontera, dirección del flujo de viento 0°.....	25
Figura 19. Condiciones de frontera, dirección del flujo de viento 45°.....	25
Figura 20. Condiciones de frontera, dirección del flujo de viento 90°.....	26
Figura 21. Condiciones de frontera, dirección del flujo de viento 135°.....	26
Figura 22. Condiciones de frontera, dirección del flujo de viento 180°.....	27
Figura 23. Discretización del dominio de la estructura.	28
Figura 24. Mallados utilizados en la superficie de la estructura.....	29
Figura 25. Coeficientes de presión para dirección de flujo 0° (Vista frontal)	33
Figura 26. Coeficientes de presión para dirección de flujo 0° (Vista posterior)	33

Figura 27. Presión medida en la superficie de los paneles 0° (vista frontal).....	34
Figura 28. Presión medida en la superficie de los paneles 0° (vista posterior)....	35
Figura 29. Coeficientes de presión para dirección de flujo 45° (Vista frontal).....	36
Figura 30. Coeficientes de presión para dirección de flujo 45° (Vista posterior)...	36
Figura 31. Presión medida en la superficie de los paneles 45° (vista frontal).....	37
Figura 32. Presión medida en la superficie de los paneles 45° (vista posterior)...	38
Figura 33. Coeficientes de presión para dirección de flujo 90° (Vista frontal)	39
Figura 34. Coeficientes de presión para dirección de flujo 90° (Vista posterior)...	39
Figura 35. Presión medida en la superficie de los paneles 90° (vista frontal)	40
Figura 36. Presión medida en la superficie de los paneles 90° (vista posterior)...	40
Figura 37. Coeficientes de presión para dirección de flujo 135° (Vista frontal)	41
Figura 38. Coeficientes de presión para dirección de flujo 135° (Vista posterior).....	42
Figura 39. Presión medida en la superficie de los paneles 135° (vista frontal).....	43
Figura 40. Presión medida en la superficie de los paneles 135° (vista posterior).....	43
Figura 41. Coeficientes de presión para dirección de flujo 180° (Vista frontal)....	44
Figura 42. Coeficientes de presión para dirección de flujo 180° (Vista posterior).....	45
Figura 43. Presión medida en la superficie de los paneles 180° (vista frontal).....	46
Figura 44. Presión medida en la superficie de los paneles 180° (vista posterior).....	46
Figura 45. Coeficientes sugeridos para la parte superior del panel solar para una dirección de viento de 0° (Vista frontal)	48
Figura 46. Coeficientes sugeridos para la parte superior del panel solar para una dirección de viento de 45° (Vista frontal)	49
Figura 47. Coeficientes sugeridos para la parte superior del panel solar para una dirección de viento de 90° (Vista frontal)	50
Figura 48. Coeficientes sugeridos para la parte superior del panel solar para una dirección de viento de 135° (Vista frontal).....	51

Figura 49. Coeficientes sugeridos para la parte superior del panel solar para una dirección de viento de 180° (Vista frontal)	52
Figura 50. Criterio de techos inclinados con una pendiente (CFE, 2008)	54
Figura 51. Coeficientes de presión neta en techos aislados con una pendiente (CFE, 2008)	54
Figura 52. Coeficientes de presión netos para techos inclinados con una pendiente igual a 20° según CFE.....	55
Figura 53. Coeficientes de presión sugeridos para una dirección de viento de 0° (Vista frontal)	57
Figura 54. Coeficientes sugeridos para una dirección de viento de 180° (Vista frontal).....	58
Figura A.1. Resultado de coeficientes de presión obtenidos con CFD.....	68
Figura A.2. Convergencia de resultados durante proceso iterativo.....	69
Figura B.1 Comparación de resultados TDV vs CFD, para una dirección de 0°.....	71
Figura B.2 Comparación de resultados TDV vs CFD, para una dirección de 45°.....	72
Figura B.3 Comparación de resultados TDV vs CFD, para una dirección de 90°.....	72
Figura B.4 Comparación de resultados TDV vs CFD, para una dirección de 135°.....	73
Figura B.5 Comparación de resultados TDV vs CFD, para una dirección de 180°.....	73

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La energía solar, es una fuente de energía limpia, renovable, rentable y además fiable; permite satisfacer las demandas energéticas del planeta. Uno de los mayores beneficios, es que no se emiten gases contaminantes a la atmósfera, lo que ayuda a disminuir el calentamiento global y el efecto invernadero.

Los paneles solares, también conocidos como paneles fotovoltaicos, son dispositivos que captan y aprovechan la luz solar como fuente de energía, para convertirla en energía eléctrica, la cual puede ser utilizada para distintos fines.

Los paneles solares son colocados sobre unas estructuras metálicas para fijarlos y orientarlos hacia la luz directa del sol (Figura 1). Esto ayuda a que se aproveche mejor la energía solar y se transforme la mayor cantidad en energía eléctrica.



Figura 1. Modelo de panel solar y soporte metálico.

Por la novedad del aprovechamiento de la energía solar, actualmente con mayor frecuencia se utilizan los paneles solares y cada día es más común encontrarlos en las azoteas de viviendas o edificios. De acuerdo con Barajas (2012), México recibe una gran cantidad de radiación solar (Figura 2) la cual podría ser aprovechada con los paneles solares.

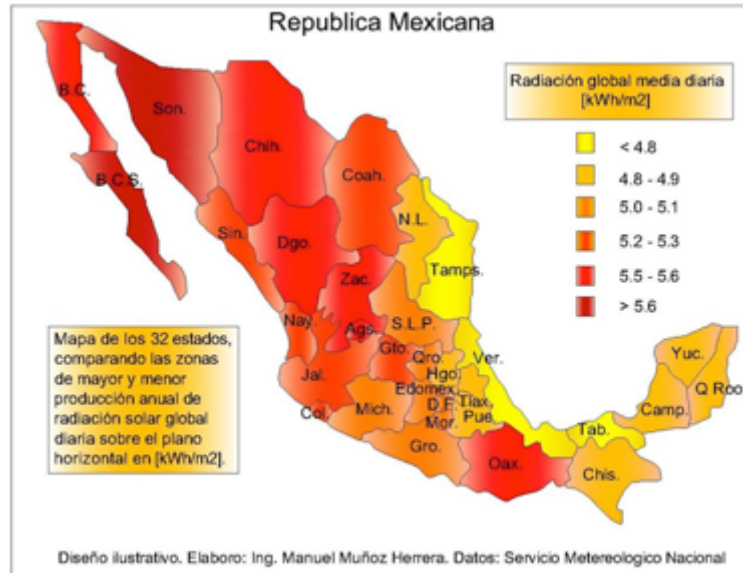


Figura 2. Radiación solar media diaria en la República Mexicana.

Se espera que para 2020, el 25% de la demanda energética total provenga de la energía solar y otras energías renovables, por lo que cada día se instala una mayor cantidad de paneles solares en las distintas regiones del país (Barajas, 2012).

Al estar colocados a la intemperie, los paneles solares estarán sometidos durante toda su vida a la acción del viento, nieve, lluvia y otros efectos meteorológicos; Simiu et al. (1996) definen al viento como *“movimiento del aire con respecto a la superficie de la tierra fundamentalmente causado por una variación del calor solar en la atmósfera terrestre”*.

El viento es generado por una diferencia de presiones entre puntos de igual elevación, estas diferencias son provocadas por fenómenos termodinámicos y mecánicos que ocurren dentro de la atmósfera (Simiu et al. 1996).

La dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) es una rama de la mecánica de fluidos que se centra en el análisis del movimiento de los fluidos y, en ocasiones, de otros fenómenos asociados empleando la computadora (Ballesteros et al. 2003).

El empleo de la simulación CFD permite, mediante la resolución de las ecuaciones que rigen a los fluidos, analizar el comportamiento que tendría el viento al entrar en contacto con un modelo de panel solar y determinar la distribución de presiones que se generarían en su superficie.

En el presente trabajo se obtuvieron los coeficientes de presión sobre la estructura utilizando CFD. Los coeficientes de presión son parámetros adimensionales que dependen principalmente de la geometría y orientación de la estructura con respecto a la dirección del viento (Messeguer et al, 2001), dichos coeficientes son utilizados en los reglamentos para obtener las presiones y/o succiones de diseño que el viento puede provocar sobre cualquier estructura en cualquier punto del planeta.

Las presiones calculadas a partir de los coeficientes de presión, son utilizadas en la ingeniería estructural para el diseño de las estructuras de soporte y anclaje para los paneles solares, dichas estructuras ayudan a que el panel cumpla su principal función de captación de energía (orientando el panel hacia el sol) y evitan que el panel se dañe bajo efectos de las condiciones atmosféricas.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) menciona que las velocidades de viento y la alta probabilidad anual de tormentas espontáneas son una amenaza constante en la región; está comprobado que las velocidades de viento en la península de Yucatán, pueden tomar valores de varios kilómetros por hora durante una tormenta (SMN, 2018). Por lo que cualquier objeto a su paso, estará expuesto a ser dañado o, en su defecto, ser arrastrado.

En la Figura 3, se enlistan los datos registrados para la ciudad de Mérida, Yucatán, referentes al día 4 de mayo del 2017, fecha en la cual se presentó una tromba que dejó varios daños materiales y caída de árboles.

El SMN (2018) define a la tromba como una tormenta de corta duración, la cual produce lluvia muy intensa acompañada de fuerte viento, este tipo de fenómenos meteorológicos generalmente son espontáneos e impredecibles.

Resumen de datos para el 4 de Mayo de 2017:

● Temperatura Máxima	38 °C	18:49	● Temperatura Mínima	25 °C	09:55
● Humedad máxima	88.7 %	10:57	● Humedad mínima	33.2 %	18:49
● Presión máxima	1014 hPa	23:45	● Presión mínima	1008 hPa	00:46
● Radiación máxima	-- W/m2		● Radiación mínima	-- W/m2	
● Velocidad Viento (Máx)	50 km/h	21:10	● Rachas máximas de viento	70.4 km/h	
● Precipitación acumulada	-- mm				

Figura 3. Resumen de datos meteorológicos del 4 de mayo de 2017, fuente: https://www.meteored.mx/clima_Merida-America+Norte-Mexico-Yucatan-MMMD-sactual-22381.html, recuperado el 19 de febrero de 2018

Es posible observar que durante una tromba (Figura 3) se pueden alcanzar velocidades de viento considerables, capaces de poner en riesgo cualquier estructura liviana. Durante la tromba presentada el 4 de mayo del 2017 en Mérida, se registraron rachas de viento superiores a los 70 km/h, las cuales podrían compararse con la velocidad de viento generada por una tormenta tropical. La escala Saffir-Simpson establece que una tormenta tropical tiene una velocidad de viento de entre 63 y 117 km/hr (SMN, 2018), por lo que las velocidades registradas durante la tromba del 4 de mayo de 2017 se encuentran dentro de ese rango.

En 2002, el huracán Isidoro impactó la península de Yucatán con vientos máximos sostenidos de 200 km/h provocando daños a una gran cantidad de estructuras como naves industriales, muros, espectaculares, entre otras (SMN, 2018). Sin embargo, el uso de los paneles solares no era tan frecuente como lo es en la actualidad, por lo que no existen registros de estructuras similares dañadas por algún fenómeno meteorológico como un huracán.

Afortunadamente, para los proveedores y usuarios que han adquirido o instalado paneles solares en sus edificaciones, recientemente aún no se ha presentado

algún fenómeno atmosférico (huracán, tormenta, tromba, etc.) que haya dañado alguna estructura de paneles solares. Sin embargo, debido a la posición geográfica de la región, existe la posibilidad de que en el futuro se presente un huracán o cualquier otro fenómeno que pueda comprometer la integridad de este tipo de estructuras. Al contrario de las tormentas tropicales o los huracanes, las trombas son fenómenos espontáneos, por lo que cualquier estructura debería ser capaz de soportar este tipo de eventos meteorológicos aleatorios.

En México, aún no existen reglamentos confiables para el correcto diseño y dimensionamiento de estructuras de soporte para paneles solares; actualmente los proveedores y diseñadores de estructuras de soporte para paneles solares se basan únicamente en su propio criterio, experiencia y realizan sus diseños considerando únicamente las dimensiones de la ubicación disponible para instalar los paneles solares (únicamente cumpliendo con la orientación e inclinación requeridas para dirigirlos hacia el sol).

Para evitar el daño a este tipo de estructuras, es necesario diseñar los soportes metálicos conforme a los parámetros necesarios que puedan garantizar la seguridad estructural del panel, mismos que deben estar estipulados en los reglamentos de diseño y construcción; desafortunadamente, en México los reglamentos de construcción actuales no contemplan este tipo de estructuras en los apartados en que presentan sus coeficientes de presión; dado lo anterior, en el presente trabajo se obtendrán precisamente esos coeficientes.

Como se mencionó previamente, los coeficientes de presión son una herramienta utilizada para calcular las presiones y acciones que el viento provocaría sobre una estructura; las acciones (o fuerzas) obtenidas son utilizadas en la ingeniería estructural para el diseño de los soportes metálicos necesarios para la orientación de los paneles hacia la luz solar.

Actualmente, utilizando CFD se pueden llegar a resultados de similar precisión a los obtenidos en un túnel de viento, y muchas veces estos resultados son de gran uso en la ingeniería de viento (Ballesteros, 2003).

La simulación CFD se ha convertido en una de las principales herramientas para los ingenieros civiles para determinar los efectos que los fluidos pueden provocar sobre las estructuras (Ballesteros, 2003).

En este estudio se utilizó la simulación CFD dado que, a diferencia de los experimentos en el túnel de viento, las simulaciones CFD tienen un costo mucho menor y los resultados se pueden obtener de forma rápida y relativamente sencilla. Además, múltiples estudios (los cuales se describen mas adelante) demuestran que los resultados obtenidos con simulación CFD son similares a los resultados medidos en un túnel de viento.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar los coeficientes de presión con base en el comportamiento aerodinámico de un sistema estructural conformado por un soporte metálico anclado en tierra y paneles solares inclinados 20° sometidos a la acción del viento mediante la utilización de la dinámica de fluidos computacional (CFD).

1.3.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Modelar un panel solar fijado a una estructura metálica de soporte cuya inclinación sea la sugerida para la mayor captación de energía solar anual en la latitud del estado de Yucatán (20° con respecto a la horizontal).
- Generar el mallado adecuado para la obtención de resultados precisos pero ahorrando la memoria computacional.
- Simular con CFD velocidades y direcciones de viento que generen las presiones (empujes y succiones) similares a los provocados por una tormenta.
- Obtener la distribución de presiones positivas y negativas (empujes y succiones respectivamente) presentes en la superficie del panel solar.

- Comparar las presiones netas medidas con la resistencia máxima a la presión del panel solar.
- Calcular los coeficientes de presión netos para cada dirección de viento planteada.
- Comparar los resultados obtenidos con los coeficientes de presión establecidos en el reglamento de diseño por viento de CFE para techos inclinados a una pendiente y determinar si son válidos para este tipo de estructuras.
- Proponer los coeficientes de presión de diseño para diseñar estructuras de soporte.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 ESTUDIOS PREVIOS

Actualmente existen diversas configuraciones de paneles solares que se adaptan según las necesidades energéticas; por lo tanto, se pueden encontrar varios modelos de soportes que combinan diversos materiales como: aluminio, acero inoxidable, acero galvanizado o combinaciones entre ellos. Los paneles solares pueden distribuirse mediante arreglos o campos de paneles, dejando una separación entre ellos para darles mantenimiento o retirarlos. Además, hay diversas opciones en cuanto al montaje de paneles tales como: al nivel del suelo (en la tierra), en las azoteas de edificios de diversas alturas y con diferentes dimensiones, en techos inclinados, postes, plantas de energía, paneles anclados a muros, entre otros. Conforme avanza la ingeniería estructural, se han ido estudiando cada uno de esos arreglos para el correcto diseño de los soportes.

Bitsuamlak et al (2010) investigaron las características aerodinámicas de un modelo de panel solar (Figuras 4 y 5) instalado en tierra utilizando dos técnicas de CFD: Promedios de Reynolds de Navier Stokes (RANS) y simulación Large Eddy (LES). Los estudios de CFD fueron comparados y validados por experimentos en el túnel de viento de la Universidad Internacional de Florida, obteniéndose que los resultados eran similares entre los obtenidos con el CFD y los obtenidos en el túnel de viento.



Figura 4. Modelo de panel solar simulado por Bitsuamlak et al (2010)

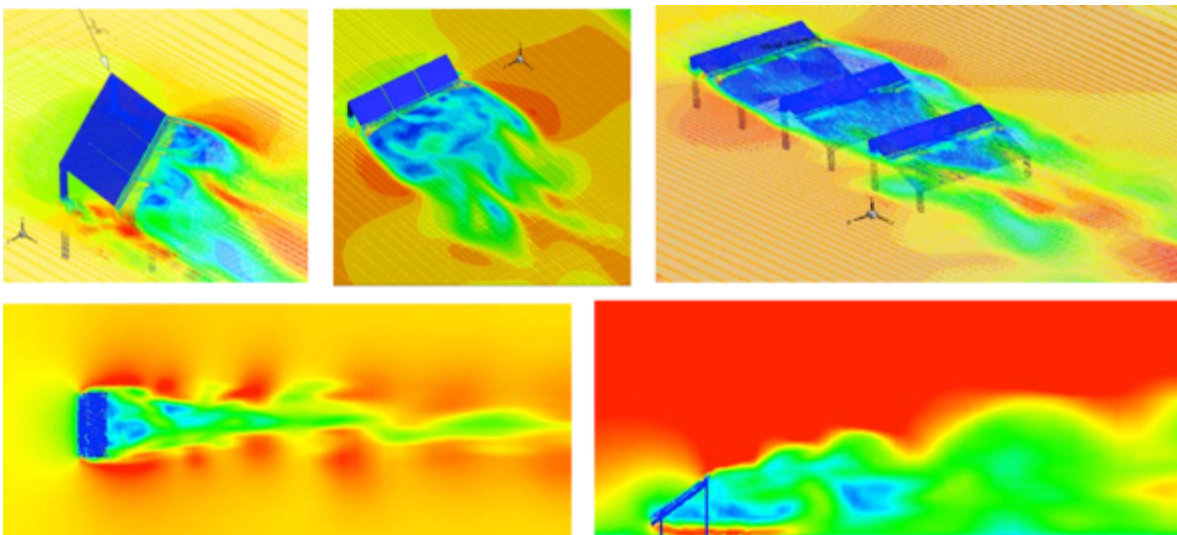


Figura 5. Resultados de simulación obtenidos por Bitsuamlak et al (2010)

Puneeth Kumar et al. (2014) utilizaron CFD para estudiar el arrastre y levantamiento de un modelo de panel solar con diferentes inclinaciones (30° , 45° y 60°) con respecto a la horizontal y para diferentes velocidades de viento (30, 60, 90 y 120 km/h), observaron que conforme la inclinación del panel aumenta, el arrastre aumenta significativamente disminuyendo el levantamiento y que para bajas inclinaciones de panel el parámetro predominante es el levantamiento mientras que el arrastre disminuye.

Liu (2014) midieron las presiones en un panel solar (Figura 6) ubicado en la azotea de un edificio en Ottawa (Canadá) durante 5 meses consecutivos e hicieron un comparativo con los lineamientos establecidos en los reglamentos ASCE7-05 (Reglamento de EUA, publicado en 2005) y SEAOC (Reglamento para el estado de California, publicado en 2013), con las mediciones obtuvieron las presiones máximas soportadas por el panel en diferentes puntos del edificio y concluyeron que los resultados experimentales eran ligeramente superiores que los presentados en los reglamentos mencionados. Posteriormente utilizaron el método CFD (Figura 6) para validar los resultados experimentales obtenidos, con este procedimiento lograron comprobar que los resultados experimentales coincidían con los modelados por computadora.



Figura 6. Modelo de panel solar para hacer mediciones por Liu (2014).

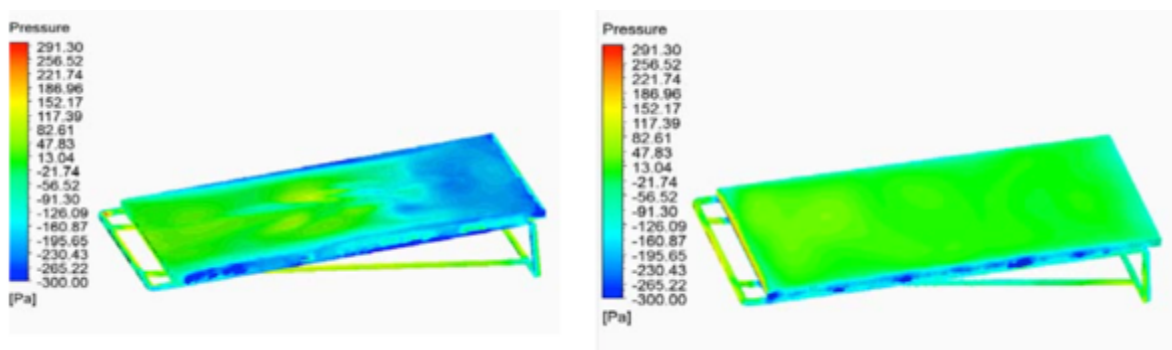


Figura 7. Simulación de presiones en superficie de paneles solares por Liu (2014)

Báez y Pozos (2017) recurrieron a la simulación CFD para determinar los efectos del viento sobre un arreglo de paneles solares los cuales fueron comparados con resultados experimentales obtenidos previamente. El estudio concluye que los resultados obtenidos mediante la simulación tienen buena concordancia, siendo pocos los puntos donde existe una diferencia significativa con respecto a los resultados experimentales. Además, la simulación por computadora les permitió simular diferentes pruebas en el túnel de viento únicamente variando algunos parámetros como la velocidad del viento o el ángulo de incidencia sobre los paneles. Los autores mencionan que esta herramienta computacional permite al investigador realizar una gran variedad de estudios con relativamente poco esfuerzo.

Como puede observarse, durante la última década se han hecho algunos estudios con CFD para determinar las fuerzas o cargas que el viento puede producir en los paneles para diferentes ubicaciones, orientaciones e inclinaciones. Sin embargo, para el correcto diseño de los soportes metálicos, es necesario diseñar conforme a los parámetros necesarios que puedan garantizar la seguridad estructural del panel, mismos que deben estar estipulados en los reglamentos de diseño y construcción. Uno de los parámetros principales son los coeficientes de presión.

Como sabemos, los reglamentos actuales en México no establecen los coeficientes de presión que deberían utilizarse para el diseño de este tipo de estructuras, por lo que es necesario realizar el presente estudio.

López Llanusa et al. (2014) hicieron una comparación entre los coeficientes de presión sugeridos por diversos reglamentos internacionales, entre los cuales destacan:

- NC-285: Norma cubana Carga de viento. Método de cálculo
- AS-1170.2: Australian Standard, Loading Code part 2: Wind loads.
- ASCE 7-10: American Society of Civil Engineers, Minimum design loads for buildings and other structures

- CIRSOC 102: Reglamento Nacional de Argentina, Acciones de viento sobre las construcciones.
- Eurocode 1-4: Action on structures, general actions. Parte 4: Wind actions.
- NBR 6123: Asociación Brasileña de Normas Técnicas. Fuerzas debidas al viento en edificaciones.

Los autores utilizaron un modelo de panel solar similar al de la Figura 8 para obtener datos más reales y hacer comparaciones más congruentes entre ellos.

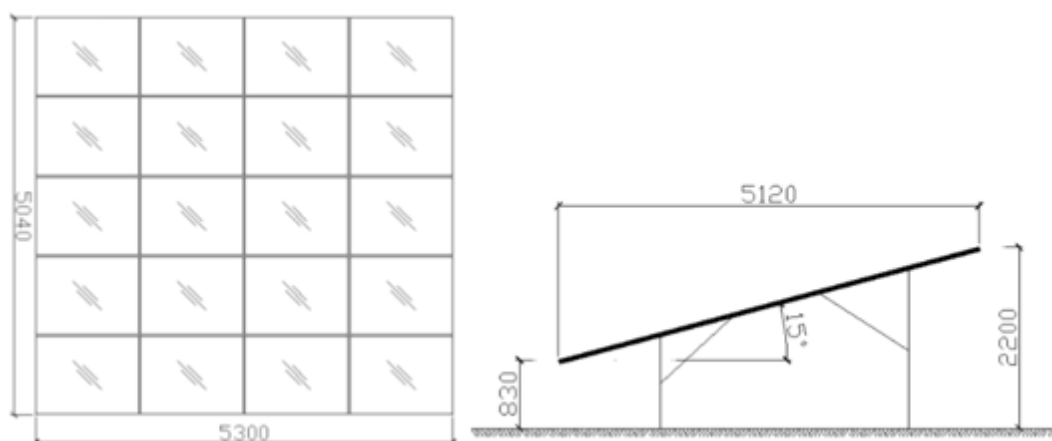


Figura 8. Modelo de panel solar (medidas en mm) probado por López Llanusa et al. (2014)

Con su estudio, encontraron que los coeficientes propuestos por los reglamentos mencionados previamente, pueden variar hasta en un 300% entre ellos. Además, lo más recomendable según los autores, es realizar un estudio (ya sea con CFD o en un túnel de viento) para determinar los coeficientes reales y utilizar estos para el diseño de los soportes metálicos.

2.2 CONTEXTO DE LA PROBLEMÁTICA

Como ya se mencionó previamente, las estructuras de paneles solares son estructuras livianas que están sometidas a la intemperie, por lo que son afectados

por la acción del viento durante toda su vida útil. En el Estado de Yucatán, el viento es capaz de alcanzar velocidades considerables que ponen en riesgo la estabilidad y seguridad de la estructura que se pretende estudiar (SMN, 2018).

Actualmente los paneles solares tienen un costo considerable, por lo que es imperativo que las estructuras de soporte y los elementos de fijación, cumplan la función para la cual son diseñados y no permitan que el panel se dañe.

Para lograr lo anterior, es necesario diseñar los soportes metálicos considerando cargas gravitacionales (peso propio y peso de los paneles solares) así como las cargas accidentales (como viento, nieve, sismo, etc); los efectos del viento deberán ser obtenidos conforme a coeficientes de presión sobre los paneles solares. Con los coeficientes de presión dados para una estructura con paneles solares, es posible obtener las presiones que el viento provocaría sobre la estructura; dichas presiones se transforman en fuerzas y momentos (acciones) que se trasladarán a los soportes.

Como se estableció previamente, el objetivo del presente estudio es encontrar los coeficientes de presión sobre la estructura de panel solar. Munson et al (2007) establecen que los coeficientes de presión pueden obtenerse con la ecuación 1:

$$Cp = \frac{P - Pz}{\frac{1}{2} \rho z * Vz^2}$$

Donde Cp es el coeficiente de presión, P es la presión estática sobre un punto de la estructura, Pz es la presión del flujo libre (o presión de referencia) fuera de la perturbación del objeto, ρz es la densidad del aire y Vz es la velocidad del viento sin influencia de objetos.

Según el capítulo de Diseño por Viento del Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (MOCDV-CFE) el coeficiente de presión se define como la relación de la presión actuante sobre la construcción o sobre una de sus superficies, con la presión de referencia. Este coeficiente determina el efecto de la variación de la presión, según la geometría o forma de la

construcción, así como la intensidad de la velocidad y la turbulencia del flujo de viento.

2.3 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES

La dinámica de fluidos computacionales (CFD) consiste en el análisis del movimiento de los fluidos y, en ocasiones, de otros fenómenos asociados (transferencia de calor, reacciones químicas, arrastres de sólidos, etc.) empleando la computadora. Su objetivo es la búsqueda de una solución aproximada de las ecuaciones que rigen el movimiento de los fluidos, a través de la discretización y la resolución de dichas ecuaciones para pequeños elementos cuya interacción permita representar al fluido en su totalidad (Pacheco, 2012).

Las ecuaciones de movimiento de los fluidos se basan en los siguientes principios: la conservación de la masa, la conservación de la cantidad de movimiento y la conservación de la energía. Estos principios pueden ser expresados en términos de ecuaciones diferenciales (ecuaciones de Navier-Stokes).

2.3.1 ECUACIONES NAVIER-STOKES

Las ecuaciones que definen la velocidad y presión en cualquier punto del espacio de un fluido fueron formuladas por el ingeniero francés Claude Navier y el matemático George Stokes, derivándose directamente de las leyes del movimiento de Newton (Ballesteros et al. 2003).

Estas ecuaciones son:

Ecuación de conservación de la masa o continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = S_m$$

Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

Ecuación de la conservación de la energía:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\vec{v}(\rho E + p)) = -\nabla\left(\sum_j h_j J_j\right) + Sh$$

Donde:

$\rho \vec{g} + \vec{F}$ es la fuerza de cuerpo

t es el tiempo

h_j es la entalpia

Sh es el calor generado por alguna reacción química o alguna otra fuente de calor

E es la energía

J_j es la difusión del flujo

Sm es la masa agregada

Para resolver este complejo sistema de ecuaciones diferenciales, es preciso discretizar el dominio (generación de la malla) donde se aplican las ecuaciones y convertir las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas (discretización de las ecuaciones).

Al discretizar el dominio se renuncia a conocer los valores de las variables en todos los puntos del campo del fluido, aspirando a conocerlos únicamente en un número finito de puntos siendo estos, los nodos de los elementos de malla en los que se subdivide el dominio (Pacheco, 2012).

El resultado es un sistema de ecuaciones algebraicas (varias ecuaciones para cada punto de la malla) cuya resolución ha de realizarse normalmente de forma iterativa. La obtención final de los valores de las distintas variables en las caras de los diferentes elementos será resultado de la interpolación numérica de los puntos o nodos pertenecientes al elemento (Pacheco, 2012).

La solución de las ecuaciones discretas se parecerá más o menos a la solución exacta de las ecuaciones de Navier-Stokes según el grado de pericia que se haya aplicado tanto en la discretización del dominio como de las ecuaciones (Pacheco, 2012).

2.3.2 PROCESO DE SOLUCIÓN DE UN PROBLEMA CON CFD

El usuario de CFD deberá especificar las condiciones del problema que va a resolver, así como proveer a la computadora ciertos parámetros de resolución para que el programa consiga encontrar una correcta solución del problema. En la Tabla 1 se presentan los pasos a seguir para realizar un análisis utilizando CFD:

Tabla 1. Proceso de solución por CFD

Etapa	Características
Preproceso	Definición del dominio
	Condiciones de inicio y de frontera
	Generación de la malla
	Selección del fenómeno físico a modelar
	Asignación de propiedades de los fluidos
Proceso	Discretización (generación de la malla)
	Solución de ecuaciones
Postproceso	Análisis y visualización de resultados.

2.4 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

Para obtener los coeficientes de presión en la estructura de paneles solares, se delimitó el problema en varias formas. La primera, es que se harán simulaciones a través de CFD únicamente en 5 direcciones de viento diferentes (0° , 45° , 90° , 135° y 180°).

Las direcciones de viento elegidas representan las 2 condiciones más desfavorables en las cuales la estructura tiene mayor área de oposición al viento (0° y 180°) y 3 direcciones en intervalos a cada 45° (45° , 90° y 135°).

La estructura metálica de soporte utilizada en este estudio, consistió en un marco metálico apoyado en 4 puntos anclado al piso como se ilustra en la Figura 9. Se consideraron paneles solares de la marca ERDM, modelo 300-M6 HE, cuya resistencia máxima a la presión ejercida sobre ellos es igual a 5,400 pascales (550.65 Kg/m^2) según la ficha técnica del fabricante.

Los paneles solares de la marca ERDM son fabricados en México y debido a su alta eficiencia energética y bajo costo, son muy utilizados en las azoteas o en los campos de paneles solares en México. Las medidas del modelo 300-M6 HE utilizado son 1 metro de ancho por 1.64 metros de altura y un espesor de 5 centímetros cada uno.

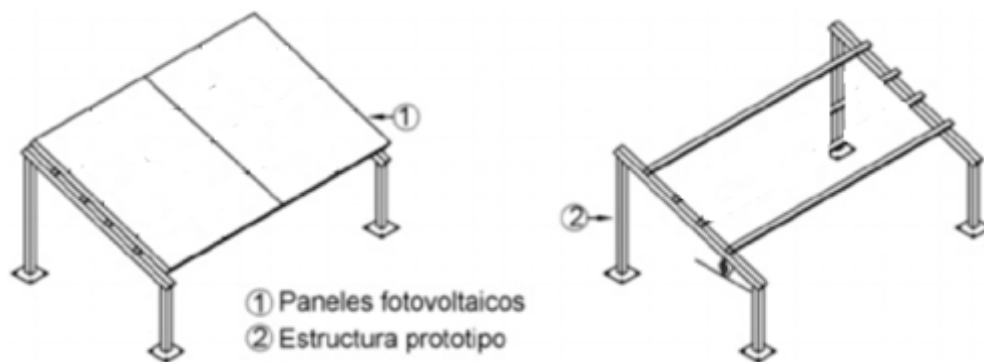


Figura 9. Estructura metálica de soporte para paneles solares.

2.5 CONCLUSIONES DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Como puede observarse en la revisión bibliográfica anterior, existe muchos tipos de paneles solares y los soportes utilizados para su montaje son muy variados; además, los paneles solares pueden ser instalados en varios lugares dependiendo del espacio disponible para su instalación.

Debido a que los paneles solares con estructura metálica son dispositivos novedosos, son pocos los trabajos que se han hecho para analizar su interacción con el viento y aún no están considerados en los reglamentos mexicanos. Con la bibliografía consultada se observa que, debido a la gran cantidad de modelos de paneles, tipos de soportes y lugares de montaje disponibles, es necesario hacer investigación para obtener los coeficientes de presión.

La velocidad del viento y la presión que éste ejerce sobre los objetos, puede ser un factor importante para el diseño de soportes ya que existe la probabilidad de eventos aleatorios con velocidades de viento considerables (como una tromba).

Los coeficientes de presión son valores adimensionales que permiten obtener las presiones que el viento ejerce en cualquier estructura únicamente considerando la forma del objeto y la orientación del viento independientemente de la velocidad regional del mismo y la topografía del sitio.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se describen los parámetros utilizados durante las etapas de preproceso, proceso y postproceso de un análisis realizado mediante CFD, de una estructura conformada por paneles solares con soportes metálicos y con una inclinación de 20° con respecto a la horizontal.

Como anteriormente se mencionó, se consideraron paneles solares de la marca ERDM, modelo 300-M6 HE, cuya resistencia máxima a la presión ejercida sobre ellos es igual a 5,400 pascales (550.65 Kg/m^2). Las dimensiones de los paneles solares son 1 metro por 1.64 metros cada uno; se consideraron 2 paneles solares, uno junto al otro sin dejar espacios entre uno y otro. En la Figura 10 se ilustra la modelación de la estructura de paneles solares y sus dimensiones.

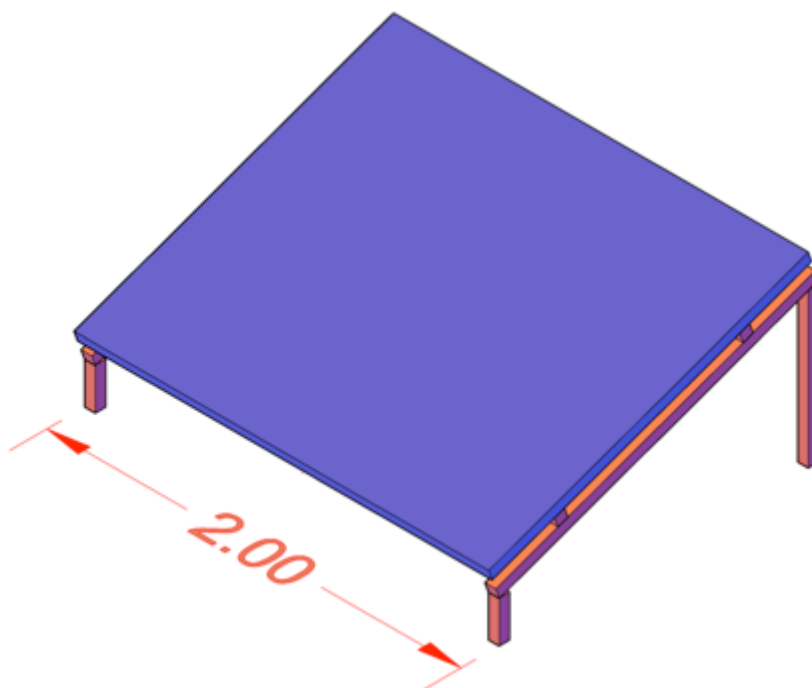


Figura 10. Modelación de estructura de paneles solares con soportes metálicos

Asimismo, en la Figura 11 se ilustran las direcciones de viento establecidas para el caso de estudio con respecto al panel solar (0° , 45° , 90° , 135° y 180°).

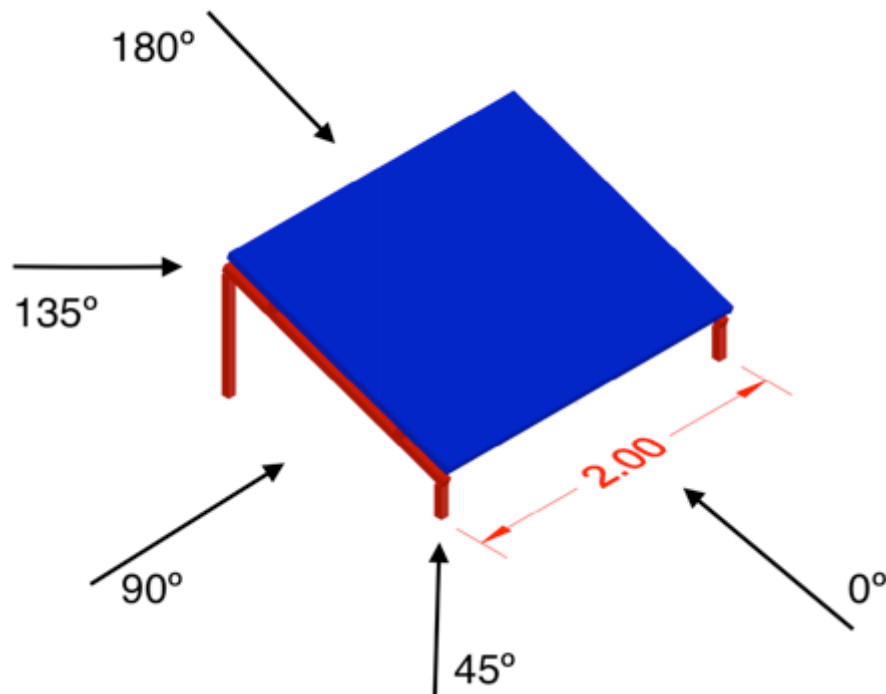


Figura 11. Esquema de los ángulos de incidencia del viento estudiados

El software utilizado para la modelación CFD durante el presente trabajo es el CFD Motion de la empresa Autodesk, el cual cuenta con las características necesarias para el estudio que se realizó: desarrollo de modelos tridimensionales, mallados manual y automático, contiene también los modelos de turbulencia más utilizados en el estudio de la aerodinámica así como varios esquemas de solución para las ecuaciones de gobierno de fluidos.

3.2 PREPROCESO PARA ESTUDIO DE PANEL SOLAR

3.2.1 DOMINIO COMPUTACIONAL

En esta sección se presenta la descripción de las geometrías utilizadas para el estudio de la acción del viento sobre la estructura planteada. En la Figura 12 se muestra una vista frontal de la estructura y en la Figura 13, una vista lateral.

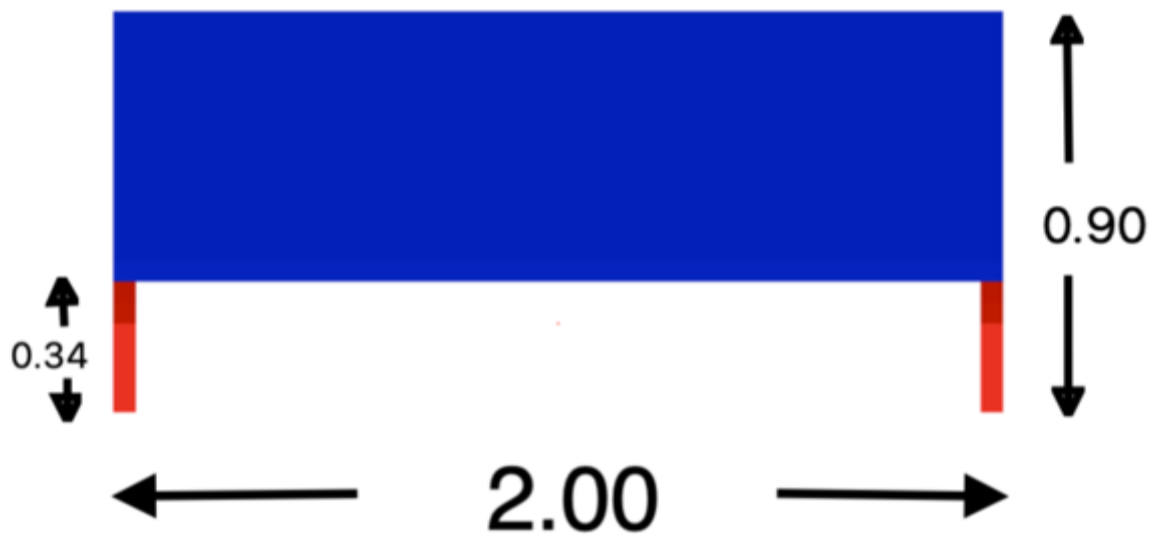


Figura 12. Vista frontal de la estructura de paneles solares, unidades en metros.

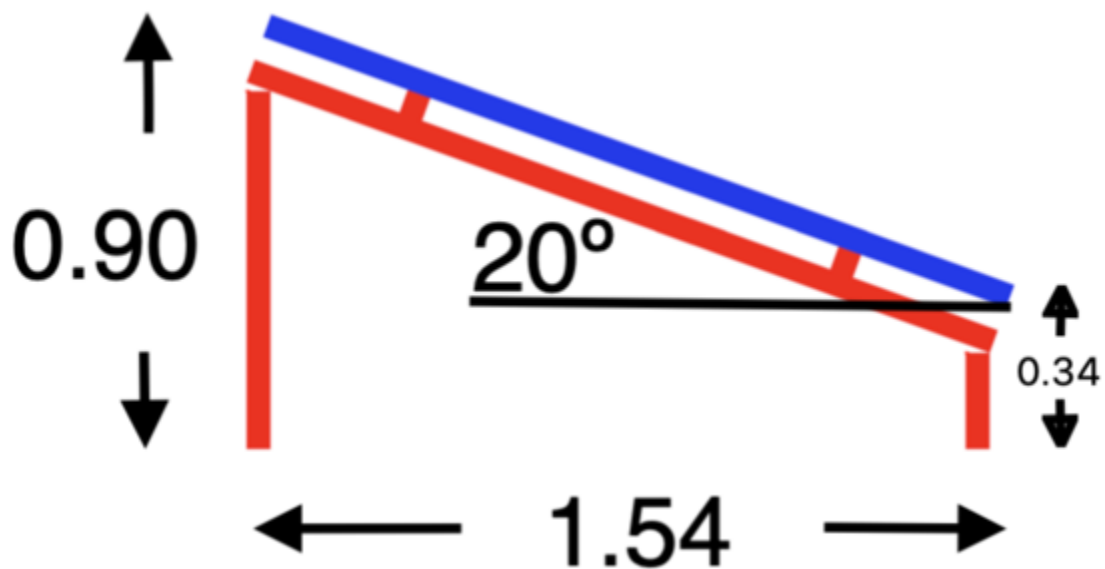


Figura 13. Vista lateral de la estructura de paneles solares, unidades en metros.

Messeguer et al. (2001) mencionan que las dimensiones del fluido con respecto a las dimensiones de la estructura inmersa están limitadas por el tamaño de la sección de la estructura en cuestión, por lo ésta no puede bloquear excesivamente

el área transversal perpendicular al sentido del flujo. Para lograr lo anterior, Casey et al (2000) establecen una serie de criterios para determinar las dimensiones del fluido que rodea a la estructura. Dichas dimensiones están en función de la altura (H) de la estructura que se pretende estudiar. En las Figuras 14 y 15 se esquematizan los criterios sugeridos para la obtención de las medidas del fluido en las 3 direcciones (X, Y y Z).

Las dimensiones del fluido y la ubicación de la estructura dentro del mismo se presentan en las Figuras 16 y 17:

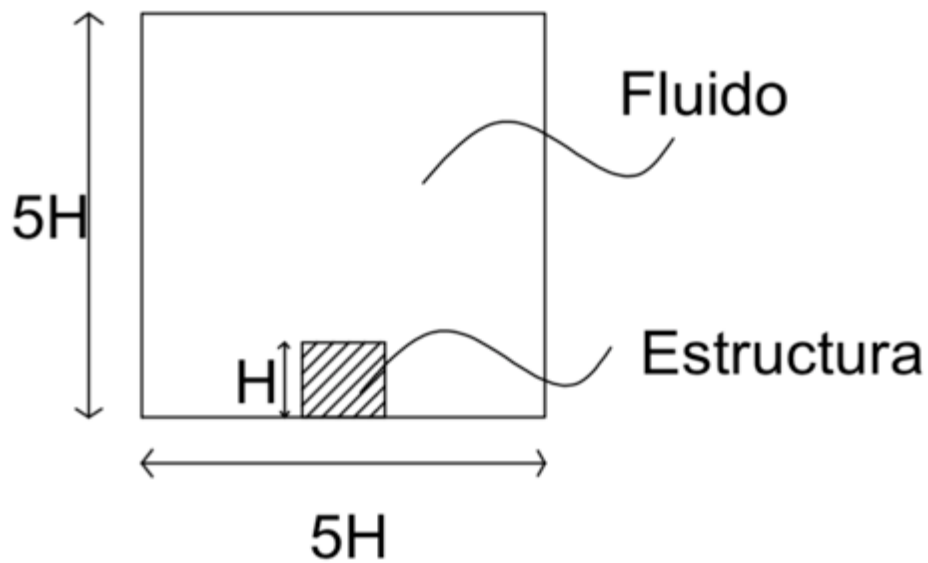


Figura 14. Criterios frontal del dominio del fluido

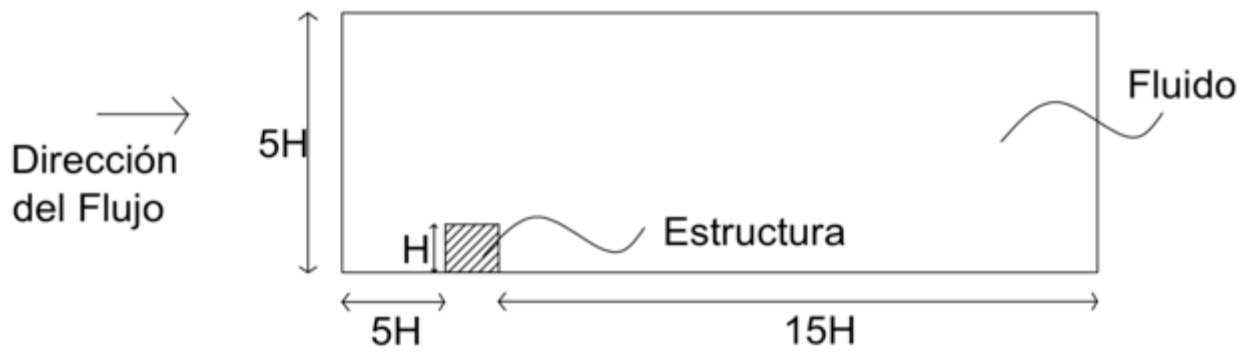


Figura 15. Criterio longitudinal del dominio del fluido

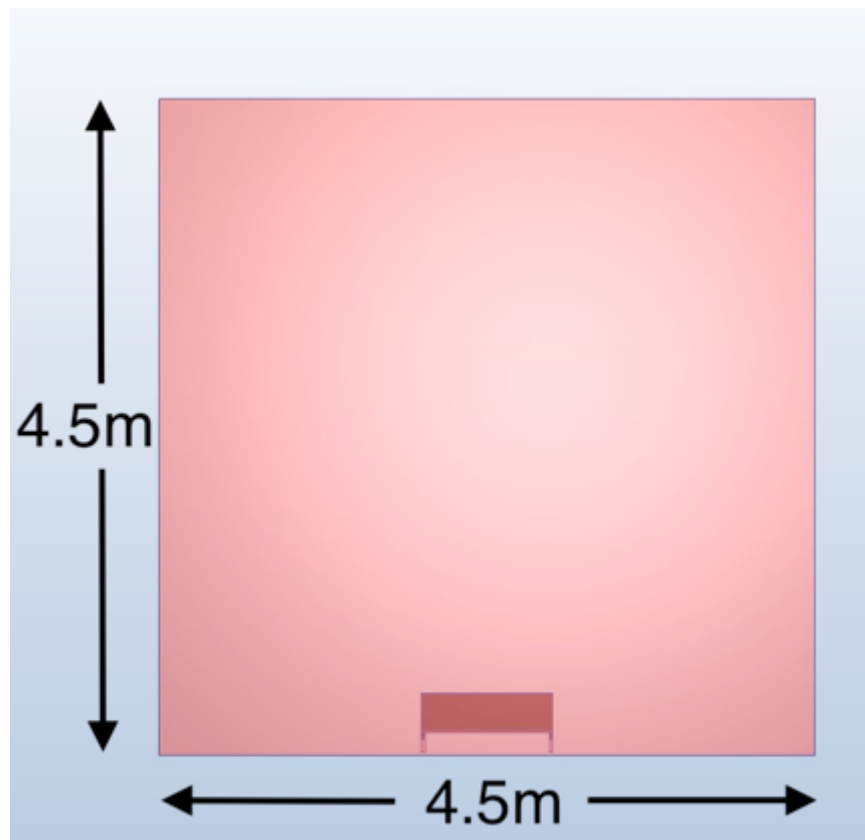


Figura 16. Dimensiones del dominio del fluido (vista frontal)

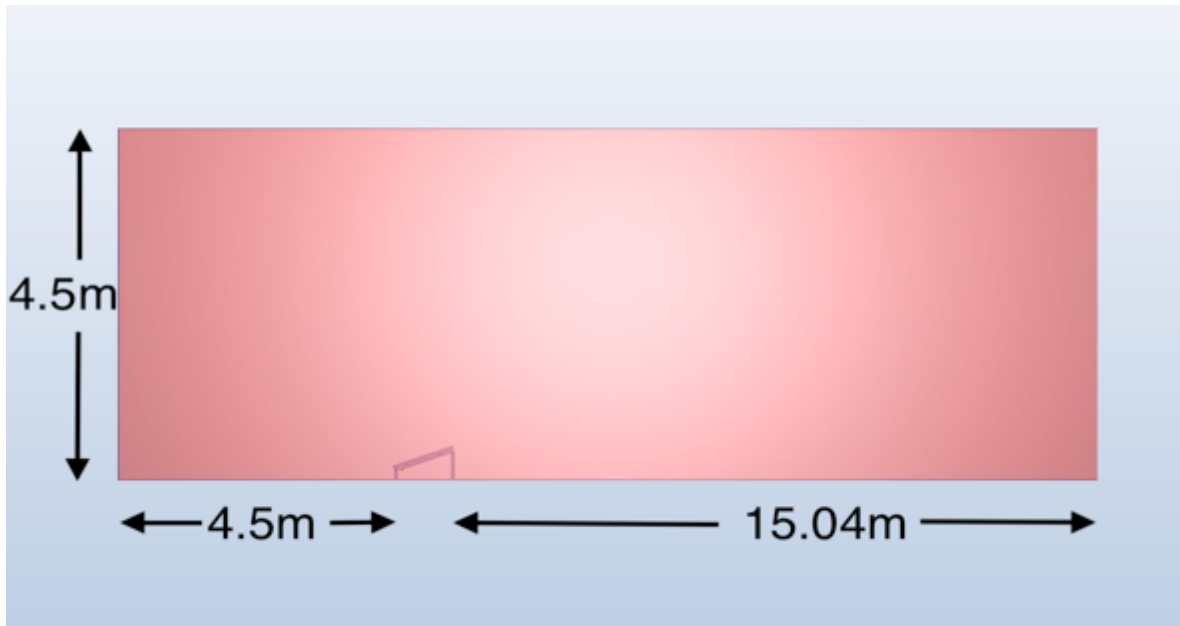


Figura 17. Dimensiones del dominio del fluido (vista lateral)

3.2.2 CONDICIONES DE FRONTERA

Para el modelado de la estructura, se determinó analizar la distribución de presiones en las caras frontal y posterior de la estructura de paneles solares.

En la Tabla 2 y en las Figuras 18-22 se ilustran las condiciones de frontera empleadas para el presente estudio para cada una de las direcciones de viento:

Tabla 2. Condiciones de frontera

CONDICIÓN DE FRONTERA	VALOR
Entrada	Velocidad 70 Km/h
Salida	Presión 0 Pa
Paredes Laterales	Deslizamiento/Simetría
Pared Superior	Deslizamiento/Simetría
Paredes de la estructura	No deslizamiento

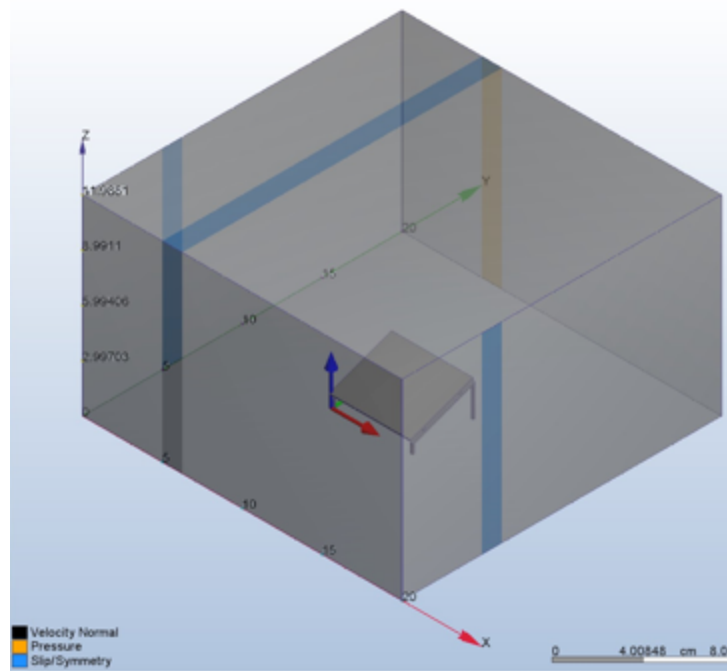


Figura 18. Condiciones de frontera, dirección del flujo de viento 0°

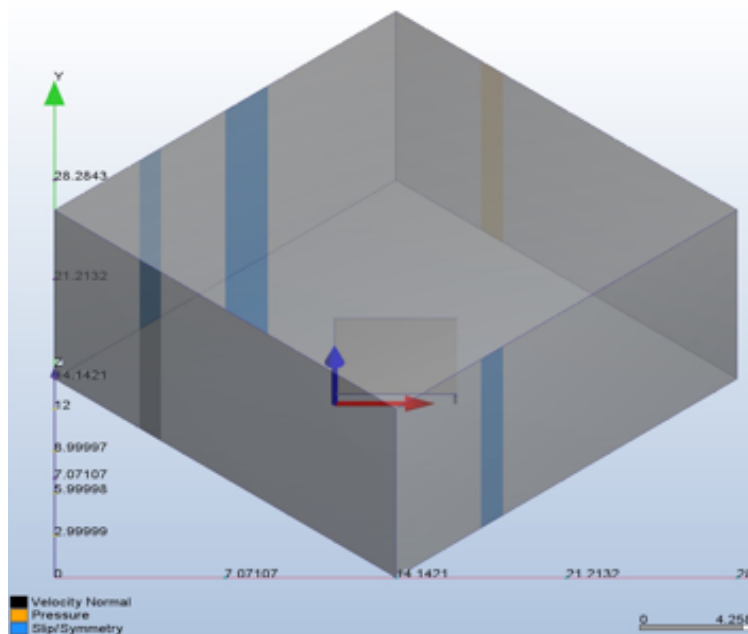


Figura 19. Condiciones de frontera, dirección del flujo de viento 45°

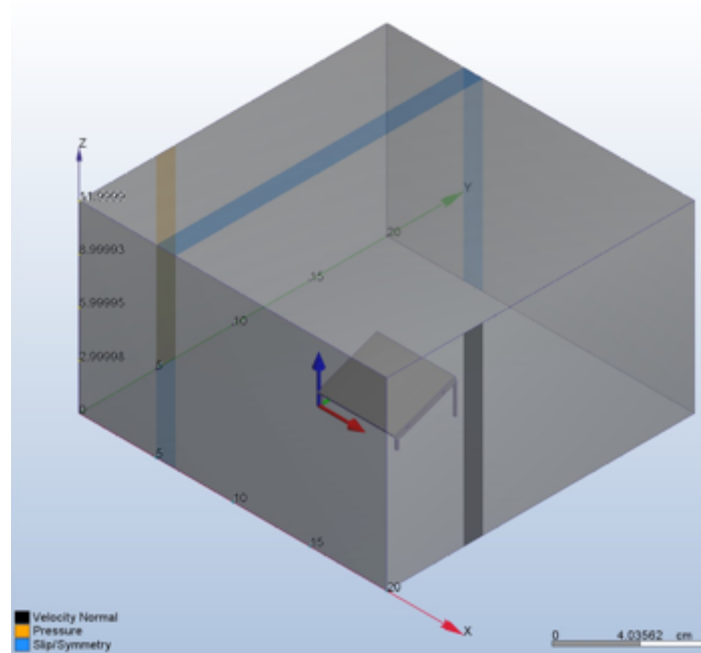


Figura 20. Condiciones de frontera, dirección del flujo de viento 90°

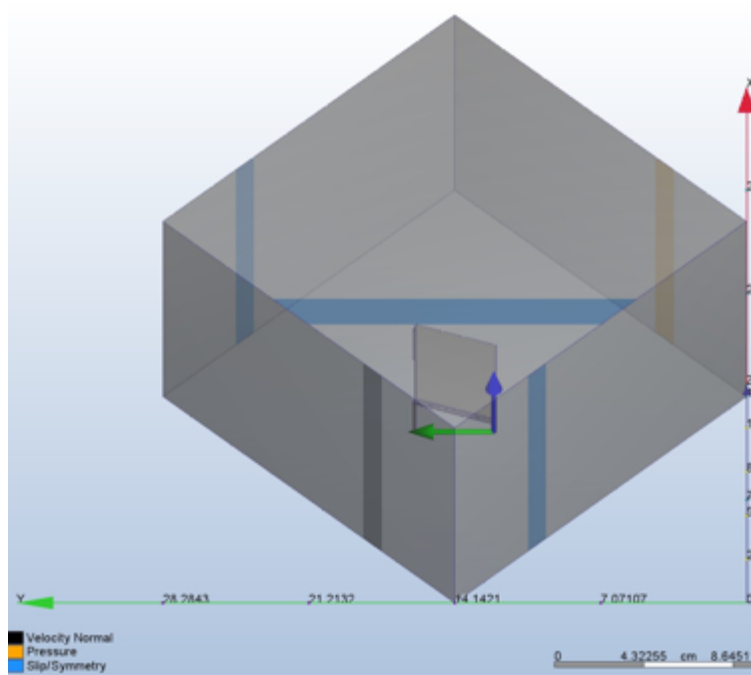


Figura 21. Condiciones de frontera, dirección del flujo de viento 135°

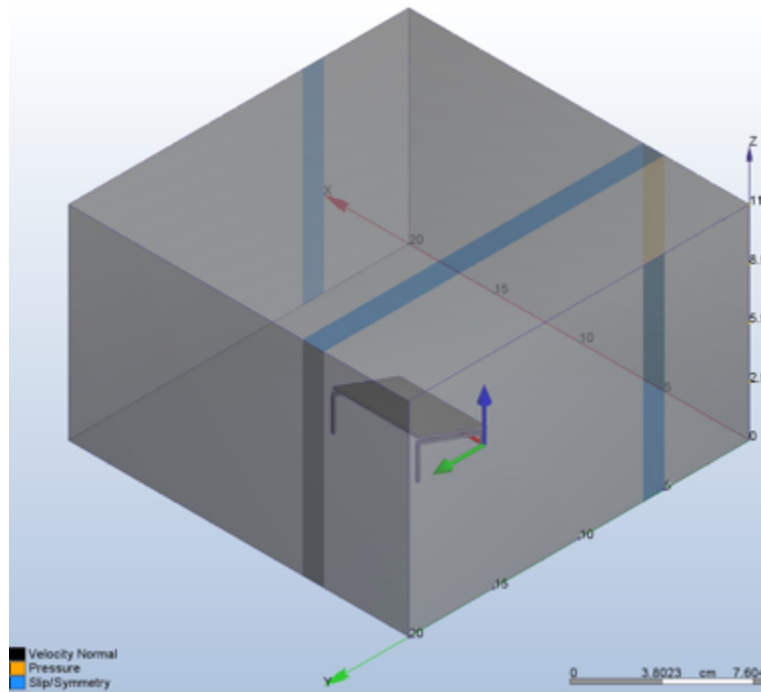


Figura 22. Condiciones de frontera, dirección del flujo de viento 180°

La velocidad de viento de 70 km/hr se eligió tomando en consideración la velocidad de viento medida en la tromba ocurrida el 4 de mayo de 2017 (Figura 3). Sin embargo, dado a que los coeficientes de presión no dependen de la velocidad de viento o de la topografía del sitio (Messeguer et al, 2001), puede seleccionarse cualquier velocidad de viento que se desee y los coeficientes de presión deberán ser siempre los mismos. Por otro lado, para el cálculo de los coeficientes de presión (objetivo principal del presente estudio) es necesario que la velocidad del viento sea lo suficientemente alta para que la turbulencia alrededor del modelo se estabilice. La estabilización de la turbulencia permite que las presiones (presiones promedio) en las superficies de la estructura sean constantes ayudando a la invariabilidad de los coeficientes de presión.

3.2.3 MALLADO

Para el mallado del dominio se utilizaron elementos que el software (CFD Motion) trae por defecto, los cuales consisten en elementos tetraédricos de 4 nodos con 6 variables por nodo: tres componentes de velocidad (u, v y w) que corresponden a las velocidades en las direcciones x, y, z , dos variables de turbulencia (k y ε) asociadas a la energía cinética turbulenta y la disipación de la turbulencia respectivamente, y una variable de presión (P). Desafortunadamente el programa no permite modificar los elementos a utilizar en este proceso.

Sin embargo, lo que si es posible modificar es el tamaño de los elementos a utilizar; por lo que, de un estudio de sensibilidad (Anexo 1) se decidió utilizar un mallado con un tamaño mínimo de 0.1 metros en la proximidad de la estructura que es donde se encuentran los gradientes mayores de presión en todo el dominio y se emplearon tamaños de malla de 0.4 metros a distancias alejadas de la estructura.

En las Figuras 23 y 24 se ilustran los puntos de discretización del dominio y el mallado en la superficie de la estructura respectivamente.

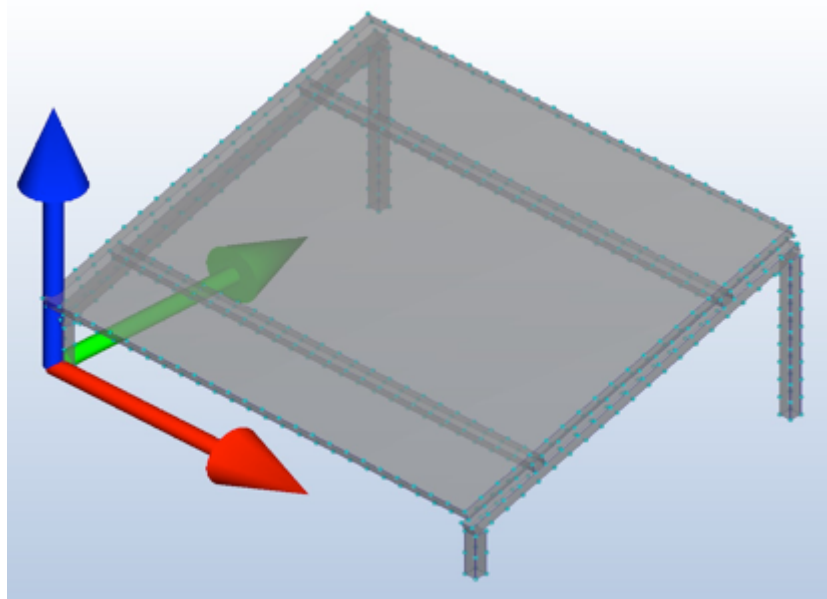


Figura 23. Discretización del dominio de la estructura.

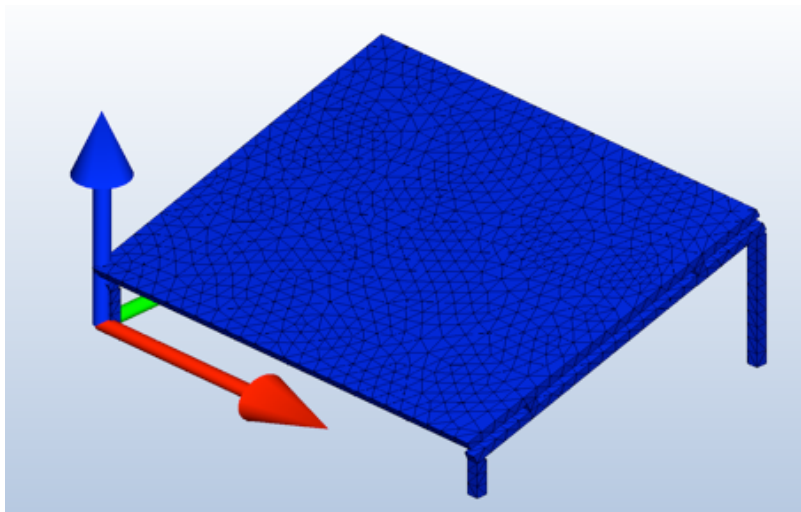


Figura 24. Mallados utilizados en la superficie de la estructura.

3.2.4 MODELO DE TURBULENCIA

En el modelado del flujo sobre la estructura de paneles solares se utilizó el modelo $k - \varepsilon$ estándar para generar la turbulencia.

El modelo $k - \varepsilon$ estándar es uno de los modelos de turbulencia más comunes. Es un modelo con dos ecuaciones de transporte para representar las propiedades turbulentas del flujo, esto permite poder conocer los efectos de convección y difusión de la energía turbulenta. La primera variable de este modelo se relaciona con la ecuación de la energía cinética turbulenta (k), dicha variable determina la energía en la turbulencia mientras que la segunda variable representa la ecuación de la disipación turbulenta (ε). Ambas ecuaciones son utilizadas para determinar la viscosidad de vórtices asociados a los esfuerzos de Reynolds. (Pacheco, 2012).

Existen otros modelos de turbulencia los cuales se nombran a continuación:

- Modelo Spallart-Arenas
- Modelo $k - \omega$
- Modelo de esfuerzos de Reynolds (RSM)
- Modelo Large Eddy Simulation (LES)

Sin embargo, dada la naturaleza y los fines del presente estudio se optó por el modelo $k - \varepsilon$ estándar debido a que es un modelo sencillo, práctico, de bajo costo computacional y que tiene gran aplicación en la ingeniería eólica.

3.2.5 PROPIEDADES DEL FLUIDO

Como ya se mencionó previamente, el estudio está enfocado en la obtención de los coeficientes de presión de una estructura de paneles solares que es afectada por la acción del viento. Por lo tanto, el fluido utilizado para este trabajo es el aire a temperatura y presión estándar.

Un paso importante en la configuración del modelo es la definición de las propiedades físicas del fluido. Estas propiedades pueden incluir:

- Densidad: 1.2 Kg/m^3
- Viscosidad: $1.817 \times 10^{-5} \text{ Pa-s}$
- Calor específico: 1.004 J/g-K
- Conductividad: $2.563 \times 10^{-4} \text{ W/cm-K}$
- Comprensibilidad: 1.4
- Presión Atmosférica: 101.3 kPa
- Temperatura: 20° C

Los valores utilizados de cada una de las propiedades mencionadas previamente, ya vienen por defecto en el software utilizado y corresponden a las condiciones estándar del viento.

3.3 PROCESO PARA ESTUDIO DE PANEL SOLAR

El proceso en las simulaciones CFD abarca la configuración de los parámetros y la resolución de las ecuaciones que permiten determinar el comportamiento de los fluidos.

El programa CFD Motion ofrece 5 posibles métodos de solución a seleccionar para la resolución de las ecuaciones de transporte, los cuales se enumeran a continuación:

- Monotone Streamline Upwind
- Petrov-Galerkin
- Flux Based Scheme
- Min-Mod Scheme (Petrov-Galerkin Variant)
- Modified Petrov-Galerkin

Se seleccionó el método Petrov-Galerkin dado a que éste viene por defecto en el programa utilizado; además, Nacer et al (2017) mencionan que este método otorga resultados de igual calidad a cualquier otro método disponible pero con un significativo ahorro computacional.

Al encontrar una solución aproximada a un problema numérico con un proceso iterativo, surge la importante pregunta de cuándo se tiene la solución adecuada. La búsqueda de una solución adecuada puede requerir una gran cantidad de iteraciones para incrementar la precisión. Para un problema numérico, el criterio de convergencia es un concepto importante con respecto al número de iteraciones (Pérez, 2017). Para evitar costos computacionales excesivos, la tasa de convergencia es un importante factor para el éxito del método numérico.

En la etapa de proceso se eligieron el método numérico para la solución de las ecuaciones de gobierno y los criterios de convergencia utilizados. Los criterios de convergencia utilizados se seleccionaron con base en un análisis de sensibilidad (Anexo 1). Estos parámetros se establecen en la Tabla 3.

Tabla 3. Parametros utilizados para la solución de las ecuaciones de gobierno

PARÁMETRO	VALOR O DESCRIPCIÓN
PROCESO DE SOLUCIÓN	PETROV-GALERKIN
CRITERIO DE CONVERGENCIA	MONITOREO DE RESIDUOS EN CONTINUIDAD: 10^{-3}

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los mapas de contorno de las distribuciones de los coeficientes de presión obtenidos mediante las simulaciones CFD. Además, se presentan las presiones obtenidas durante una tormenta y se comparan con la capacidad de carga máxima que los paneles de la marca y modelo previamente mencionados son capaces de soportar.

Posteriormente, se realiza un comparativo de los resultados obtenidos con simulación y los criterios propuestos por CFE para techos inclinados con una pendiente donde se determina si los coeficientes propuestos en el reglamento son adecuados para este tipo de estructuras.

Finalmente se proponen los coeficientes de presión sobre los paneles solares que deberán ser utilizados para el cálculo de los soportes metálicos para las 2 direcciones de viento más desfavorables.

4.2. DIRECCIÓN DEL FLUJO A 0°

En las Figuras 25 y 26 se presentan los mapas de contorno para la estructura de estudio con dirección de viento a 0°. Se observa que en la cara frontal de la estructura se presentaron presiones positivas (empujes) mientras que en la cara posterior se presentaron únicamente presiones negativas (succiones). El coeficiente de presión positivo (empuje) de mayor magnitud se presentó cerca del borde de barlovento en la cara frontal de la estructura, con una magnitud $C_p = +1.25$, además, se observa que los coeficientes de presión van decreciendo a lo largo del sentido paralelo al flujo hasta finalmente llegar a $C_p = -0.30$ cerca del borde de sotavento. Por otro lado, el coeficiente de presión negativo (succión) de mayor magnitud se presentó cerca del larguero de soporte de barlovento en la cara posterior de los paneles solares, con una magnitud $C_p = -1.30$.

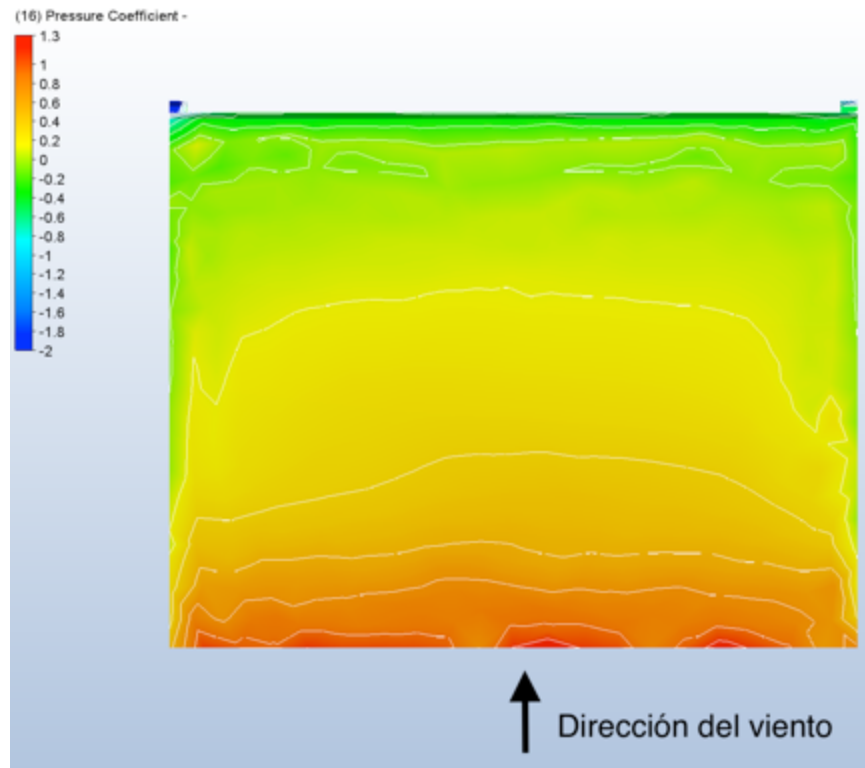


Figura 25. Coeficientes de presión para dirección de flujo 0° (Vista frontal)

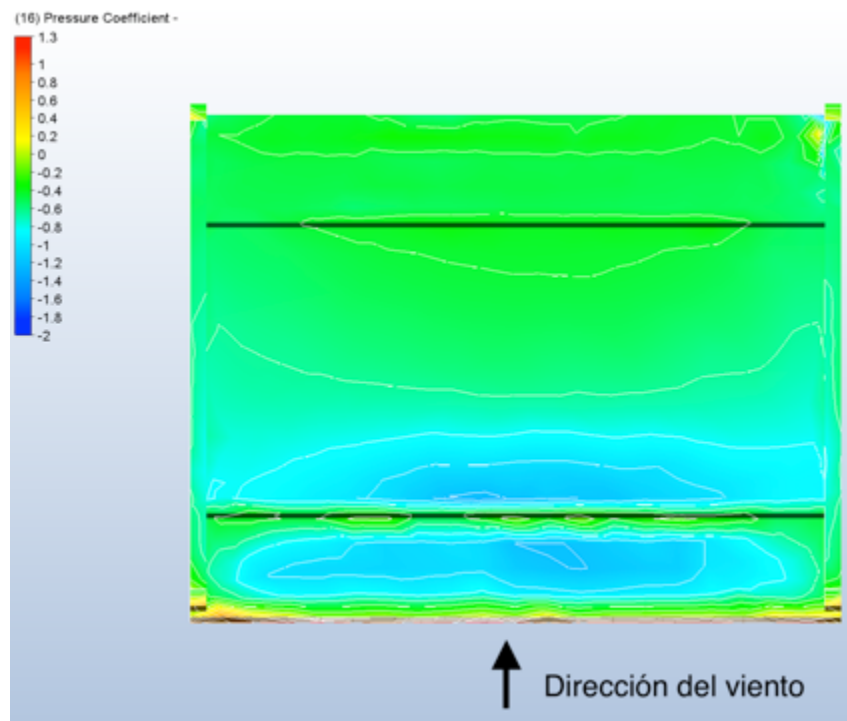


Figura 26. Coeficientes de presión para dirección de flujo 0° (Vista posterior)

En las Figuras 27 y 28 se observa la presión provocada por el viento sobre los paneles para la dirección 0° , la presión máxima neta tuvo una magnitud de 630 Pa. Según el fabricante, la resistencia máxima del panel solar para la marca y modelo utilizados es de 4,500 Pa, con lo cual se comprueba que para una tromba el panel no sufriría ningún daño.

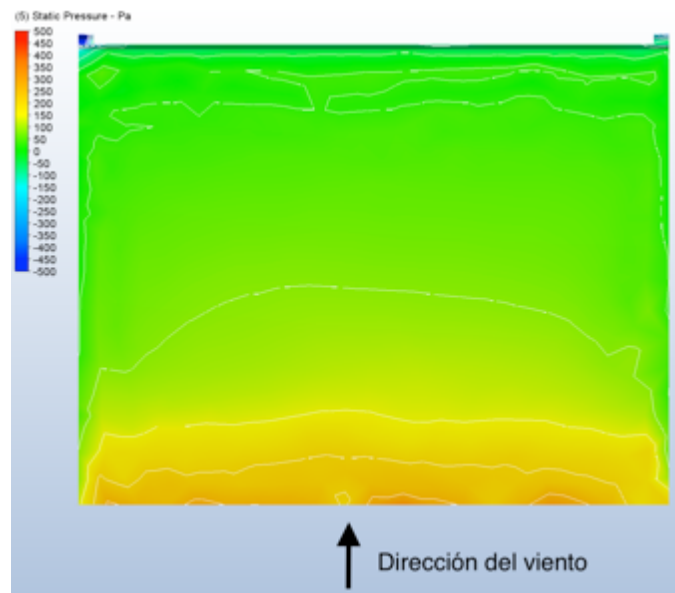


Figura 27. Presión medida en la superficie de los paneles para dirección de flujo 0° (vista frontal).

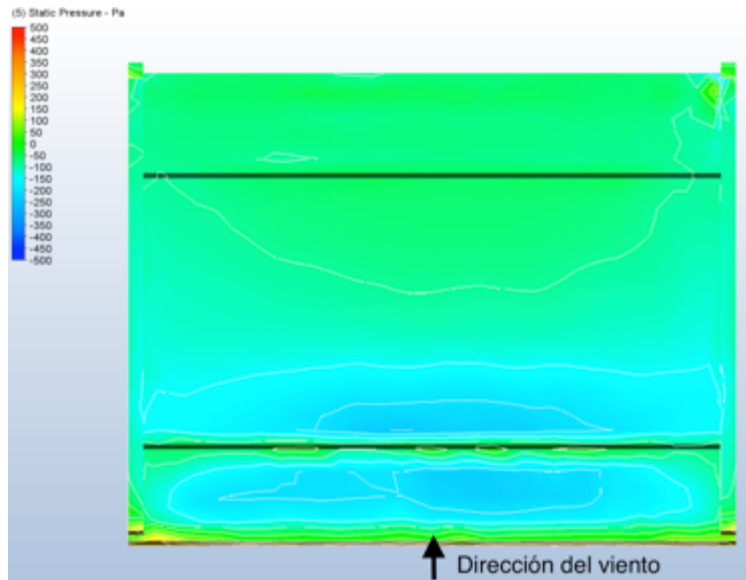


Figura 28. Presión medida en la superficie de los paneles para dirección de flujo 0° (vista posterior).

4.3. DIRECCIÓN DEL FLUJO A 45°

En las Figuras 29 y 30 se presentan los mapas de contorno para la estructura de estudio con dirección de viento a 45° . Se observa que en la cara frontal de la estructura se presentaron presiones positivas (empujes) y negativas (succiones) mientras que en la cara inferior se presentaron únicamente presiones negativas (succiones). El coeficiente de presión positivo (empuje) de mayor magnitud se presentó cerca la esquina de barlovento en la cara frontal de la estructura, con una magnitud $C_p = +0.85$, además los coeficientes de presión van decreciendo a lo largo del sentido paralelo al flujo hasta finalmente llegar a $C_p = -0.25$ debido al desprendimiento de la capa límite. Por otro lado, el coeficiente de presión negativo (succión) de mayor magnitud se presentó cerca de la esquina de barlovento a la altura del primer larguero de soporte en la cara posterior de los paneles solares, con una magnitud $C_p = -0.95$. La magnitud de los coeficientes de presión fueron reduciéndose en el sentido paralelo a la dirección del flujo de viento hasta finalmente alcanzar un valor mínimo de $C_p = -0.10$ en la esquina superior del borde de sotavento.

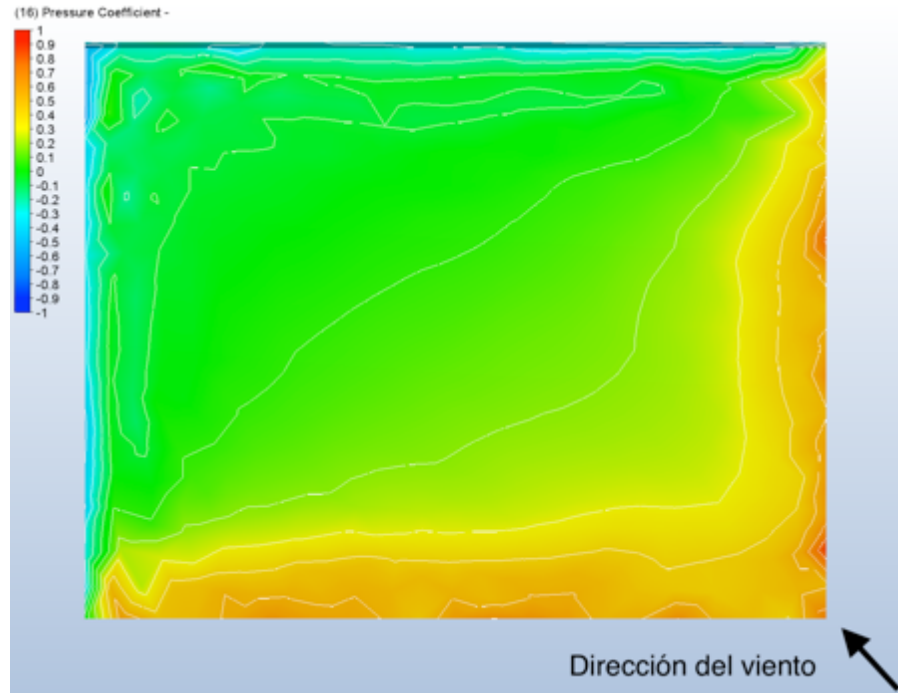


Figura 29. Coeficientes de presión para dirección de flujo 45° (Vista frontal)

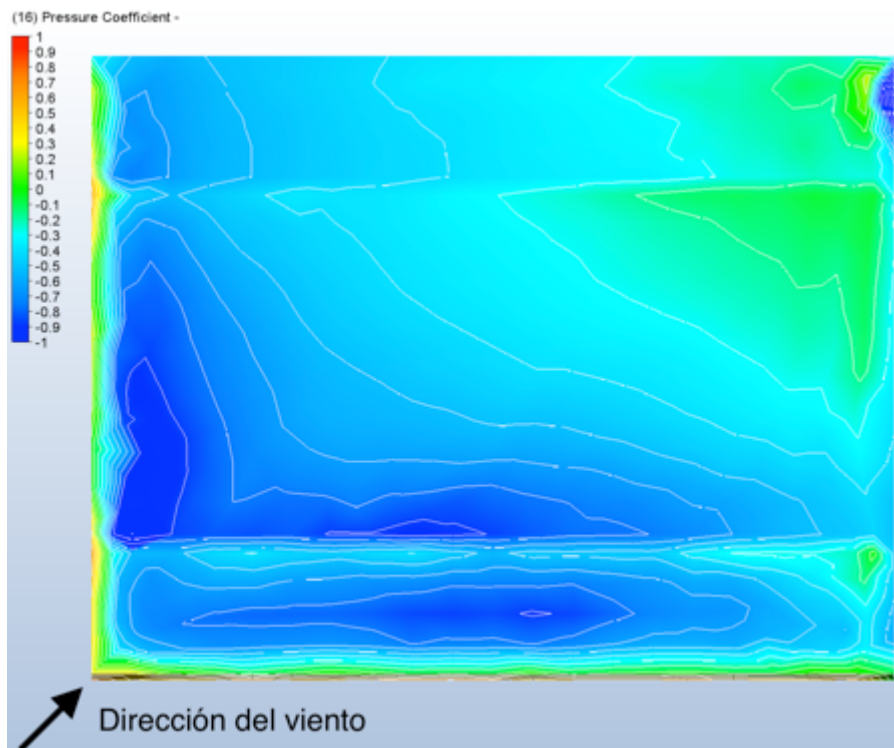


Figura 30. Coeficientes de presión para dirección de flujo 45° (Vista posterior)

En las Figuras 31 y 32 se observa la presión provocada por el viento sobre los paneles para la dirección 45° , la cual tiene una magnitud máxima neta de 450 Pa. Nuevamente se comprueba que la resistencia del panel solar no se ve comprometida debido a que las presiones provocadas por el viento, son mucho menores.



Figura 31. Presión medida en la superficie de los paneles para dirección de flujo 45° (vista frontal).

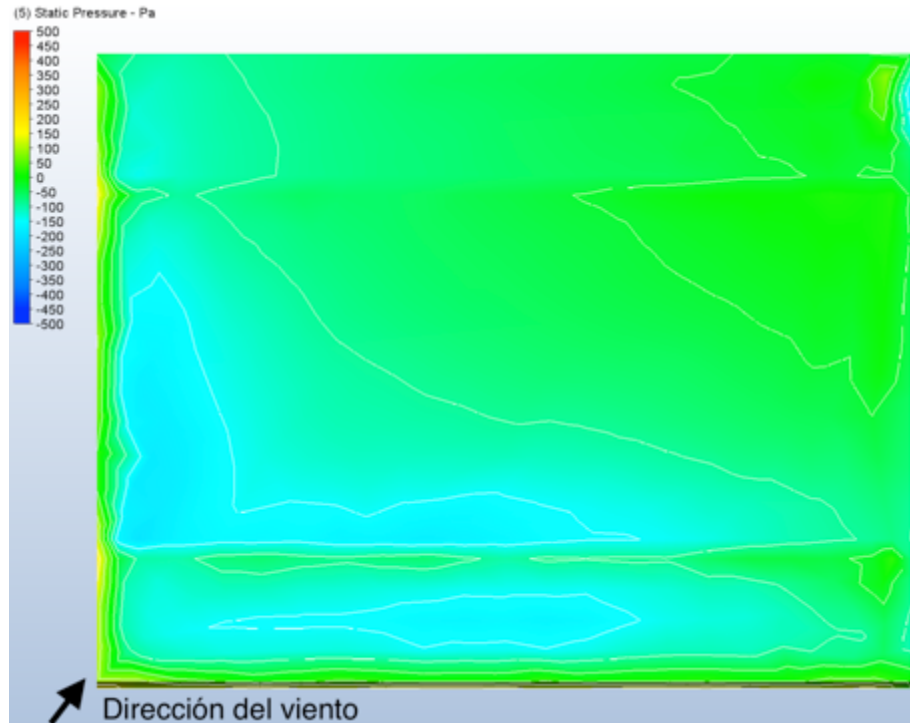


Figura 32. Presión medida en la superficie de los paneles para dirección de flujo 45° (vista posterior).

4.4. DIRECCIÓN DEL FLUJO A 90°

En las Figuras 33 y 34 se presentan los mapas de contorno para la estructura de estudio con dirección de viento a 90°. Se observa que en ambas caras de la estructura (caras frontal y posterior) se presentaron presiones positivas (empujes) y negativas (succiones). El coeficiente de presión positivo (empuje) de mayor magnitud se presentó cerca del borde de barlovento en la cara posterior de la estructura, con una magnitud $C_p = +0.90$, además se observa que los coeficientes de presión van decreciendo a lo largo del sentido paralelo al flujo hasta finalmente llegar a coeficientes negativos a lo largo de toda estructura con una magnitud máxima de $C_p = -0.30$. Por otro lado, los coeficientes de presión en la cara posterior de los paneles fueron similares a los obtenidos en la cara frontal, encontrándose una magnitud máxima positiva (coeficiente de presión positivo) igual a $C_p = +0.90$ cercano al borde de barlovento de la estructura y una magnitud mínima de $C_p = -0.25$.

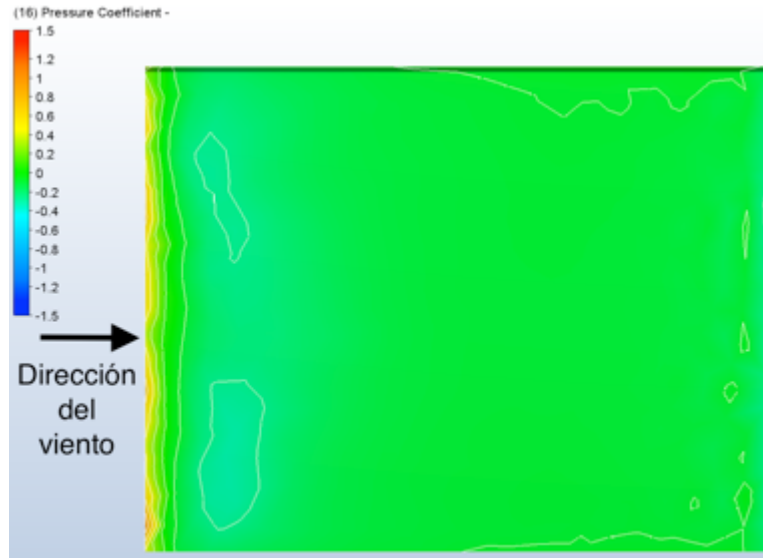


Figura 33. Coeficientes de presión para dirección de flujo 90° (Vista frontal)

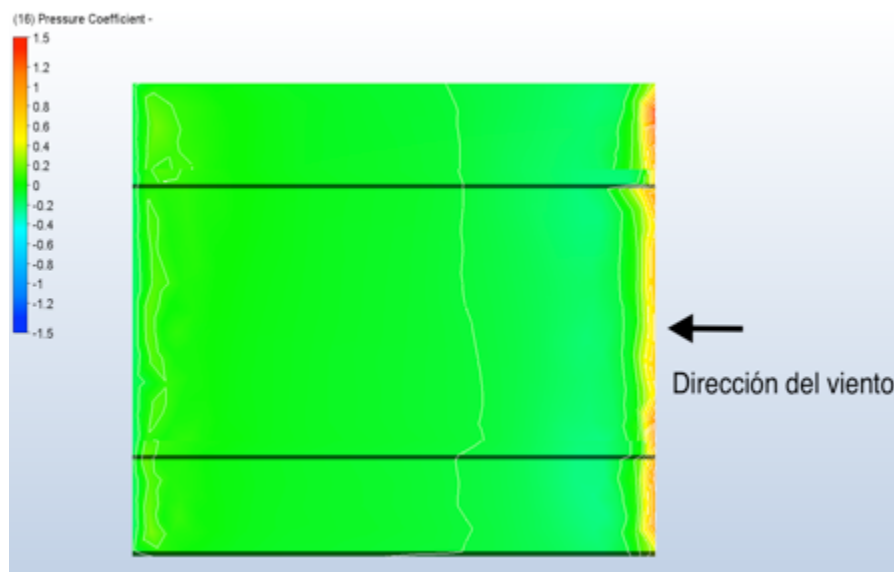


Figura 34. Coeficientes de presión para dirección de flujo 90° (Vista posterior)

En las Figuras 35 y 36 se observa la presión provocada por el viento sobre los paneles para la dirección 90°, la cual tiene una magnitud máxima neta de 60 Pa. Según el fabricante, la resistencia máxima de los paneles es de 4,500 Pa, con lo cual se comprueba que la integridad de los mismos no se ve comprometida.

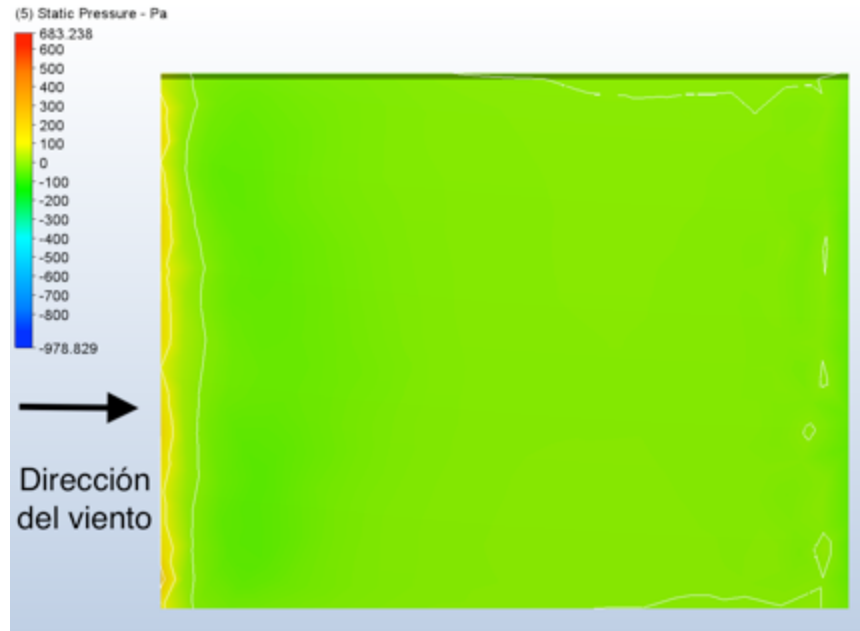


Figura 35. Presión medida en la superficie de los paneles para dirección de flujo 90° (vista frontal).

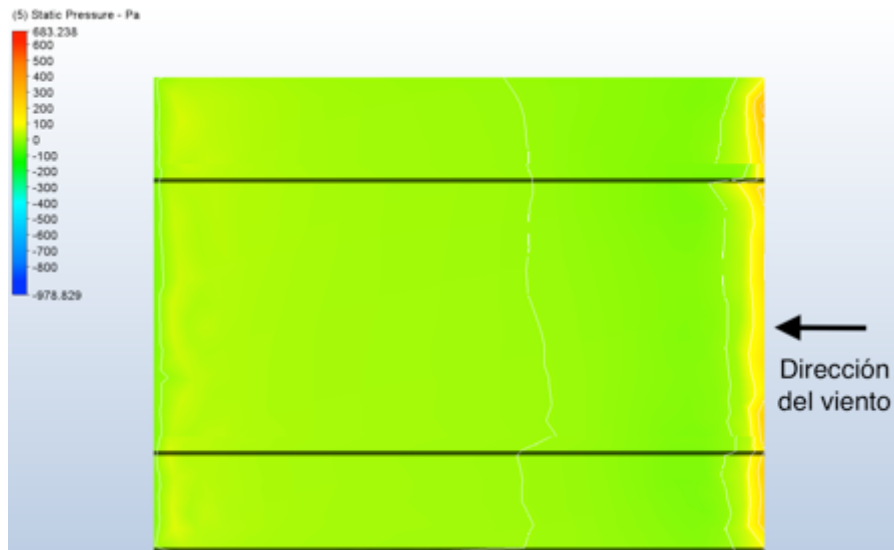


Figura 36. Presión medida en la superficie de los paneles para dirección de flujo 90° (vista posterior).

4.5. DIRECCIÓN DEL FLUJO A 135°

En las Figuras 37 y 38 se presentan los mapas de contorno para la estructura de estudio con dirección de viento a 135° . Se observa que en la cara frontal de la

estructura se presentaron presiones negativas (succiones) mientras que en la cara inferior se presentaron únicamente presiones positivas (empujes).

En la zona de barlovento de la cara posterior de la estructura se presentó el coeficiente de presión positivo (empuje) de mayor magnitud, dicha zona se encuentra entre el borde y el primer soporte metálico y tuvo una magnitud máxima $C_p = +1.20$, además se observa que los coeficientes de presión van decreciendo a lo largo del sentido paralelo al flujo hasta finalmente llegar a un valor negativo $C_p = -0.10$ en la esquina de sotavento.

Por otro lado, en la cara frontal (parte de arriba de los paneles) el coeficiente de presión negativo (succión) de mayor magnitud se presentó cerca de ambos bordes de barlovento de los paneles solares, con una magnitud $C_p = -0.90$, dichos coeficientes negativos van disminuyendo a lo largo del sentido paralelo al flujo hasta llegar a un valor mínimo de $C_p = -0.20$.

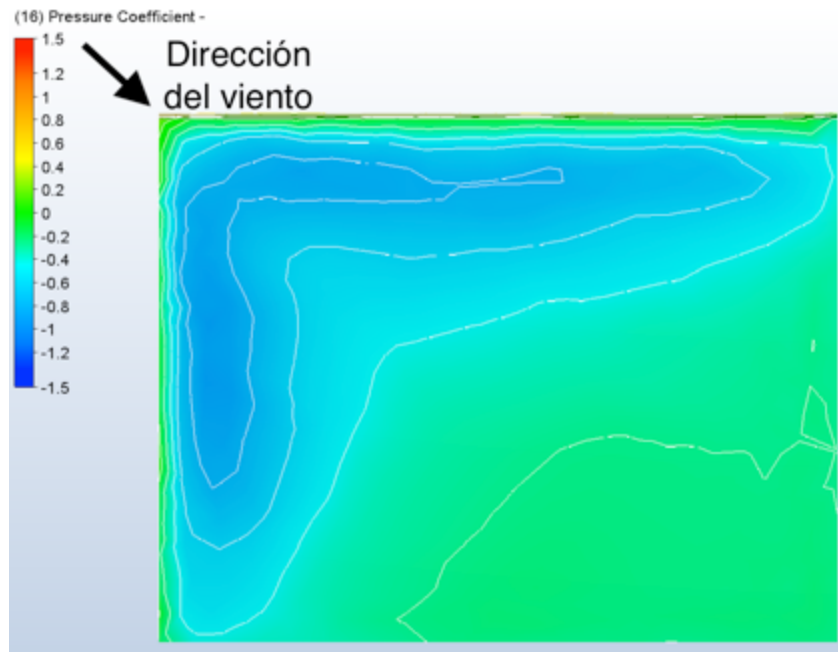


Figura 37. Coeficientes de presión para dirección de flujo 135° (Vista frontal)

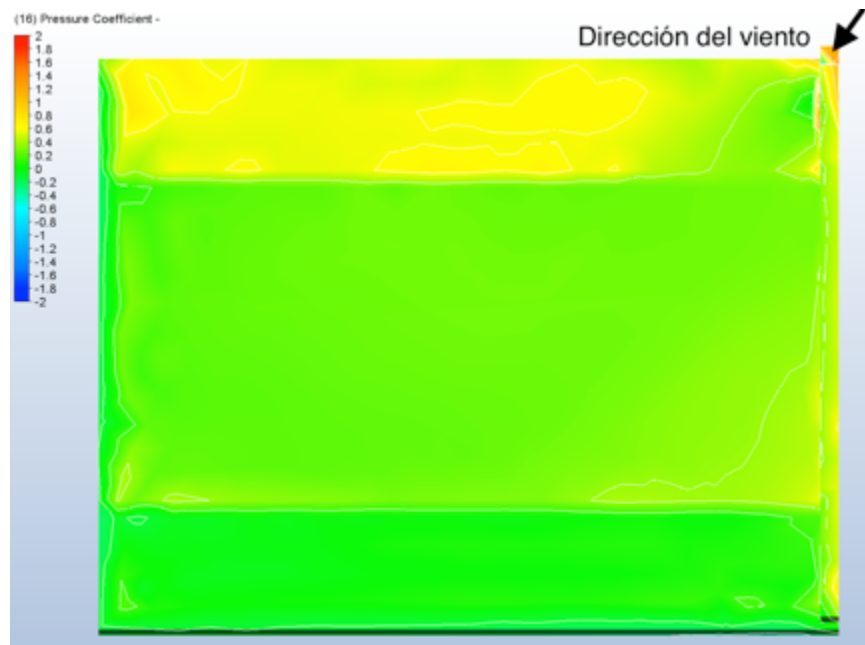


Figura 38. Coeficientes de presión para dirección de flujo 135° (Vista posterior)

En las Figuras 39 y 40 se observa la presión provocada por el viento sobre los paneles para la dirección 135°, la cual tiene una magnitud máxima neta de 560 Pa. Esta presión registrada fue la de mayor magnitud en todas las direcciones de estudio. Sin embargo, la resistencia de los paneles utilizados es de 4,500 Pa, por lo que es posible establecer que la integridad de los paneles solares no se ve comprometida por las presiones provocadas por el viento.

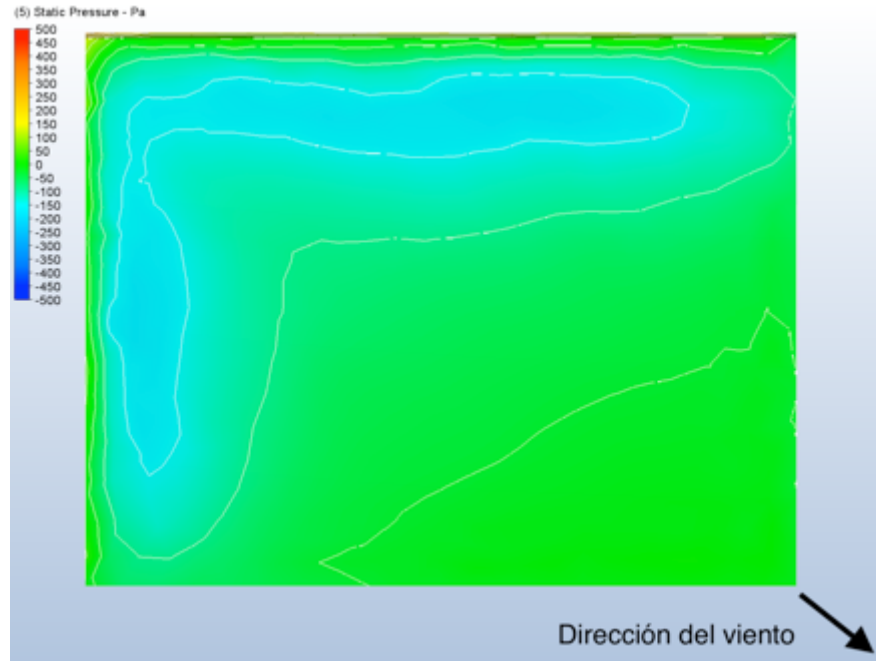


Figura 39. Presión medida en la superficie de los paneles para dirección de flujo 135° (vista frontal).

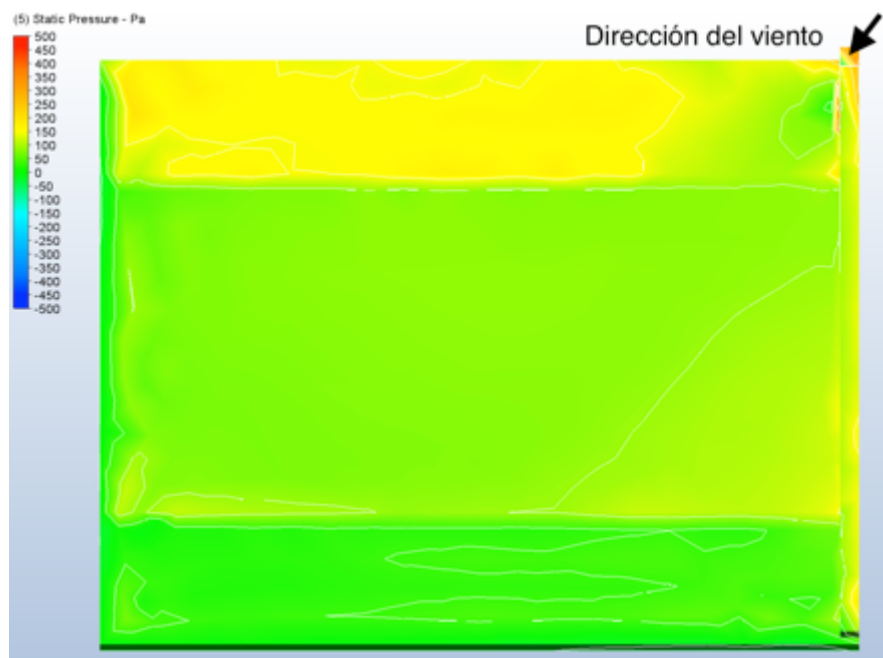


Figura 40. Presión medida en la superficie de los paneles para dirección de flujo 135° (vista posterior).

4.6. DIRECCIÓN DEL FLUJO A 180°

En las Figuras 41 y 42 se presentan los mapas de contorno para la estructura de estudio con dirección de viento a 180° (Figura 11). Se observa que en la cara frontal de la estructura se presentaron presiones negativas (succiones) mientras que en la cara inferior se presentaron únicamente presiones positivas (empujes).

El coeficiente de presión positivo (empuje) de mayor magnitud se presentó cerca del borde de barlovento en la cara inferior de la estructura, con una magnitud $C_p = +1.10$, además se observa que los coeficientes de presión van decreciendo a lo largo del sentido paralelo al flujo hasta finalmente llegar a presiones negativas con un $C_p = -0.20$.

Por otro lado, el coeficiente de presión negativo (succión) de mayor magnitud se presentó cerca del borde de barlovento en la cara frontal de los paneles solares, con una magnitud $C_p = -1.20$. Además se observó que los coeficientes de presión disminuyen de magnitud en sentido paralelo al flujo de viento hasta llegar finalmente a $C_p = -0.30$ en el borde de sotavento.

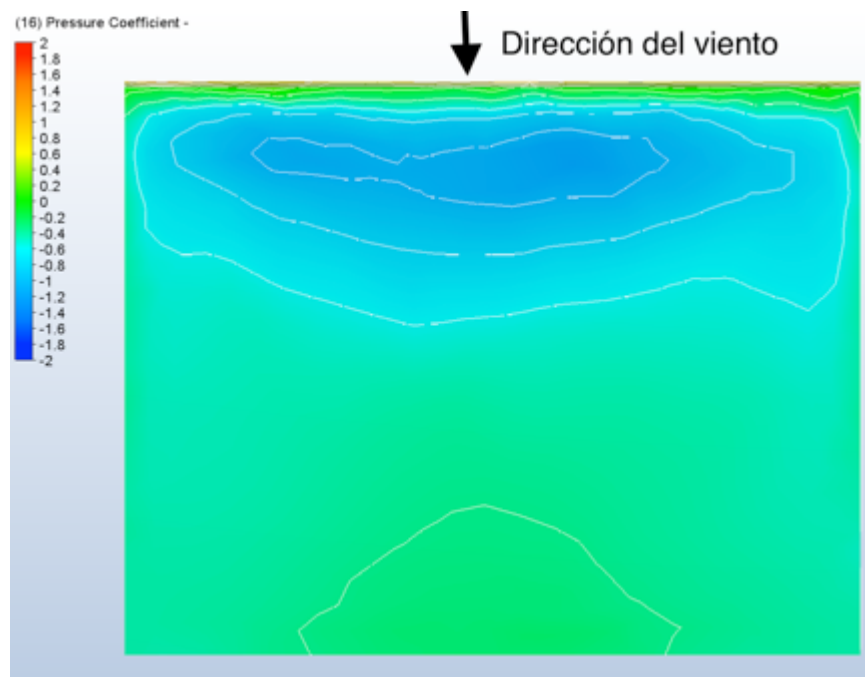


Figura 41. Coeficientes de presión para dirección de flujo 180° (Vista frontal)

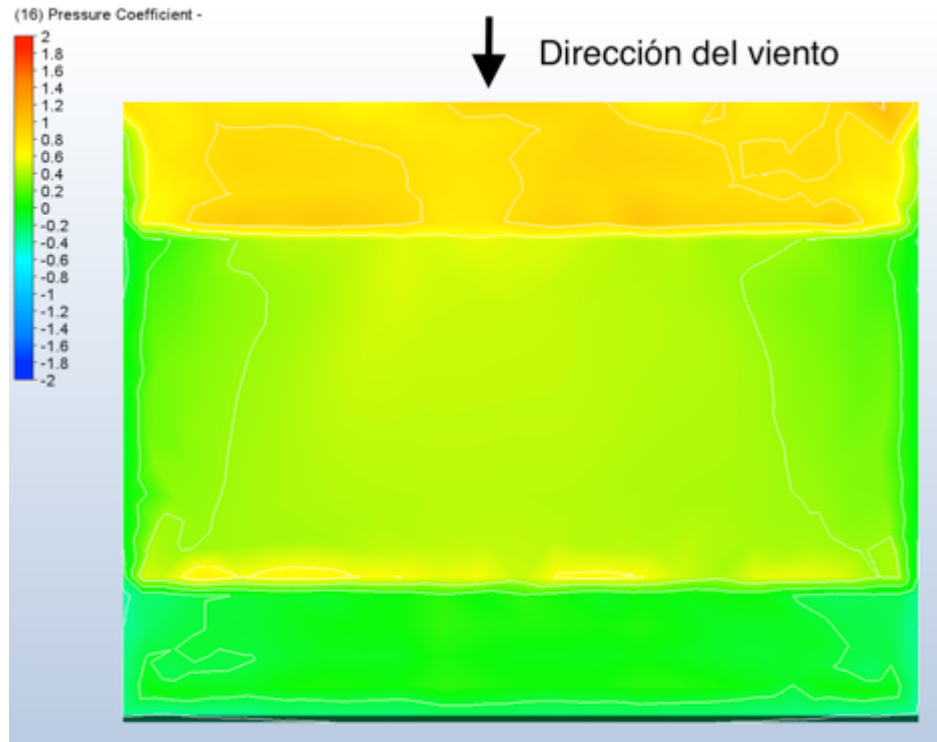


Figura 42. Coeficientes de presión para dirección de flujo 180° (Vista posterior)

En las Figuras 43 y 44 se observa la presión provocada por el viento sobre los paneles para la dirección 180°, la cual tiene una magnitud máxima neta de 480 Pa. Según el fabricante, la resistencia máxima para la marca y modelo utilizados es de 4,500 Pa, con lo cual se comprueba que para una tromba el panel no sufriría ningún daño.

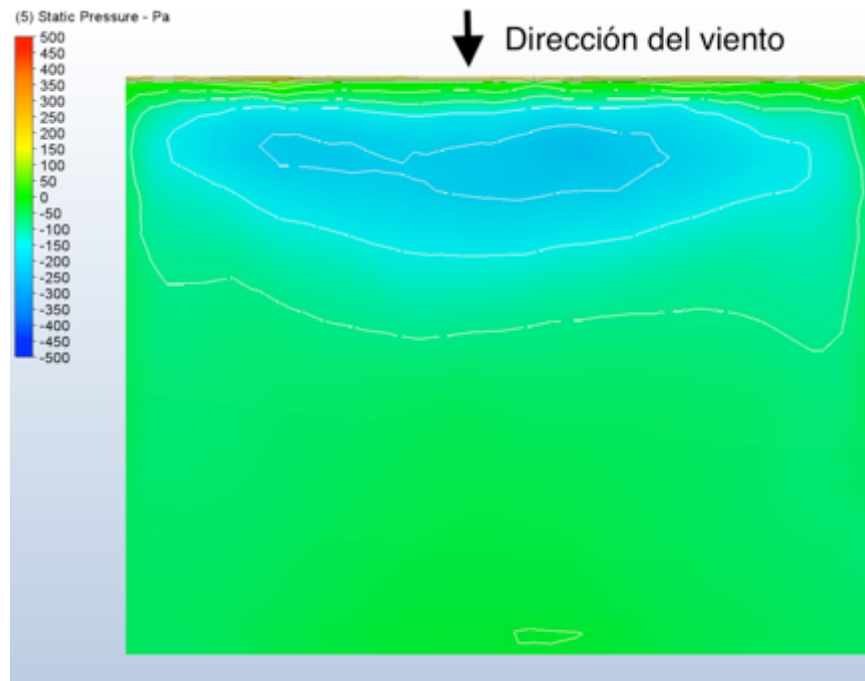


Figura 43. Presión medida en la superficie de los paneles para dirección de flujo 180° (vista frontal).

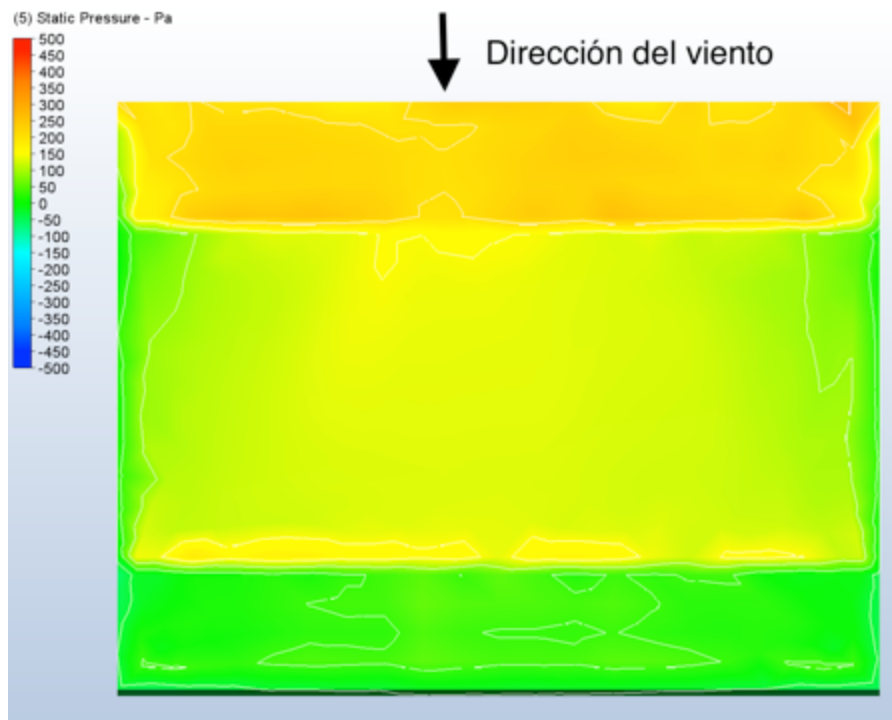


Figura 44. Presión medida en la superficie de los paneles para dirección de flujo 180° (vista posterior).

4.7. PROPUESTA DE COEFICIENTES DE PRESIÓN

En la sección anterior se presentaron los coeficientes de presión obtenidos en ambas caras (frontal y posterior) del modelo para cada una de las direcciones de viento en estudio. Sin embargo, dichos coeficientes de presión deberán transformarse en coeficientes de presión netos para compararse directamente con los presentados por CFE (MOCDV-CFE) y determinar si éstos podrían utilizarse para el diseño de los soportes metálicos o si deberán presentarse nuevos coeficientes de presión con base en los resultados del presente trabajo.

Para obtener los coeficientes de presión netos para cada una de las direcciones de viento estudiadas, se utilizó la ecuación 3:

$$C_{pp} = \frac{C_p * A_i}{A_t}$$

Donde:

C_{pp} es el coeficiente de presión promedio para un área tributaria determinada

C_p es el coeficiente de presión promedio en una de las superficies del modelo.

A_i es el área tributaria donde se aplica C_p para la misma superficie.

A_t es el área tributaria total

A continuación se presenta la propuesta de coeficientes de presión netos, generados a partir de los resultados obtenidos en la sección anterior. Dichos coeficientes netos representan la suma (o resta) de los coeficientes de presión promedio (C_{pp}) en la caras frontal y posterior del modelo según sea el caso.

4.7.1. DIRECCIÓN DEL FLUJO A 0°

En la Figura 45 se ilustra la distribución de los coeficientes de presión promedio netos sugeridos para la estructura de paneles solares, en dicha propuesta se obtuvieron coeficientes positivos debido a la inclinación del panel y al ángulo de incidencia del viento.

Los coeficientes a continuación presentados corresponden a la suma de los coeficientes de presión promedio registrados en las zonas para las cuales se establecen, tomando en cuenta los coeficientes obtenidos en ambas caras de la estructura (parte frontal y posterior de los paneles). Se dividió el modelo por zonas y se sumaron los coeficientes de presión promedio de cada zona como propuesta para la cara frontal de la estructura buscando la situación más desfavorable provocada por el viento. Además, se aprovechó la ubicación de los soportes metálicos y el eje de simetría de la estructura como ejes de referencia para determinar los cambios de coeficientes de presión.

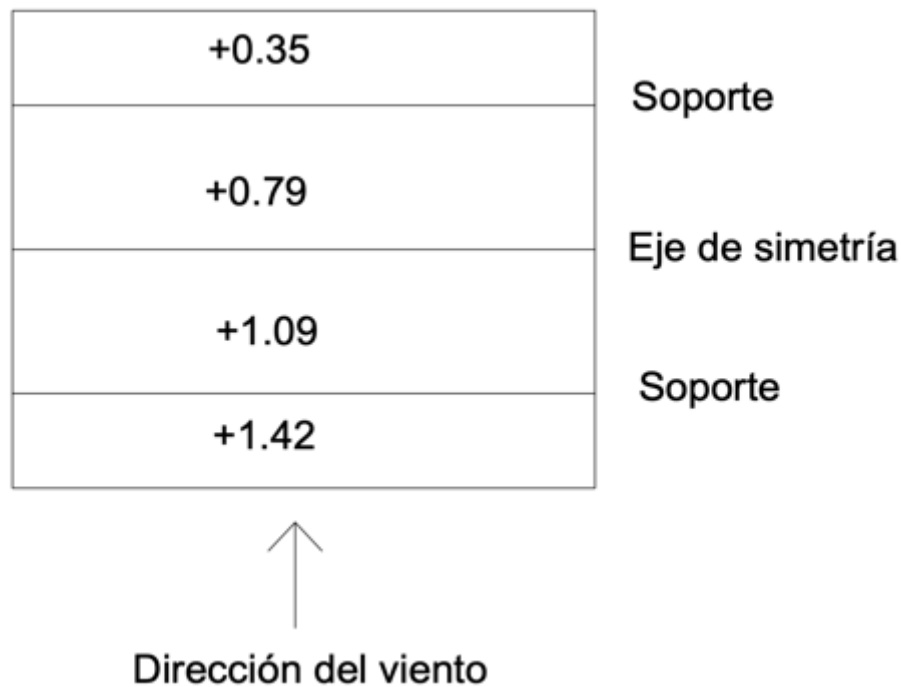


Figura 45. Coeficientes sugeridos para la parte superior del panel solar para una dirección de viento de 0° (Vista frontal).

4.7.2. DIRECCIÓN DEL FLUJO A 45°

En la Figura 46 se ilustra la distribución de los coeficientes de presión netos promedio sugeridos para la estructura de paneles solares, en dicha propuesta se obtuvieron coeficientes positivos debido a la inclinación del panel y al ángulo de incidencia del viento.

Los coeficientes a continuación presentados corresponden a la suma de los coeficientes de presión promedio registrados en las zonas para las cuales se establecen para ambas caras de la estructura (parte frontal y posterior de los paneles). Se dividió el modelo por zonas y se sumaron los coeficientes de presión promedio de cada zona como propuesta para la cara frontal de la estructura buscando la situación más desfavorable provocada por el viento. Además, se aprovechó la ubicación de los soportes metálicos y el eje de simetría de la estructura como ejes de referencia para determinar los cambios de coeficientes de presión.



Figura 46. Coeficientes sugeridos para la parte superior del panel solar para una dirección de viento de 45° (Vista frontal).

4.7.3. DIRECCIÓN DEL FLUJO A 90°

En la Figura 47 se ilustra la distribución de los coeficientes de presión netos promedio sugeridos para la estructura de paneles solares, en dicha propuesta se obtuvieron coeficientes positivos y negativos debido a la inclinación del panel y al ángulo de incidencia del viento.

Los coeficientes a continuación presentados corresponden a la resta de los coeficientes de presión promedio registrados en las zonas para las cuales se establecen para ambas caras de la estructura (parte frontal y posterior de los paneles). Se dividió el modelo por zonas y se restaron los coeficientes de presión promedio de cada zona como propuesta para la cara frontal de la estructura buscando la situación más desfavorable provocada por el viento. Nuevamente, se aprovechó la ubicación de los soportes metálicos y el eje de simetría de la estructura como ejes de referencia para determinar los cambios de coeficientes de presión.

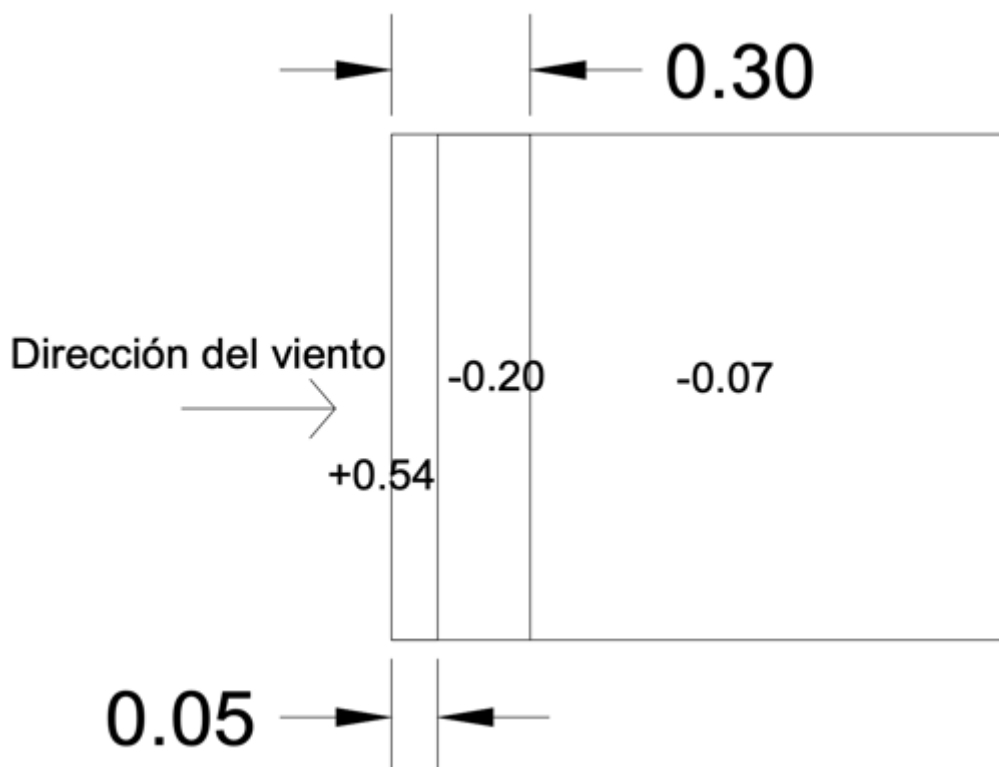


Figura 47. Coeficientes sugeridos para la parte superior del panel solar para una dirección de viento de 90° (Vista frontal).

4.7.4. DIRECCIÓN DEL FLUJO A 135°

En la Figura 48 se ilustra la distribución de los coeficientes de presión netos promedio sugeridos para la estructura de paneles solares, en dicha propuesta se

obtuvieron coeficientes negativos debido a la inclinación del panel y al ángulo de incidencia del viento.

Los coeficientes a continuación presentados corresponden a la suma de los coeficientes de presión promedio registrados en las zonas para las cuales se establecen para ambas caras de la estructura (parte frontal y posterior de los paneles). Se dividió el modelo por zonas y se sumaron los coeficientes de presión promedio de cada zona como propuesta para la cara frontal de la estructura buscando la situación más desfavorable provocada por el viento. Para este caso también se aprovechó la ubicación de los soportes metálicos y el eje de simetría de la estructura como ejes de referencia para determinar los cambios de coeficientes de presión.

Dirección del viento

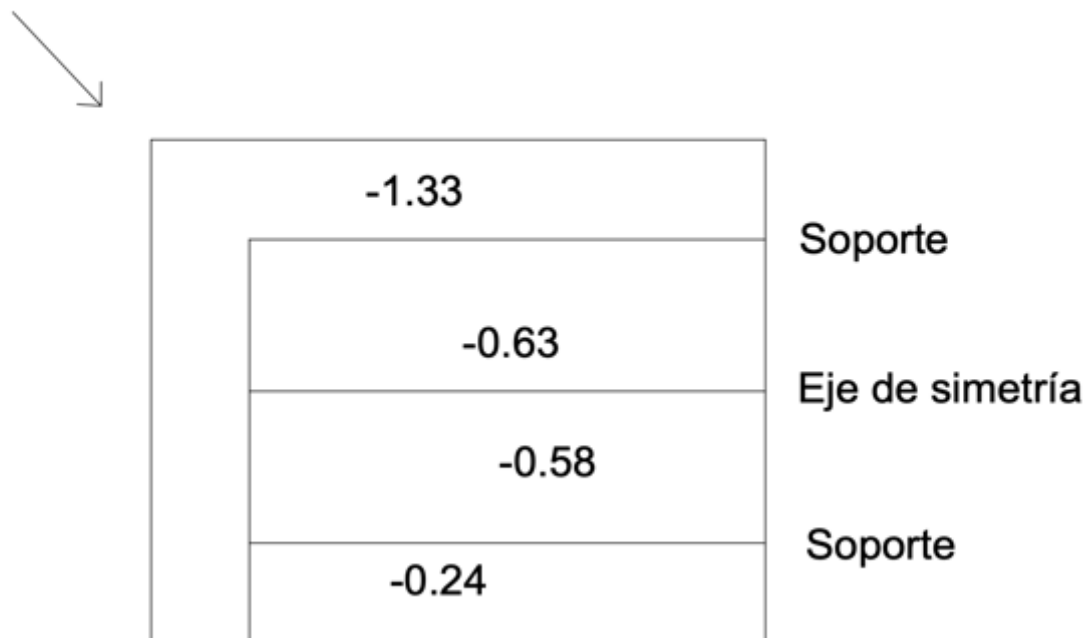


Figura 48. Coeficientes sugeridos para la parte superior del panel solar para una dirección de viento de 135° (Vista frontal).

4.7.5. DIRECCIÓN DEL FLUJO A 180°

En la Figura 49 se ilustra la distribución de los coeficientes de presión netos promedio sugeridos para la estructura de paneles solares, en dicha propuesta se

obtuvieron coeficientes negativos debido a la inclinación del panel y al ángulo de incidencia del viento.

Los coeficientes a continuación presentados corresponden a la suma de los coeficientes de presión promedio registrados en las zonas para las cuales se establecen para ambas caras de la estructura (parte frontal y posterior de los paneles). Se dividió el modelo por zonas y se sumaron los coeficientes de presión promedio de cada zona como propuesta para la cara frontal de la estructura buscando la situación más desfavorable provocada por el viento. Además, se aprovechó la ubicación de los soportes metálicos y el eje de simetría de la estructura como ejes de referencia para determinar los cambios de coeficientes de presión.

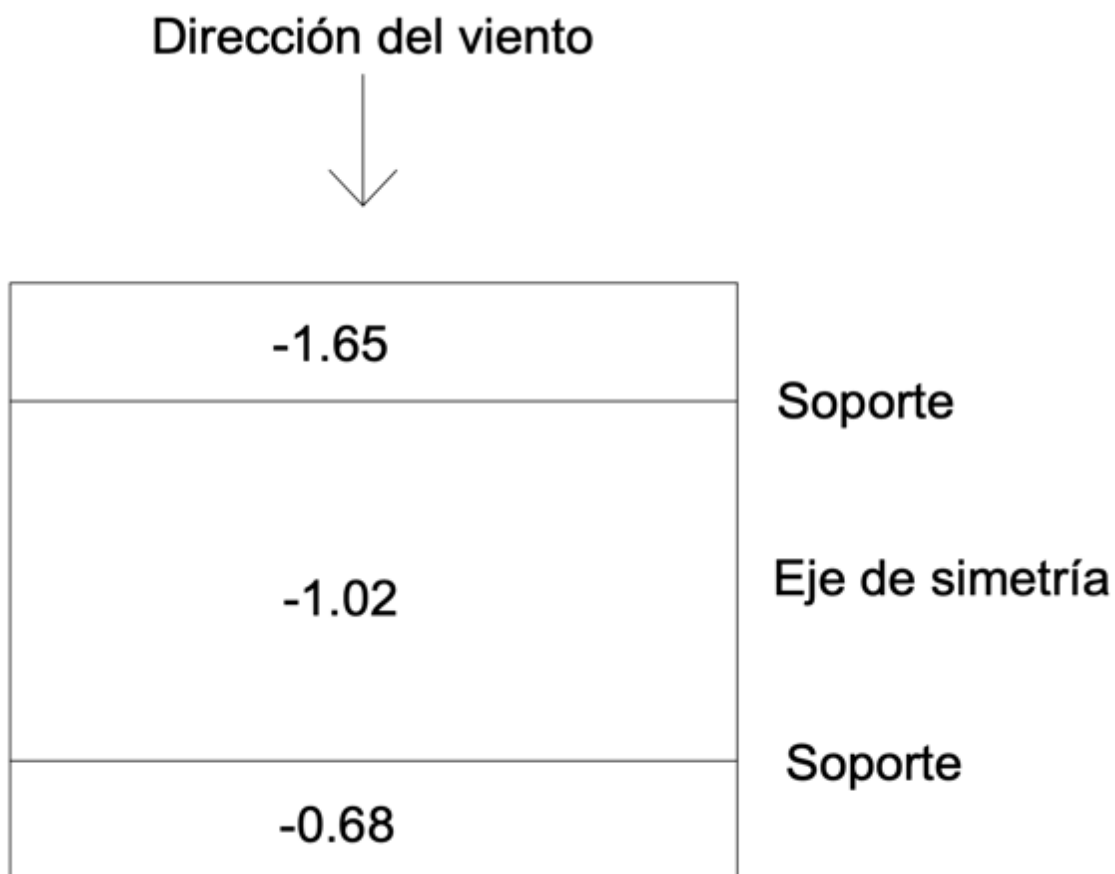


Figura 49. Coeficientes sugeridos para la parte superior del panel solar para una dirección de viento de 180° (Vista frontal).

4.8. COMPARACIONES CON REGLAMENTO CFE

En la Tabla 4 se presenta un resumen de los resultados de mayor magnitud obtenidos para cada una de las direcciones de viento de estudio sobre cada una de sus superficies.

Tabla 4. Resumen de resultados

Dirección de viento	Coefficiente Neto Máximo
0°	+1.42
45°	+0.96
90°	+0.54
135°	-1.33
180°	-1.65

Ya se ha mencionado previamente que MOCDV-CFE no contempla estructuras de paneles solares en su reglamento. Sin embargo, establece los criterios (coeficientes de presión) para techos aislados e inclinados con una pendiente que, por su forma, son estructuras similares a las estudiadas en este trabajo. Por lo tanto, es posible hacer una comparación entre ambas estructuras para establecer si los criterios que MOCDV-CFE plantea son válidos para el tipo de estructuras estudiadas en este trabajo.

A continuación se presentan (Figuras 50 y 51) los criterios establecidos por MOCDV-CFE para techos aislados e inclinados con una pendiente:

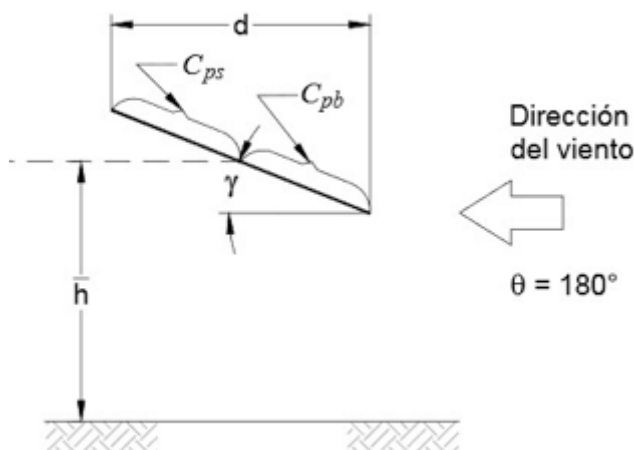


Figura 50. Criterio de techos inclinados con una pendiente (CFE, 2008)

Tabla 4.3.11(a) COEFICIENTE DE PRESIÓN NETA EN
TECHOS AISLADOS A UN AGUA PARA $0.25 \leq \bar{h}/d \leq 1$

Pendiente del techo (γ)	Ángulo (θ)	C_{pb}		C_{ps}	
		Libre debajo ⁽³⁾	Obstruido debajo ⁽⁴⁾	Libre debajo ⁽³⁾	Obstruido debajo ⁽⁴⁾
0°	0°	-0.3, 0.4	-1.0, 0.4	-0.4, 0.0	-0.8, 0.4
15°		-1.0, 0.0	-1.5, 0.0	-0.6, 0.0	-1.0, 0.2
30°		-2.2, 0.0	-2.7, 0.0	-1.1, -0.2	-1.3, 0.0
0°	180°	-0.3, 0.4	-1.0, 0.4	-0.4, 0.0	-0.8, 0.4
15°		0.0, 0.8	0.0, 0.8	0.0, 0.4	-0.2, 0.0
30°		0.0, 1.6	0.0, 1.6	0.0, 0.8	0.0, 0.0

NOTAS SOBRE LAS TABLAS 4.3.11 a 4.3.13:

1. Estas tablas se utilizan con ayuda de la Figura 4.3.10.
2. Con el fin de obtener valores intermedios para techos con pendientes diferentes a las indicadas, puede realizarse una interpolación lineal, la cual se llevará a cabo únicamente entre valores del mismo signo. Si no hay valores del mismo signo, se interpolará con un valor de cero.
3. "Libre debajo" significa que las mercancías o materiales almacenados bajo el techo bloquean menos del 50% del área de la sección transversal expuesta al viento.
4. "Obstruido debajo" significa que el 75% o más del área de la sección transversal se encuentra obstruida.
5. La interpolación lineal se permite para valores de obstrucción intermedios. La interpolación se realizará entre valores del mismo signo. Cuando no se tengan valores del mismo signo, la interpolación se realizará con un valor igual a cero.
6. En todos los casos de la Figura 4.3.10, cuando $\theta = 90^\circ$ se utilizará la Tabla 4.3.11(a) con $\gamma = 0^\circ$, excepto los que cumplen con las condiciones de la Tabla 4.3.11(b), siguiendo el mismo criterio de dividir el techo en dos mitades en las direcciones del viento

Figura 51. Coeficientes de presión neta en techos aislados con una pendiente (CFE, 2008)

De las figuras anteriores, es posible observar que dicho reglamento no establece una pendiente de techos inclinados igual a 20° (como es el caso del presente estudio); sin embargo, el reglamento menciona (Figura 51, inciso 2) que es posible hacer una interpolación lineal para obtener los valores intermedios.

Aplicando la interpolación lineal (Ecuación 2) para una inclinación de 20° con los criterios propuestos para techos inclinados entre 15° y 30° sin obstrucciones debajo y para direcciones de viento iguales a 0° y 180° se obtiene (Figura 52):

$$Y = \frac{X - X_1}{X_2 - X_1} (Y_2 - Y_1) + Y_1$$



Figura 52. Coeficientes de presión netos para techos inclinados con una pendiente igual a 20° según CFE

Previamente, en la Tabla 4 se establecieron los coeficientes de presión netos máximos obtenidos con CFD para cada una de las direcciones de viento estudiadas; es posible observar que para la dirección 0° se obtuvo un coeficiente de presión máximo de $+1.42$ mientras que para la dirección de viento igual a 180° el coeficiente de presión máximo fue de -1.65 .

Sin embargo, en la Figura 52 se observa que para el reglamento de MOCDV-CFE el coeficiente de presión máximo para la dirección de viento igual a 0° da como resultado $+1.06$ mientras que para la dirección de viento 180° , el coeficiente de presión máximo equivale a -1.39 .

Dicho lo anterior, es posible observar que hay una diferencia significativa (un 34% de diferencia para la dirección de 0° y alrededor de un 19% para 180°) entre los coeficientes de presión obtenidos en el presente estudio con CFD y los propuestos por MOCDV-CFE para techos inclinados con una pendiente.

Sin embargo, hay algunas consideraciones que tomar en cuenta para realizar la comparación planteada:

1. Los techos inclinados son mucho mas altos que las estructuras para paneles solares. Además, los techos (en general) tienen la posibilidad de colocar objetos debajo (los cuales se considerarían obstrucciones al viento).
2. MOCDV-CFE sólo establece los coeficientes de presión para 2 direcciones de viento (0° y 180°).
3. En su reglamento, MOCDV-CFE no establece una inclinación de los techos igual a 20° (como es el caso en este estudio), por lo que se hizo una interpolación lineal de los criterios para compararlos con los resultados del presente trabajo.

Dicho lo anterior, es posible observar que hay una diferencia significativa entre los coeficientes de presión obtenidos en el presente estudio con CFD y los propuestos por MOCDV-CFE para techos aislados e inclinados con una pendiente. Por lo tanto, los coeficientes propuestos en el reglamento de CFE no son válidos para el tipo de estructura estudiada en este caso, por lo que es necesario proponer nuevos coeficientes de presión de acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo.

4.9. PROPUESTA DE COEFICIENTES PARA REGLAMENTO

Ya se ha mencionado previamente que los reglamentos mexicanos (MOCDV-CFE) no contemplan este tipo de estructuras en sus coeficientes de presión. Posteriormente y con base en los resultados obtenidos en este trabajo se hicieron comparaciones con estructuras de formas similares (techos aislados e inclinados con una pendiente igual a 20°) encontrándose que los resultados de este trabajo y los coeficientes propuestos en el reglamento, difieren considerablemente (más del

30% de diferencia) por lo que los coeficientes propuestos por el reglamento no deberían ser utilizados para el diseño de estructuras con paneles solares.

Además en las secciones anteriores (Secciones 4.8.1 a 4.8.5) se propusieron coeficientes de presión netos sobre los paneles solares en cada una de las 5 direcciones de viento estudiadas en este trabajo.

Sin embargo, los diseñadores estructurales difícilmente sabrán o podrán establecer en que dirección va a soplar el viento por lo que a continuación se hace la propuesta de las dos direcciones de viento más desfavorables (con los coeficientes de presión de mayor magnitud). Dichas direcciones deberán ser revisadas para determinar las presiones que el viento provocaría sobre la estructura.

En las Figuras 53 y 54 se establecen los coeficientes de presión sugeridos para la revisión de los efectos del viento sobre la estructura de paneles solares. Dichos coeficientes de presión corresponden a los obtenidos para una dirección de viento igual a 0° y para la dirección 180° respectivamente.



Figura 53. Coeficientes sugeridos para una dirección de viento de 0° (Vista frontal).

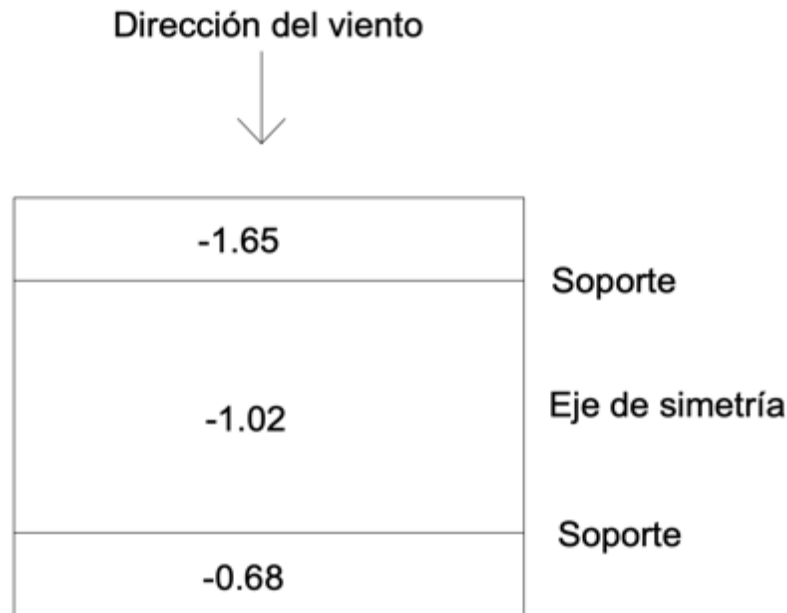


Figura 54. Coeficientes sugeridos para una dirección de viento de 180° (Vista frontal).

Los coeficientes previamente establecidos se basan en que, comparando la magnitud de los coeficientes obtenidos para las 5 direcciones de viento estudiadas, se observó que para esas 2 direcciones de viento, los coeficientes son mayores con respecto al resto de las direcciones.

El hecho de tener coeficientes de presión de mayor magnitud provocaría que las presiones obtenidas sean mayores a las calculadas para el resto de las direcciones de viento. Al tenerse presiones mayores, se estaría apostando a la seguridad e integridad de la estructura durante el dimensionamiento de los elementos puesto que el resultado del dimensionamiento arrojaría elementos más robustos.

Una vez definidos los coeficientes de presión de diseño sobre los paneles solares, se deberán utilizar estos valores para calcular las presiones que el viento puede provocar sobre la estructura (considerando otros parámetros establecidos en el reglamento como el factor de exposición de la estructura, factor de topografía, velocidades regionales de diseño, período de retorno, entre otras). Las presiones

obtenidas con los coeficientes aquí propuestos deberán ser transformadas a fuerzas y posteriormente dichas fuerzas deberán ser trasladadas a los soportes metálicos para el dimensionamiento de los mismos. Las fuerzas obtenidas deberán utilizarse también para el diseño de los sistemas de anclaje suelo-estructura, así como para el diseño de los sistemas de conexión panel-soporte.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo, se incluyen las conclusiones y recomendaciones de la investigación realizada sobre la modelación CFD para la obtención de los coeficientes de presión por acciones de viento. Se realizaron modelaciones utilizando el software CFD Motion para un modelo de panel solar inclinado 20° y soportado por una estructura metálica de 4 apoyos anclados a tierra. Se hicieron estudios para 5 direcciones de viento diferentes (0° , 45° , 90° , 135° y 180°). Se hicieron mediciones de presión para determinar si los paneles son capaces de soportar las presiones generadas por una tromba y se hicieron comparaciones con los coeficientes de presión establecidos en el reglamento de MOCDV-CFE para techos inclinados con una pendiente. Finalmente se propusieron los nuevos coeficientes de presión sobre la estructura que deberán ser utilizados para el diseño de los soportes metálicos.

5.1. CONCLUSIONES

- Durante el estudio se observó que la dirección de viento más desfavorable para la estructura (la que produjo mayores presiones) es la correspondiente a 0° y en segundo lugar la dirección de viento igual a 180° . Esto debido a que para estas dos direcciones de viento, la estructura en estudio posee la mayor cantidad de área de oposición al viento (área de bloqueo) generando mayores presiones y por consecuencia, coeficientes de presión mayores.
- Se observó también que el viento provocado por una tromba no produce las presiones suficientes para comprometer la integridad y el funcionamiento del panel solar, por lo que no hay problema si los paneles están sometidos a este tipo de eventos meteorológicos aleatorios.
- La influencia del soporte metálico en la distribución de presiones y en la obtención de coeficientes de presión juega un papel importante para 4 direcciones de viento (0° , 45° , 135° y 180°).

- Durante la comparación con el reglamento MOCDV-CFE, se obtuvo que los resultados del presente estudio difieren significativamente (más de un 30% entre ambos resultados) de los coeficientes de presión propuestos por el reglamento para techos inclinados con una pendiente, a pesar de ser estructuras con formas similares; por lo que los coeficientes de presión propuestos en dicho reglamento no son válidos para obtener las acciones sobre una estructura de paneles solares.
- En este trabajo se propusieron los coeficientes de presión que deberán ser utilizados para el diseño de los soportes metálicos. Para establecer dichos coeficientes se observó para qué direcciones de viento se produjeron los coeficientes de presión de mayor magnitud y se propusieron dichos coeficientes como coeficientes de diseño para el reglamento.
- Estudios previos han demostrado que el CFD es una herramienta confiable y económica para el estudio de efectos de viento sobre las estructuras y que los resultados obtenidos son adecuados para el diseño de las mismas.

5.2. RECOMENDACIONES

Para estudios de carácter computacional subsecuentes se recomienda estudiar el efecto de la distribución de presiones debida a la capa atmosférica (para terrenos planos, suburbanos y urbanos) ya que no fueron consideradas en el presente trabajo.

Además, se recomienda que los resultados obtenidos en este trabajo y en los subsecuentes sean corroborados con estudios en túnel de viento.

Dado a que las estructuras de paneles solares son dispositivos novedosos, se recomienda estudiar los coeficientes de presión para inclinaciones diferentes a 20° y en diferentes lugares de montaje (sobre edificios, anclados a muros, sobre postes, en arreglos de plantas de energía, etc.).

Como sabemos, los paneles solares son colocados a la intemperie para la captación de energía solar por lo que, además del viento, estará sometido a otros eventos meteorológicos los cuales no han sido estudiados en el presente trabajo.

Se recomienda, de igual forma, el estudio de los efectos que la lluvia, granizo y nieve pueden provocar sobre una estructura similar ya que son efectos meteorológicos adicionales a los que la estructura estará sometida durante su vida útil.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Abohela, I.; Hamza, N.; Dudek, S. (2012) Validating CFD Simulation results: wind flow around a surface mounted cube in a turbulent channel flow, Universidad de Newcastle, Reino Unido (UK).

Báez Díaz, A.; Pozos Estrada, A. (2017) Simulación numérica de los efectos del viento sobre un conjunto de paneles solares, Memorias del XXIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM, Cuernavaca, México

Ballesteros, R.; González, J.; Fernández J. M.; Argüelles, K. M.; (2003) Técnicas numéricas en mecánica de fluidos, Universidad de Oviedo, España.

Barajas, B; Castro, A.; Moreno, V.; (2012) Factibilidad de la implementación de una planta termosolar para la generación de energía eléctrica en Torreón, Coahuila, México; Universidad Autónoma de Coahuila; Coahuila, México.

Bitsuamlak, G. T.; Dagneu, A. K.; Erwin, J.; (2010) Evaluation of wind loads on solar panel modules using CFD, The fifth international symposium on computational wind engineering (CWE2010), Carolina del Norte, EUA

Cardoso da Silva, A. M.; (2013) Acção do vento em seguidores solares. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal.

Casey, M.; Wintergrete, T.; (2000) Best Practice Guidelines, ERCOFTA Special Interest Group on Quality and Trust in Industrial CFD, Bruselas: ERCOFTAC

Comisión Federal de Electricidad CFE. (2008) Manual de diseño de obra civiles, diseño por viento. México D.F.: Comisión Federal de Electricidad CFE.

Cosoiu, C., et al. (2008) Numerical and experimental investigation of wind induced pressures on a photovoltaic solar panel. Experimental Study, Algarve (Portugal): International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development (EEESD'08)

Puneeth Kumar, H. P.; Prakash, S. B. (2014) CFD Analysis of wind pressure over solar panels at different orientations of placement, International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science, Volume 2, Issue 7, Julio 2014, Karnataka, India

Liu, Y.; Dragomiresco, E.; (2014) Field measurements and CFD simulation for wind effect on PV solar panels mounted on flat roofs, The 2014 world congress on advances of civil, environmental and materials reserch (ACEM14), Busan, Korea.

López Llanusa, A.; Elena Parnás, V. B.; León Finalé, E. D.; (2014) Estudio de coeficientes de forma en paneles solares frente a la acción del viento, XVII Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, La Habana, Cuba.

Messeguer Ruiz, J.; Sanz Andrés, A.; Perales Perales, J. M.; Pindado Carrión, S. (2001) Aerodinámica civil: Cargas de viento en las edificaciones, Universidad politécnica de Madrid, Madrid, España.

Miller, R., Zimmerman, K.; (1981) Wind loads on flat-plate photovoltaic arrays fields (nonsteady winds). Reporte teórico, Seattle (EUA): Boeing Engineering and Construction.

Mohapatra, S; (2011) Wind tunnel investigation of wind load on a ground mounted photovoltaic tracker. Tesis de Maestría, Colorado (EUA): Universidad de Colorado.

Munson, Bruce R.; Young, Donald F.; Okiishi, Theodore H.; (2007) Fundamentos de mecánica de fluidos; Lamusa Walei, EUA.

Murphy, M.; (1980) Wind loading on tracking and field mounted solar collectors. Reporte Teórico, Colorado (EUA): Solar Energy Research Institute.

Nacer E. El Kadri E.; Abdelhakim, Chillali; (2017) Petrov-Galerkin formulation for compressible Euler and Navier-Stokes equations; Proceedings of International Conference on Applied Mathematics (ICAM'2017), Taza, Marruecos.

Pacheco Pacheco, A. (2012) Determinación de los coeficientes de presión externa en una estructura empleando la simulación CFD, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México

Pérez Pacheco, O. J. (2017) Obtención y validación de presiones medias sobre una estructura inflable mediante CFD, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México

Rojas, Héctor Duván López; (2006) Estimación de daños ocasionados por vientos huracanados sobre estructuras en Puerto Rico. Mayagüez: ProQuest Information.

Scaletchi, I., Visa, I., Velicu, I.; (2010) Modeling wind action on solar tracking PV platforms. Transilvania: Bulletin of the Transilvania University of Brasov.

Servicio Meteorológico Nacional SMN (2018) Etapas de evolución de un ciclón tropical; Servicio Meteorológico Nacional; Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/es/ciclones-tropicales/etapas-de-evolucion>, Recuperado el 13 de noviembre de 2018.

Simiu, E., Scanlan, R.; (1996) Wind effects on structures: fundamentals applications to design. USA: John Wiley & Sons.

Socket, H.; (1994) Wind-Excited Vibrations of Structures. Vienna: Springer-Verlag Wien.

Somekawa, D.; Taniguchi, T.; Taniike, Y.; (2013) Wind loads acting on PV panels and support structures with various layouts; The Eighth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Chennai, India.

Stathopoulos, T., Ch. Baniotopoulos.; (2007) Wind Effects on Buildings and Design of Wind-Sensitive Structures. Montreal: Springer-Verlag Wien.

Tamura, Y.; A. Kareem; (2013) Advanced Structural Wind Engineering. Shanghai: Springer Japan.

Teclé, A., G.T. Bitsuamlak, A.M.; (2013). Internal Pressure in a low-rise building with existing envelope openings and sudden breaching. Vol. 16. Ontario: Wind and structures.

Velicu, R., et al.; (2011) Wind loads on an azimuthal photovoltaic platform. Experimental Study, Granada, España.

Xypnitou, E.; (2012) Wind loads on solar panel systems attached to building roofs, Tesis de Maestría, Universidad Concordia, Montreal, Quebec, Canada

Zhang, Z.; Stathopoulos, T.; (2014) Wind load son solar panels mounted on flat rooftops: Progress and limitations; The 2014 World congress on Advances in civil, environmental, and materials research, Bussan, Korea.

Zhou, Y., et al.; (2001) Gust loading factor new model. Journal of Structural Engineering, 127:168-175 .

Zhou, Y., Kijewski, T. e Kareem, A.; (2002) Along-wind load effects on tall buildings: comparative study of major international codes and standards. *Journal of Structural Engineering*, 126(8):788-796 .

ANEXO A. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para la prueba de sensibilidad se utilizó el modelo de panel solar con soportes metálicos (Figura 10) anclados a tierra, el cual tiene una inclinación con respecto a la horizontal igual a 20° (Figura 12) y se probó con CFD para una dirección de viento a 0° (Figura 11).

La finalidad del presente análisis de sensibilidad consiste en la definición de 4 variables sumamente importantes para la obtención de la solución a las ecuaciones de gobierno por el método iterativo Petrov-Galerkin:

- Definición del tamaño de mallado sobre la estructura.
- Definición del tamaño de mallado en el fluido que rodea a la estructura.
- Definición del número mínimo de iteraciones para obtener los resultados (convergencia).
- Criterio de convergencia.

Para esto, se utilizaron los criterios mencionados previamente en las secciones 3.2.1, 3.2.2, 3.2.4 y 3.2.5 entre los cuales incluyen:

- Dominio Computacional
- Condiciones de frontera
- Propiedades del fluido
- Modelo de turbulencia
- Método Iterativo

Se establecieron 3 tamaños de mallado (Tabla A.1) y se hicieron pruebas de sensibilidad con 2000 iteraciones cada una para determinar cuál es el tamaño de malla más adecuado y la cantidad de iteraciones necesarias para encontrar la solución (convergencia) del presente estudio. Para comprobar los resultados obtenidos, se compararon con los coeficientes de presión obtenidos en pruebas con el Túnel de viento de la Facultad de Ingeniería (Apéndice B).

Tabla A.1 Especificaciones de malla en pruebas de sensibilidad

Tamaño de malla en la Estructura (unidades en metros)	Tamaño de Malla en el fluido (unidades en metros)
0.2	0.5
0.1	0.4
0.1	0.2

Como ejemplo, se presentan los resultados obtenidos para un mallado de 0.1 m sobre la estructura y 0.4 m en el fluido (Figura A.1).

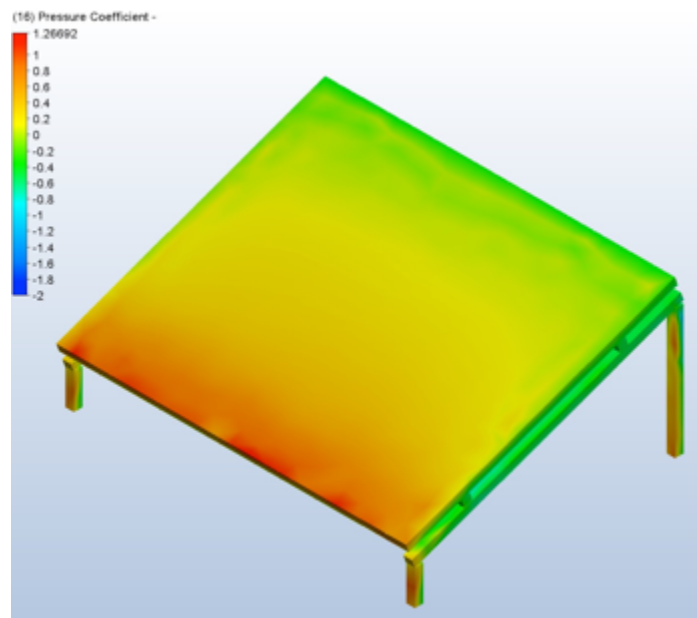


Figura A.1. Resultado de coeficientes de presión obtenidos con CFD

Como ya se mencionó previamente, para cada prueba se hicieron 2000 iteraciones y se observó que, para todas las simulaciones realizadas durante las pruebas de sensibilidad, la convergencia se alcanzaba antes de llegar a las 1000 iteraciones (en todos los casos) por lo que se eligió dicho valor para los estudios posteriores. (Figura A.2).

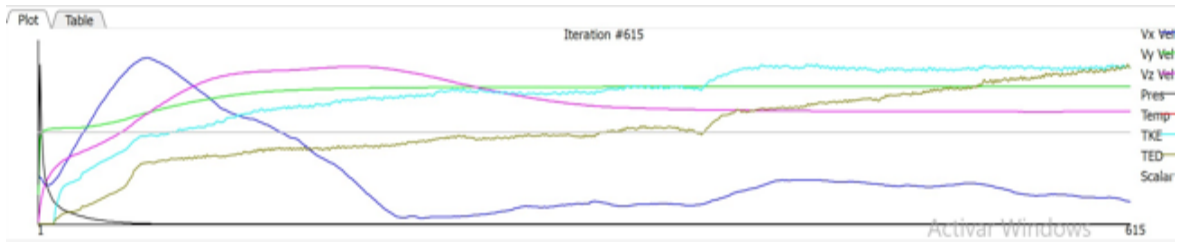


Figura A.2. Convergencia de resultados durante proceso iterativo

Finalmente, con base en cada una de las pruebas realizadas se llegó a las siguientes conclusiones:

- Para una malla de 0.2 m sobre la estructura y 0.5 m en el fluido, se observó que los coeficientes de presión varían significativamente (alrededor de un 50% de diferencias en promedio) con los resultados de las otras pruebas de sensibilidad y con los obtenidos en el túnel de viento por lo que este tamaño de malla fue descartado.
- Para un malla de 0.1 sobre la estructura y 0.2 m en el fluido se observó bastante concordancia (diferencias menores al 10% en promedio) con los coeficientes obtenidos en el túnel de viento, sin embargo, el costo computacional fue excesivo, por lo que igualmente este tamaño de malla fue descartado.
- Para un malla de 0.1 sobre la estructura y 0.4 m en el fluido, se observó buena concordancia (diferencias entre un 10% y 30% en promedio) con los coeficientes obtenidos en túnel de viento y con los resultados obtenidos para mallas más finas pero con un tiempo de prueba menor a comparación con el malla más fino, se consideró como el tamaño de malla adecuado para el presente trabajo.
- Una vez seleccionado el malla de 0.1m sobre la estructura y 0.4m en el fluido, se procedió a realizar 3 pruebas para determinar el criterio de convergencia para valores de 10^{-2} , 10^{-3} y 10^{-4} , observándose que únicamente se requerían más iteraciones para obtener la solución mientras más pequeño era el criterio de convergencia (aumentando entre 100 y 200 iteraciones en promedio mientras más pequeño era el criterio); sin

embargo, los resultados no varían significativamente (menos de un 10% de variación entre los criterios 10^{-3} y 10^{-4}) por lo que se decidió utilizar el valor promedio 10^{-3} para reducir el tiempo de prueba con base en la calidad de los resultados.

Finalmente, se estableció con el presente análisis de sensibilidad un mallado de 0.1 m sobre la estructura y 0.4 m en el fluido con 1000 iteraciones necesarias para la obtención de resultados adecuados y un criterio de convergencia de 10^{-3} .

ANEXO B. COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON CFD VS TÚNEL DE VIENTO.

A continuación se presentan las comparaciones entre los coeficientes de presión obtenidos en el presente trabajo (en la parte frontal del modelo) con los resultados de un ensaye realizado en el túnel de viento (TDV) de la Facultad de Ingeniería de la UADY para cada una de las direcciones de viento planteadas previamente.

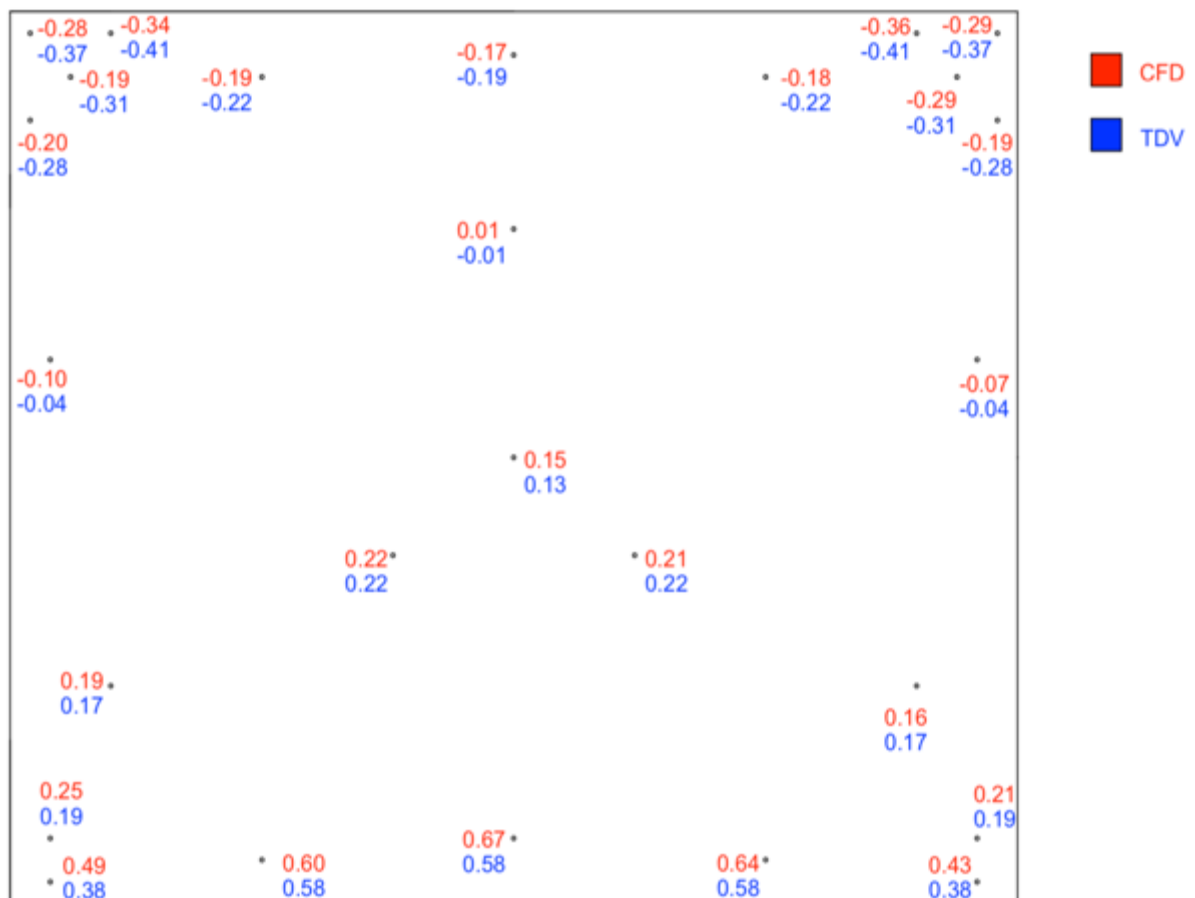


Figura B.1 Comparación de resultados TDV vs CFD, para una dirección de 0°.

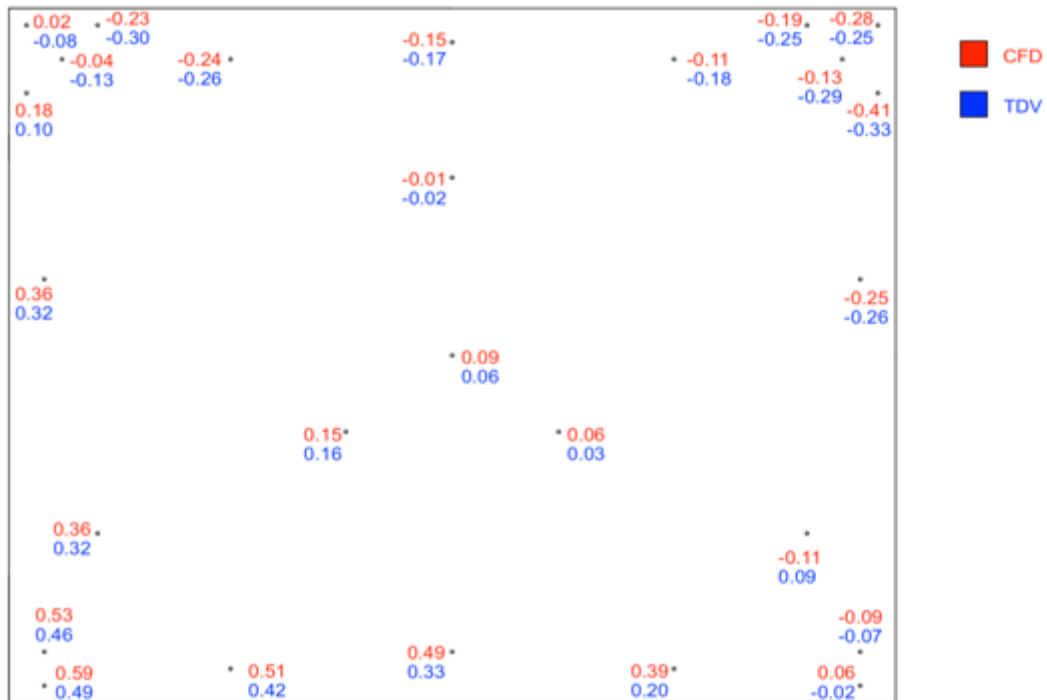


Figura B.2 Comparación de resultados TDV vs CFD, para una dirección de 45°

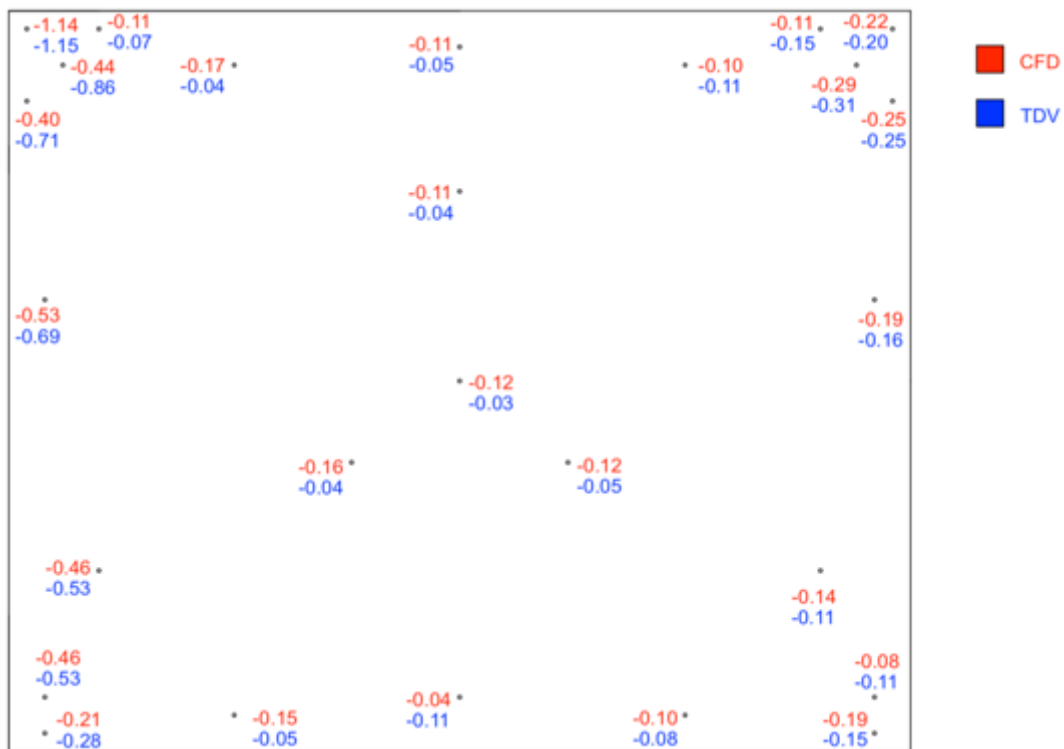


Figura B.3 Comparación de resultados TDV vs CFD, para una dirección de 90°

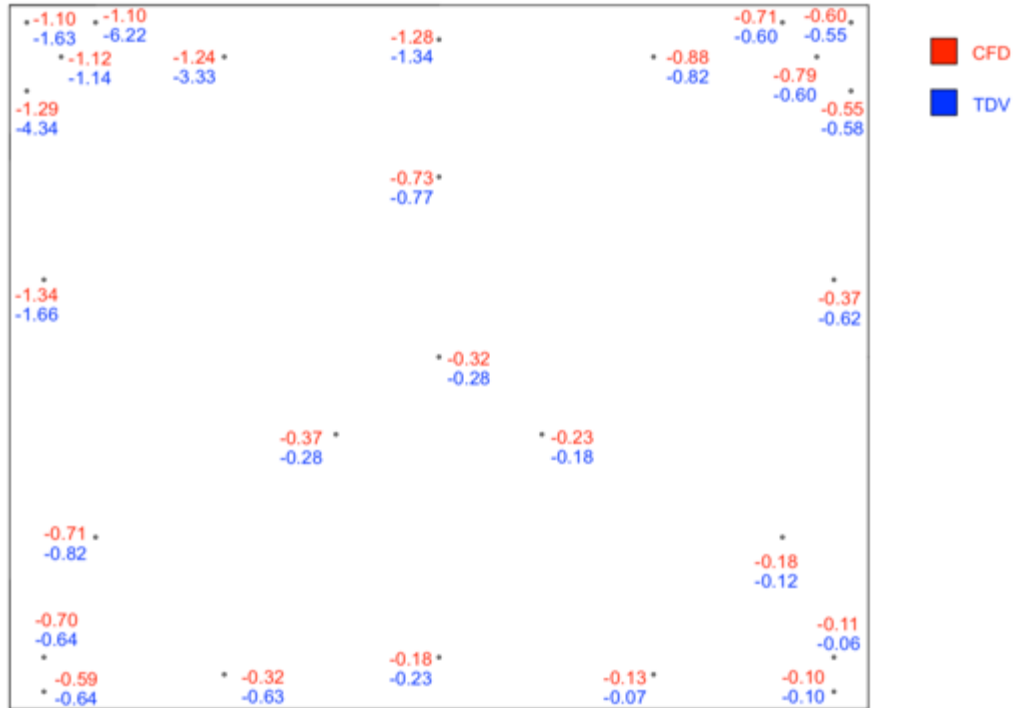


Figura B.4 Comparación de resultados TDV vs CFD, para una dirección de 135°

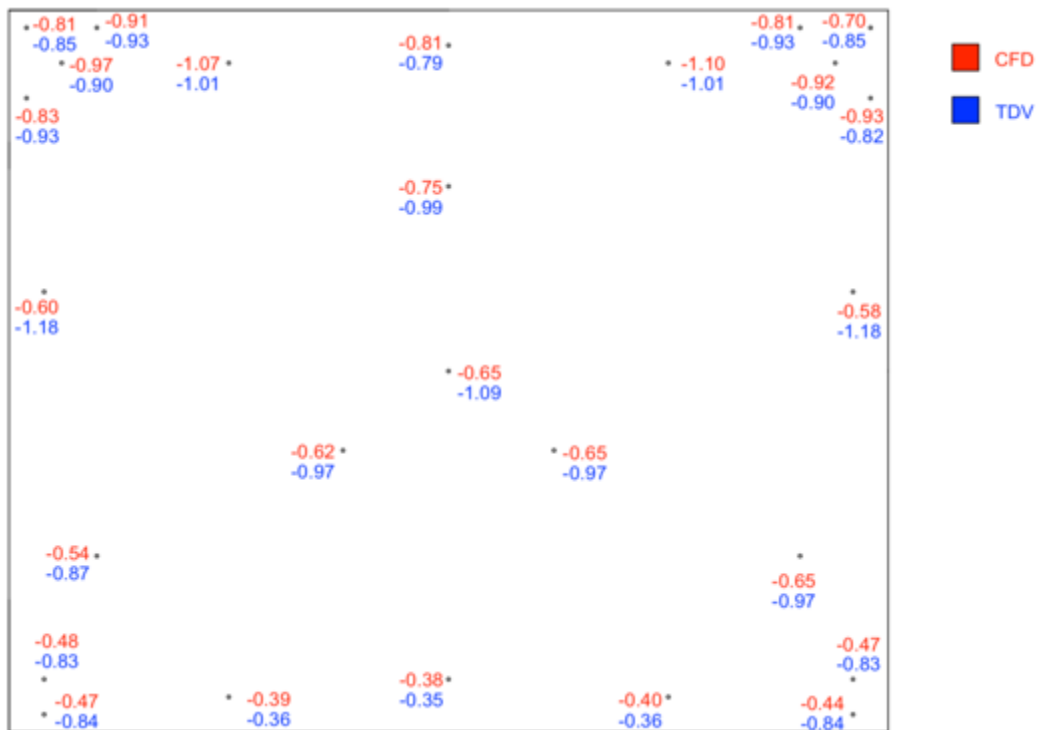


Figura B.5 Comparación de resultados TDV vs CFD, para una dirección de 180°

En las figuras anteriores (B.1-B.5) es posible observar que los resultados entre ambos métodos (experimental vs analítico) son aceptablemente similares, encontrándose diferencias entre ambos métodos de alrededor de ± 0.10 en la mayoría de los puntos de estudio para cualquiera de las direcciones de flujo.

Sin embargo, existen algunos puntos (en las direcciones de viento 90° , 135° y 180° principalmente) en los que la diferencia entre mediciones es significativa (con una diferencia mucho mayor al 100% entre ambos métodos); dichos puntos están ubicados generalmente en zonas cercanas a los bordes del panel solar donde ocurre el desprendimiento de la capa límite (provocando turbulencia debido a este fenómeno).

Las mayores diferencias entre ambos métodos se encontraron en la dirección de 135° en puntos cercanos al vértice de barlovento (debido al fenómeno de vórtices cónicos en vértices y aristas). Establecer con exactitud cuál es la causa de dichas diferencias entre ambos métodos resulta difícil, ya que éstas pudieron ser originadas por diversos factores y harían falta otras experimentaciones y simulaciones para justificarlas.

Pero según se observó, las mayores diferencias se presentaron en las zonas donde ocurrió el desprendimiento de la capa límite. Aunque en ambos métodos se origina turbulencia alrededor de los modelos, cada uno tiene metodologías diferentes para el cálculo de los coeficientes de presión.

Las diferencias mayores pueden explicarse debido a que la resolución numérica de las ecuaciones utilizadas por CFD (ecuaciones de Navier-Stokes) en un punto de desprendimiento del flujo, tienden a valores infinitos y los programas de cómputo (como el utilizado en este trabajo) compensan este problema requiriéndose un mayor refinamiento de las mallas en estas áreas para tener valores más cercanos a los reales. Éstas y otras diferencias son comentadas por Abohela et al. (2016), donde se realizó una comparación de coeficientes de presión de un cubo obtenidos mediante TDV y CFD.