



ANÁLISIS COMPARATIVO DE CARGAS DE VIENTO: EVALUACIÓN DE LA NORMA NSR-10
Y RESULTADOS NUMÉRICOS MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

JUAN JACOBO ORTEGA TOBÓN

Tesis de grado

Asesor

Juan Diego Jaramillo Fernández

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2024

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi madre, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido la base de mis logros. Su fe en mí ha sido una fuente de fortaleza y motivación.

A mi querida novia, cuyo amor y paciencia han sido mi refugio en los momentos de estrés y duda. Su comprensión y apoyo han sido fundamentales en este viaje.

Y finalmente, a mis tres gatas, cuya compañía ha sido un bálsamo para el estrés y la fatiga. Su presencia ha llenado de alegría los momentos más difíciles de este proceso.

Este logro no hubiera sido posible sin ustedes. Gracias por ser parte de mi vida y de este viaje.

CONTENIDO

0. INTRODUCCIÓN.....	pag.9
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	pag.11
2. JUSTIFICACIÓN.....	pag.12
3. OBJETIVOS.....	pag.13
3.1. GENERAL.....	pag.13
3.2. ESPECÍFICOS.....	pag.13
4. MARCO TEÓRICO.....	pag.14
4.1. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD).....	pag.14
4.2. TÚNEL DE VIENTO.....	pag.14
4.3. TEORÍA DE NAVIER STOKES.....	pag.15
4.4. PERFIL DE VELOCIDAD.....	pag.16
4.5. REQUISITOS NORMATIVOS Y LIMITACIONES.....	pag.18
4.5. CONDICIONES DE APLICACIÓN PARA EL MÉTODO SIMPLIFICADO EN LA NSR-10. pag.19	
4.6. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO POR EL MÉTODO SIMPLIFICADO.....	pag.20
4.7. MÉTODO ANALÍTICO EN LA NRS-10.....	pag.22
4.7.1. CONDICIONES PARA LA APLICACIÓN DEL MÉTODO.....	pag.22
4.7.2. PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DEL MÉTODO ANALÍTICO.....	pag.23
5. DISEÑO METODOLÓGICO O METODOLOGÍA.....	pag.24
5.4. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA ANALIZADA.....	pag.25
6. RESULTADOS.....	pag.27
7. CONCLUSIONES.....	pag.47
8. RECOMENDACIONES.....	pag.48
REFERENCIAS.....	pag.49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Valores de α y Z_g	pag. 7
Tabla 2 Factor de ajuste por altura del edificio y exposición	pag.21
Tabla 3 Parametrización para construcción de modelos	pag.25

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Perfiles de velocidad utilizados para cada región.	17
Figura 2 Zonas de amenaza eólica.	18
Figura 3 Presiones de viento de diseño.	20
Figura 4 Distribución de presiones para el método analítico	24
Figura 5 Modelo en Dublal RFEM.	26
Figura 6 Parámetros geométricos del dominio.	28
Figura 7 Presión por velocidad en cubiertas planas para zonas G y H.	29
Figura 8 Presión por velocidad en cubiertas planas para zonas E y F.	29
Figura 9 Presión por velocidad en fachada barlovento para zona A.	30
Figura 10 Presión por velocidad en fachada barlovento para zona C.	31
Figura 11. Presiones en cubiertas planas para zonas G y H para altura de 32m y velocidad de 28m/s.	31
Figura 12. Presiones en cubiertas planas para zonas E y F para altura de 32m y velocidad de 28m/s.	32
Figura 13. Contorno 3D de presiones en cubierta para altura de 32m y velocidad de 28 m/s.	32
Figura 14. Presiones en cubiertas planas para zonas G y H para altura de 16m y velocidad de 28m/s.	33
Figura 15. Presiones en cubiertas planas para zonas E y F para altura de 16m y velocidad de 28m/s.	33
Figura 16. Contorno 3D de presiones en cubierta para altura de 16m y velocidad de 28 m/s.	34
Figura 17. Presiones en fachada en barlovento para una altura de fachada de 32m, velocidad 28 m/s y en zona A.	36
Figura 18. Presiones en fachada en barlovento para una altura de fachada de 32m, velocidad 28 m/s y en zona C.	36
Figura 19. Contorno 3D de presiones en fachada a barlovento, apertura aproximada de 0.1° para altura 32m y velocidad de 28 m/s.	37
Figura 20. Presiones en fachada en barlovento para una altura de fachada de 16m, velocidad 28 m/s y En zona A.	38
Figura 21. Presiones en fachada en barlovento para una altura de fachada de 16m, velocidad 28 m/s y En zona C.	38
Figura 22. Contorno 3D de presiones en fachada a barlovento, apertura aproximada de 0.1° para altura 16m y velocidad de 28 m/s.	39
Figura 23. Presiones en fachada en sotavento para una altura de fachada de 32m, velocidad 28 m/s.	40
Figura 24. Contorno 3D de presiones en fachada en sotavento para altura de 32m y velocidad de 28 m/s.	40
Figura 25. Presiones en fachada en sotavento para una altura de fachada de 16m, velocidad 28 m/s.	41
Figura 26. Contorno 3D de presiones en fachada en sotavento para altura de 16m y velocidad de 28 m/s.	41
Figura 27. Presiones en fachada lateral izquierda para una altura de fachada de 32m, velocidad 28 m/s.	43

Figura 28. Contorno 3D de presiones en fachada lateral izquierda para altura de 32m y velocidad de 28 m/s.	43
Figura 29. Contorno 3D de presiones en fachada lateral izquierda, apertura aproximada de 0.1° para altura 32m y velocidad de 28 m/s.	44
Figura 30. Presiones en fachada lateral izquierda para una altura de fachada de 16m, velocidad 28 m/s.	44
Figura 31. Contorno 3D de presiones en fachada lateral izquierda para altura de 16m y velocidad de 28 m/s.	45
Figura 32. Contorno 3D de presiones en fachada lateral izquierda, apertura aproximada de 0.1° para altura 16m y velocidad de 28 m/s.	45

LISTA DE ECUACIONES

pág.

Ecuación 1 Velocidad promedio del viento.	16
Ecuación 2 Coeficiente de exposición.	16
Ecuación 3 Velocidad en términos de V_{mapa} .	16
Ecuación 4 Presión en una superficie.	21
Ecuación 5 Presión por velocidad.	23
Ecuación 6 Presiones generadas.	23
Ecuación 7 Valor de G.	24

LISTA DE SÍMBOLOS O VARIABLES

V_z	Velocidad promedio del viento a una altura Z .
Z	Altura sobre el piso.
Z_g	la zona donde el movimiento del fluido es perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto.
α	Coefficiente de la ley de potencia.
V_g	Velocidad del viento sobre la capa límite.
K_z	Coefficiente de exposición
V_{mapa}	Velocidad básica del viento
p_s	Presión neta (suma de presiones internas y externas).
λ	Factor de ajuste por altura y exposición.
I	Factor de importancia.
P_{s10}	Presión de viento para una altura equivalente a 10 metros perteneciente a una categoría B.
K_{zt}	Factor topográfico.
q_z	Presión por velocidad a una altura Z .
K_d	Factor de dirección del viento.
$q = q_z$	Presión para las caras a barlovento a una altura determinada.
$q_z = q_h$	Presión para las caras a sotavento, laterales y cubierta a una altura determinada.
$q_i = q_h$	para evaluar presiones internas positivas en edificios parcialmente cerrados, con alturas de la abertura más elevada del edificio que pueda afectar este valor de presión.
G	Factor de ráfaga definido por la NSR-10.
C_p	Coefficiente de presión externa definido por la NSR-10.
C_{pi}	Coefficiente de presión interna definido por la NSR-10.

Resumen

El objetivo de este trabajo es presentar y analizar los resultados obtenidos al realizar simulaciones computacionales de cargas que actúan sobre un sistema primario de resistencia al viento (SPRFV) comparando cargas de viento realizadas mediante dos métodos diferentes. El primer método corresponde al método simplificado, que se basa en la combinación de factores geográficos, características estructurales y determinados coeficientes de presión para proporcionar una evaluación rápida y simplificada de las cargas de viento que actúan sobre él. El segundo método corresponde al método analítico, el cual se basa en un método más complejo que toma en cuenta diversos factores y parámetros para calcular con mayor precisión y detalle la presión del viento, lo que permite una evaluación más precisa de la respuesta de la estructura a las cargas. del viento. Ambos métodos fueron desarrollados con base en los principios del Código Colombiano de Edificación Sismorresistente (NSR-10). Las conclusiones de este artículo destacan las diferencias obtenidas al comparar los métodos de dinámica de fluidos computacional con los dos métodos normativos mencionados.

Palabras clave: Cargas del viento, Coeficientes de presión, Factores geográficos, Mecánica de fluidos computacional, Método analítico, Método simplificado, Presión, Sistema principal resistente a la fuerza del viento (SPRFV)

0. INTRODUCCIÓN

La estimación precisa de la presión del viento sobre las estructuras es importante en el diseño y la construcción de edificios. La Norma Sísmica Colombiana NSR-10 proporciona un método analítico y un método simplificado para determinar estos esfuerzos, proporcionando un marco legal confiable para Colombia. Aunque los métodos analíticos se basan en modelos matemáticos detallados, los modelos simplificados pueden proporcionar predicciones rápidas. Ambos enfoques son esenciales para garantizar la integridad estructural y la eficiencia del diseño de edificios en el país [1].

El principal objetivo de este estudio es comparar la presión del viento obtenida utilizando los métodos analíticos y simplificados proporcionados en la Sección B.6 de NSR-10 con la presión del viento obtenida utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés).

Los métodos analíticos y simplificados se basan en relaciones numéricas y principios físicos simplificados para predecir la presión del viento. Los métodos analíticos utilizan modelos teóricos y ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos, como la ecuación simplificada de Navier-Stokes o la ecuación modificada de Bernoulli, para calcular las fuerzas ejercidas por el viento sobre la superficie de la estructura. Los métodos simplificados se basan en fórmulas empíricas y correlaciones derivadas de datos experimentales y observaciones de campo. Aunque los métodos analíticos pueden proporcionar resultados más precisos, los métodos simplificados son más rápidos y computacionalmente más baratos

La dinámica de fluidos computacional (CFD) se utiliza para predecir interacciones fluido-estructura. Este tipo de análisis numérico ayuda a predecir aproximadamente el flujo del fluido, la vorticidad, los cambios de presión y temperatura y otras consideraciones aerodinámicas necesarias para estudiar tales problemas [2].

La comparación entre las diferentes alternativas mencionadas se realizará a través del estudio de diferentes escenarios paisajísticos y tipos de construcción. Se analizarán la precisión, la eficiencia computacional y la practicidad de cada método. Además, se investigará el impacto de estas diferencias en el diseño del edificio y la integridad estructural.

El propósito de este estudio es contribuir al desarrollo del conocimiento sobre diseño estructural y evaluación del riesgo eólico en edificios y proporcionar información valiosa a ingenieros, arquitectos y otros profesionales involucrados en el diseño y construcción de estructuras seguras resistentes al viento.

En las siguientes secciones, se aplican los tres métodos descritos anteriormente para el análisis de tensiones, se comparan los resultados obtenidos y se discuten las razones de las grandes diferencias entre los tres métodos utilizados.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los métodos analítico y simplificado propuestos por la NSR-10, son fundamentales para estimar cargas de viento, estos a veces producen resultados diferentes cuando se aplican a la misma estructura [3]. La dinámica de fluidos computacional (CFD), por otro lado, ofrece un método más avanzado para calcular la presión del viento, pero su implementación puede resultar costosa en términos de recursos computacionales y tiempo de simulación.

Este documento realiza una comparación y evaluación las presiones de viento, las cuales son calculadas de acuerdo con la normativa NSR-10 y por otra parte las determinadas por CFD. EL propósito de este análisis es establecer la precisión y confiabilidad de los métodos existentes, y entender su impacto en el diseño y seguridad estructural de los edificios en Colombia. Por lo tanto, es esencial realizar esta comparación para identificar cualquier discrepancia entre los métodos. Estas discrepancias proporcionarán la base para futuras revisiones y ajustes en la normativa de diseño colombiana.

En conclusión, es esencial comparar las presiones del viento especificadas según NSR-10 con las obtenidas a través de CFD para garantizar la integridad estructural de los edificios en Colombia. Además, el propósito de este estudio es identificar las limitaciones de los enfoques actuales y proporcionar recomendaciones para mejorar los estándares de diseño y códigos de construcción en Colombia.

2. JUSTIFICACIÓN

Comparar la presión del viento con la presión obtenida utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) según el estándar visto en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) es importante para evaluar cuidadosamente los métodos de cálculo utilizados en el diseño de la estructura del edificio. La norma NSR-10 define los criterios para calcular estas tensiones, pero su uso puede verse limitado debido a simplificaciones y suposiciones que pueden afectar la precisión de los resultados [3]. En comparación, CFD proporciona un método avanzado para modelar el flujo del viento con más detalle y estimar la presión del viento sobre las estructuras con mayor precisión.

Una comparación de la presión del viento calculada según el estándar visto en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) con la presión del viento determinada mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) es necesaria para saber las diferencias y evaluar la confiabilidad de los métodos de cálculo existentes. además, no solo se mejoraría tanto los estándares de diseño como los sistemas de construcción del país para asegurar la integridad estructural de edificios, sino que también generaría una mejora del estado del conocimiento en ingeniería civil en cuanto a cómo se entienden los efectos del flujo del aire en el diseño estructural.

3. OBJETIVOS

3.1.GENERAL

Evaluar y comparar la presión del viento en estructuras de edificios de mediana altura calculada mediante el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 determinando la presión del viento mediante el uso de dinámica de fluidos computacional (CFD) con el fin de analizar la precisión, eficiencia y alcance de los métodos de cálculo existentes.

3.2.ESPECÍFICOS

- Determinar las presiones de viento sobre edificios de mediana altura según las especificaciones establecidas por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) para diferentes condiciones climáticas y geográficas.
- Realizar simulaciones mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) con el fin de calcular las presiones de viento sobre estructuras de mediana altura, utilizando modelos numéricos mediante el software RWIND y RFEM.
- Comparar las presiones de viento obtenidas a través de los métodos de cálculo establecidos por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) con aquellas resultantes de las simulaciones CFD, identificando las posibles discrepancias y diferencias significativas entre ellos.
- Estudiar las causas de las discrepancias observadas entre las presiones de viento calculadas por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) y aquellas determinadas mediante CFD, considerando factores como la complejidad del terreno, la rugosidad superficial y otros aspectos relevantes.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) representa una rama importante dentro del ámbito de la dinámica de fluidos. Esta disciplina se dedica a resolver las complejas ecuaciones diferenciales parciales que describen el comportamiento del flujo de fluidos [4]. A través de iteraciones numéricas, la CFD avanza en el espacio y en el tiempo para calcular una solución aproximada del sistema de ecuaciones. Este proceso implica dividir el dominio de estudio en una malla computacional sobre la cual se discretizan las ecuaciones fundamentales del flujo. Luego, mediante métodos numéricos como el método de volúmenes finitos o el método de elementos finitos, se aplican algoritmos de resolución para calcular las propiedades del flujo en cada punto de la malla [5]. De esta manera, la CFD proporciona una herramienta poderosa para modelar y simular una amplia variedad de fenómenos fluidodinámicos, desde el flujo alrededor de vehículos y edificios hasta la circulación sanguínea en el cuerpo humano, permitiendo así obtener una descripción detallada y precisa del comportamiento de los fluidos en sistemas reales.

4.2. TÚNEL DE VIENTO

El túnel de viento para estructuras es una instalación que simula las condiciones de flujo de aire alrededor de una estructura física a escala reducida. Mediante el estudio de dichas condiciones es posible evaluar el comportamiento de la estructura frente a carga de viento y es una herramienta básica para el diseño y la optimización de la resistencia estructural ante dicho tipo de sollicitación. Sus ventajas son, entre otras, la capacidad de proporcionar datos precisos sobre las distribuciones de presiones y fuerzas sobre la estructura (que ayudan a realizar ajustes al diseño con el propósito de mejorar su rendimiento aerodinámico) y la capacidad de identificar problemas, como, por ejemplo, de vibración, resonancia o fatiga, que puedan afectar la integridad estructural en el largo plazo. De todas maneras, los túneles de viento tienen también sus limitaciones - por ejemplo, son costosos de construir, operar y mantener; ajustar consistentemente la escala y los efectos de borde es difícil y la simulación de condiciones extremas de viento (por ejemplo, viento en estado turbulento) es muy complicada.

La NSR-10 no indica explícitamente si los túneles de viento se pueden utilizar para realizar pruebas de carga. Sin embargo, en la NSR-10, se describen dos enfoques para asignar cargas de viento, a saber, el método simplificado y analítico. Ambos enfoques involucran una combinación de factores geográficos, características estructurales y coeficiente de presión. Aunque los métodos logran una buena aproximación de la carga de viento, los túneles de viento pueden simular mejor las condiciones reales. Por lo tanto, a pesar de no estar explícitamente mencionada en la NSR, es válido recurrir a la tecnología de túneles de viento para mejorar la precisión de los cálculos de carga de viento.

4.3. TEORÍA DE NAVIER STOKES

La teoría de Navier-Stokes es un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales que describen el movimiento de fluidos viscosos. Establecen relaciones, llamadas ecuaciones de Navier-Stokes, entre la velocidad del fluido, su presión, su densidad y su viscosidad, y permiten predecir cómo se comportará un fluido bajo ciertas condiciones y bajo la influencia de fuerzas externas, como, por ejemplo, bajo cargas de gravedad que la retiene en su sitio, o bajo una fuerza centrífuga hacia afuera. La teoría es fundamental en la mecánica de fluidos, que a su vez tiene aplicaciones muy amplias: desde la aerodinámica, pasando por la ingeniería de fluidos, hasta sectores como la climatología, la oceanografía y la modelización de sistemas complejos, como la atmósfera o los cuerpos planetarios.

La resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes está intrínsecamente relacionada con la comprensión y predicción del comportamiento de los fluidos en diversos contextos. Esta resolución es fundamental para prever cómo los líquidos y gases interactuarán con estructuras o sistemas diseñados para comportarse de una manera específica. Por lo tanto, es crucial en el diseño de estos sistemas, especialmente si interactúan con fluidos, como es el caso de un avión o un automóvil, una estación espacial o una estructura de concreto.

Para este caso de estudio, el software RWIND emplea una técnica llamada "descomposición de Reynolds". Las variables de flujo, como la velocidad y la presión, se descomponen en componentes promedio (averaged) y componentes fluctuantes. Esto permite aplicar las mismas ecuaciones gobernantes del movimiento del fluido con el promedio sirviendo para eliminar las pequeñas escalas, dejando un

conjunto modificado de ecuaciones que son mucho menos laboriosas computacionalmente de resolver. A estas ecuaciones se las conoce como "ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en Reynolds" (RANS) [6].

4.4.PERFIL DE VELOCIDAD

En el método de dinámica de fluidos computacional (CFD), los perfiles de viento son críticos dado que proporcionan información detallada sobre la velocidad, la dirección y otras características del movimiento del aire en una ubicación específica. Son imprescindibles para inicializar y calibrar simulaciones CFD de manera precisa, para que éstas puedan representar de manera precisa la interacción del flujo con estructuras cercanas y las condiciones ambientales. Además, los perfiles de viento son clave para la evaluación de la carga aerodinámica en edificios, puentes, torres, turbinas eólicas, vehículos y estructuras similares; ítem crítico para que los ingenieros de diseño puedan desarrollar estructuras más seguras y eficientes desde el punto de vista de la aerodinámica. En resumen, los perfiles de viento son críticos para la precisión y validez de las simulaciones CFD, permitiendo a los ingenieros y diseñadores comprender -y así diseñar- de mejor manera el comportamiento aerodinámico.

Para esto, nos basamos en la ecuación general escrita en [7] la cual se describe a continuación:

$$V_z = V_g * \left(\frac{Z}{Z_g}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (1)$$

Sabiendo que según el título B de la NSR-10, K_z puede calcularse como:

$$K_z = 2.01 \left(\frac{Z}{Z_g}\right)^{\frac{2}{\alpha}} \quad (2)$$

y considerando que la presión es proporcional a la velocidad al cuadrado, se llega al siguiente perfil de velocidad en términos de V_{mapa} :

$$V_z = \sqrt{2.01} \left(\frac{Z}{Z_g}\right)^{\frac{1}{\alpha}} V_{mapa} \quad (3)$$

Para el cálculo de los perfiles de velocidad se utilizaron los siguientes valores de α y Z_g :

Tabla 1. Valores de α y Z_g

Exposición	α	Z_g (m)
B	7.00	365.8
C	9.50	274.3
D	11.50	213.4

Fuente: Elaboración propia

Para este caso de estudio fueron utilizados los valores de la exposición D, a continuación, se presentan los perfiles de velocidad obtenidos a partir de la ecuación 3.

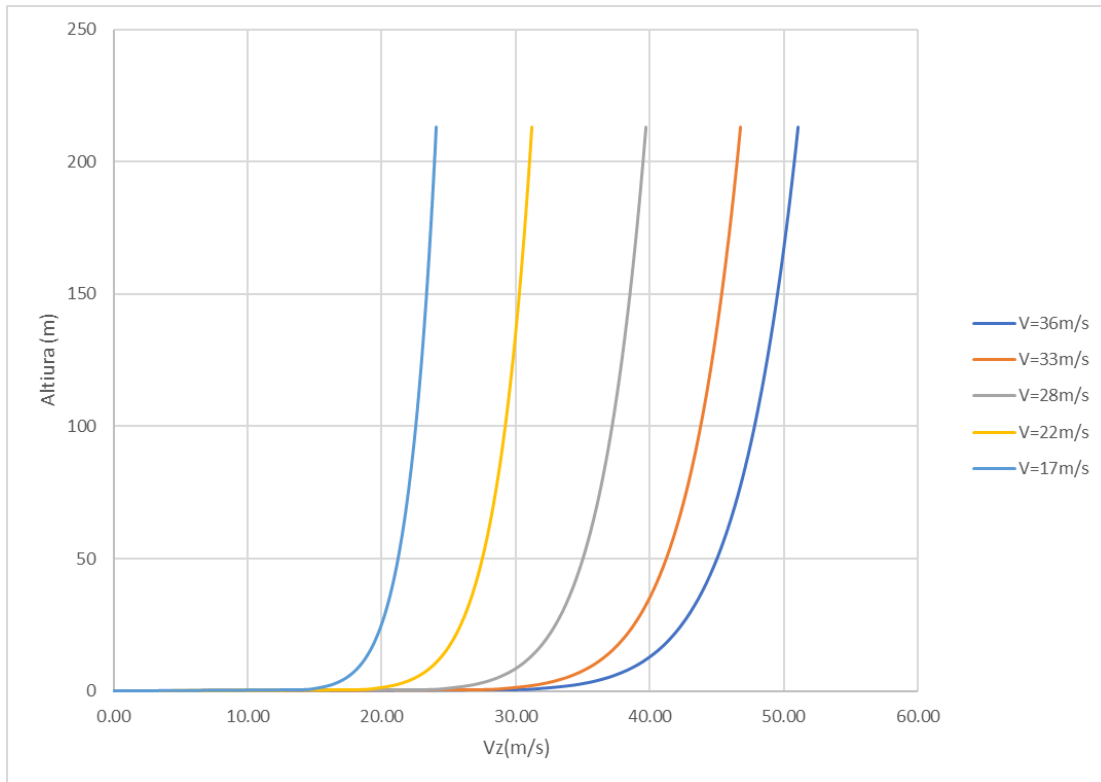


Figura 1. Perfiles de velocidad utilizados para cada región.

Fuente: Elaboración propia.

4.5. REQUISITOS NORMATIVOS Y LIMITACIONES

En general, los códigos de diseño plantean las mismas metodologías para el cálculo de las fuerzas del viento tanto en el SPRFV como en los componentes y revestimientos expuestos anteriormente. El objetivo de este apartado es presentar una breve explicación de los requisitos mencionados en la norma y un resumen del procedimiento de cálculo según la normativa NSR-10.

Es importante mencionar que las velocidades, mapa, utilizadas para realizar las evaluaciones de cargas de viento son obtenidas de la figura B.6.4-1 – Zonas de amenaza eólica:

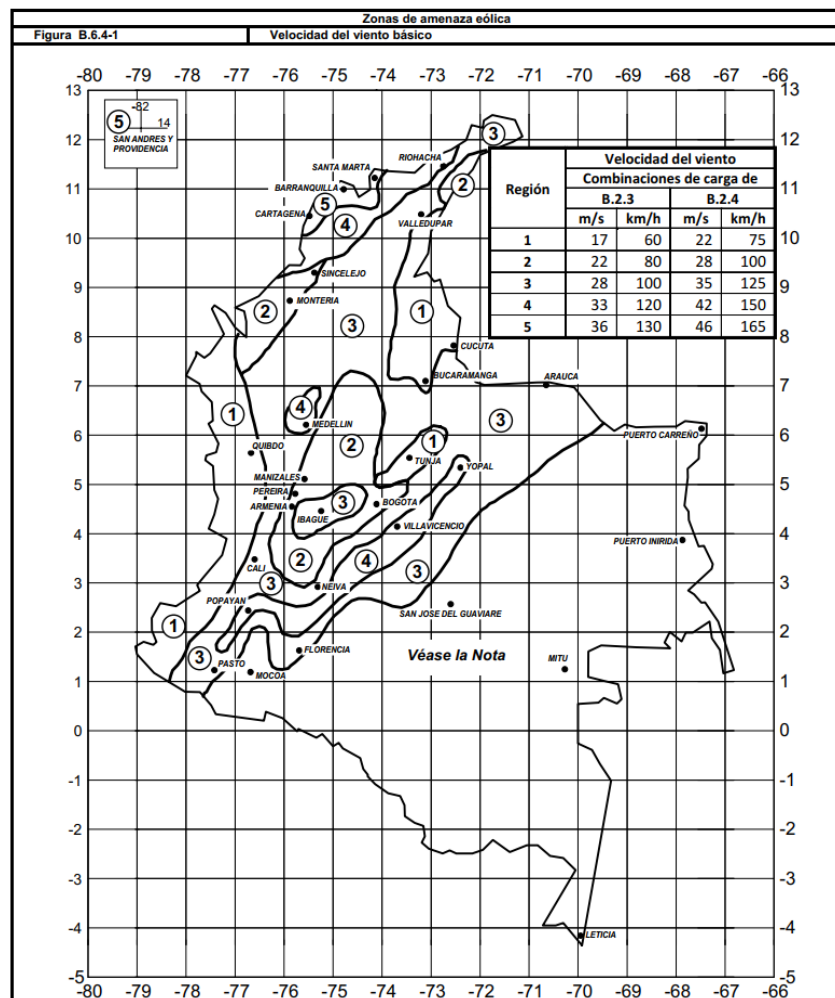


Figura 2. Zonas de amenaza eólica.

Fuente: Norma Colombiana Sismo Resistente NSR-10,” Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, República de Colombia, 2010.

4.5. CONDICIONES DE APLICACIÓN PARA EL MÉTODO SIMPLIFICADO EN LA NSR-10.

A continuación, se definen ciertos límites de aplicabilidad para los cuales es adecuado. Para el caso de la NSR-10, en el capítulo B.3.4.1.1 se indican los límites de aplicabilidad del Método Simplificado:

- La estructura debe contar con un diafragma simple, es decir, un diafragma que permita la transmisión directa de cargas a través de este al Sistema principal de resistencia a las fuerzas de viento (SPRFV).
- La normativa condiciona la altura del edificio mediante dos limitantes, diciendo que el método puede utilizarse siempre y cuando la altura de la estructura a analizar no sea mayor a 18 metros o que su altura no sea mayor a la menor dimensión del edificio.
- También, se hace referencia al porcentaje de aberturas contra cada una de las paredes que conforman el cerramiento de la estructura, estando restringido al 80%.
- Se limita la regularidad, por lo que debe ser un edificio que no presente ninguna irregularidad geométrica visible.
- No debe ser un edificio cuyo periodo sea mayor a 1 Hz.
- Se menciona también, que el edificio debe tener sección transversal aproximadamente simétrica y la cubierta debe ser plana, a dos o cuatro aguas con ángulo de inclinación menor o igual a 45°.
- Finalmente, según el capítulo B.6.4.2.1.1 – Presiones mínimas - se limitan las presiones en las distintas zonas mostradas a continuación:

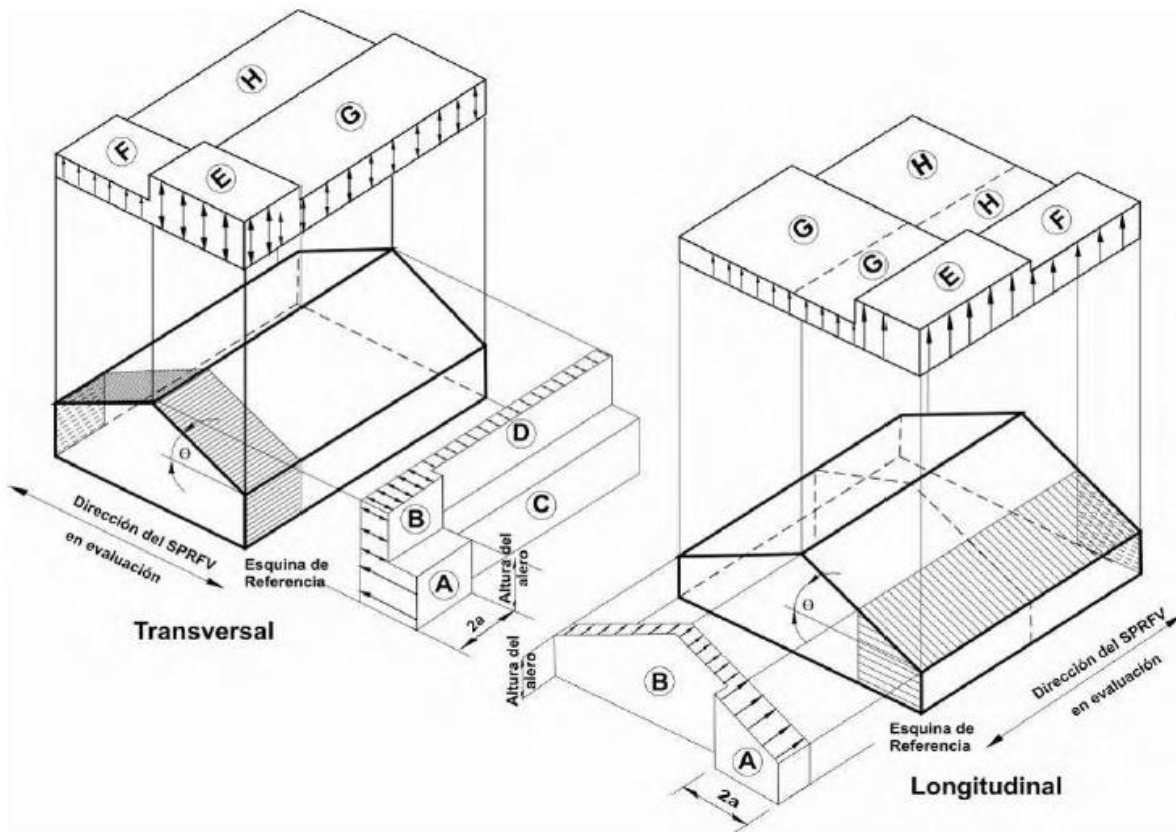


Figura 3. Presiones de viento de diseño.

Fuente: Norma Colombiana Sismo Resistente NSR-10,” Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, República de Colombia, 2010.

- Las presiones mínimas para las zonas A, B, C y D es de 0.40 kN/m² y para las zonas E, F, G y H las presiones mínimas se remontan a un valor de 0 kN/m².

4.6. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO POR EL MÉTODO SIMPLIFICADO

Este método se basa en el empleo de coeficientes de presiones ya tabulados y ecuaciones simplificadas. Estos coeficientes de presión se determinan en función de la forma y orientación de la estructura y son multiplicados por la presión dinámica del viento para dar lugar a la presión neta sobre la superficie expuesta de la estructura. Este enfoque proporciona una manera rápida y sencilla de estimar las cargas de viento sobre una estructura, por lo que es adecuado para análisis preliminares y diseño en la ingeniería estructural. Sin embargo, es importante hacer notar que este método simplificado podría no capturar

todos los efectos complicados del flujo del viento, por lo que se recomienda su uso con precaución y en combinación con otros métodos de análisis para asegurar una adecuada seguridad estructural.

En resumen, utilizando el método simplificado se podrá calcular la presión en una superficie dada utilizando:

$$p_s = \lambda K_{zt} I P_{s10} \quad (4)$$

De los parámetros requeridos en la ecuación (4), el factor de ajuste por altura y exposición λ , como lo dice su nombre, depende de la altura media de la estructura a analizar y de la categoría de exposición a la que pertenezca la misma y es importante resaltar que cuando el valor de la altura no se encuentra entre los valores presentados en la tabla 1 la NSR-10 permite realizar una interpolación lineal para obtener el valor de λ .

Altura Media del Edificio (m)	Exposición		
	B	C	D
4,5	1.00	1.21	1.47
6,0	1.00	1.29	1.55
7,5	1.00	1.35	1.61
9,0	1.00	1.40	1.66
10,5	1.05	1.45	1.70
12,0	1.09	1.49	1.74
13,5	1.12	1.53	1.78
15,0	1.16	1.56	1.81
16,5	1.19	1.59	1.84
18,0	1.22	1.62	1.87

Tabla 2. Factor de ajuste por altura del edificio y exposición.

Fuente: Comisión asesora permanente, «Reglamento colombiano de construcción sismo, NSR-10,» 2010.

En el Capítulo B.6 de la NSR-10, el factor K_{zt} es definido como el factor de modificación topográfica para la presión dinámica del viento. Se calcula a partir de la topografía local, incluyendo altura y rugosidad del terreno, así como otros detalles topográficos que afecten el flujo del viento alrededor de la estructura.

El factor K_{zt} se determina a través de tablas o gráficos suministrados en el código de construcción aplicable. Estos valores son seleccionados como resultado de la localización específica de la estructura y son entonces usados en los cálculos de diseño para ajustar cargas de viento transversales sobre la estructura tomando en cuenta la influencia de la topografía local. Este valor toma el valor de 1.00 cuando la topografía es completamente plana.

El factor o coeficiente de importancia, I , se define según el uso u ocupación que tendrá la estructura a evaluar, estos están definidos en la norma.

El valor de P_{s10} corresponde a un valor de presión para condiciones adversas o para una estructura que se encuentra en un bosque, con obstrucciones cercanas y con tamaño igual o mayor a la estructura de estudio.

4.7.MÉTODO ANALÍTICO EN LA NRS-10

4.7.1. CONDICIONES PARA LA APLICACIÓN DEL MÉTODO

Para este método que se encuentra mucho más desarrollado y atiende a más detalles que su contraparte, la normativa Colombia aun impone ciertas limitaciones:

- De nuevo se menciona que es necesario que la estructura sea regular geométricamente, esto indica que no podría utilizarse este método cuando se posean fachadas curvas o formas geométricas complejas.
- No considera el apantallamiento de estructuras vecinas o similares que puedan dar pie a generación de vórtices, inestabilidad debida al golpeteo o aleteo.

Es importante mencionar que esta metodología diferencia entre estructuras rígidas y flexibles mediante coeficientes para el cálculo del factor de ráfaga G el cual considera efectos de turbulencias por interacción viento-estructura y amplificación dinámica en estructuras flexibles, el cual puede encontrarse en **B.6.5.8**.

El método analítico de igual forma permite considerar diferentes direcciones de aplicación del viento. Para este trabajo se utilizará únicamente el viento en una dirección con el fin de simplificar el problema.

4.7.2. PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DEL MÉTODO ANALÍTICO

El método analítico es similar al método simplificado: es el enfoque utilizado para el cálculo de presiones de viento utilizando los principios teóricos de la mecánica de fluidos y la aerodinámica. Este método permite considerar factores como:

- El efecto de diferentes exposiciones.
- Los efectos de la topografía.
- La geometría de la estructura a analizar.

Debido a lo anterior y a su supuesta alta confiabilidad es el método más utilizado por oficinas de diseño para el cálculo de presiones de viento en cualquier tipo de estructura. Este procedimiento se basa en calcular diversos factores, dados por la propia normativa, para aplicarlos en la ecuación general para el cálculo de presiones dinámicas. La ecuación general es:

$$q_z = 0.613K_zK_{zt}K_dV_{mapa}^2I \quad (5)$$

Es importante destacar que la norma NSR-10 considera el valor de q_z para las caras en barlovento. Para el resto de las fachadas, se utiliza el valor q_h , que se calcula de la misma manera que q_z .

A partir de estas presiones dinámicas se aplican una serie de coeficientes los cuales consideran factores como las ráfagas y las presiones internas generadas, con el fin de poder realizar el cálculo de las fuerzas de diseño. La ecuación está dada por la ecuación B.5.12 de la NSR-10:

$$p = qGC_p - q_i(GC_{pi}) \quad (6)$$

En este caso, a diferencia del método simplificado, es posible encontrar presiones en las diferentes caras de una estructura (presiones laterales, barlovento y sotavento), analizada en una dirección a partir de la ecuación 6.

El factor de ráfaga G según la NSR-10 es un coeficiente que tiene en cuenta los efectos de ráfagas de viento en el diseño estructural de un edificio. Las ráfagas de viento, como su nombre lo indica, son cambios súbitos y temporales de la velocidad del viento que pueden afectar significativamente la carga sobre una estructura.

El factor de ráfaga G se utiliza para ajustar las cargas de viento en función de la probabilidad de que ocurran ráfagas de viento en el lugar, con el objeto de aumentarlas. Mientras mayor sea el valor de este, mayor es el efecto de las ráfagas de viento en el diseño estructural.

Este factor también diferencia entre las estructuras rígidas y flexibles ya que para estructuras rígidas se utiliza un valor de factor de ráfaga de 0.85 y para estructuras flexibles se calcula el valor de G según la ecuación 7:

$$G = 03925 * \left(\frac{1 + 1.7 * I_{\bar{z}} \sqrt{g_Q^2 * Q^2 + g_R^2 * R^2}}{1 + 1.7 * g_v * I_{\bar{z}}} \right) \quad (7)$$

Es importante mencionar que, si el factor de ráfaga es calculado mediante la ecuación 7, el factor de GC_{pi} en la ecuación 6 debe omitirse según la norma.

Los valores de las cargas de viento calculados por este enfoque se aplican en determinadas áreas de la estructura, concretamente en la cubierta, y esta distribución cambia en función del escenario de carga que se analice. A esto habría que añadir que la presión es diferente en función de la altura, siguiendo un perfil de velocidades potencial.

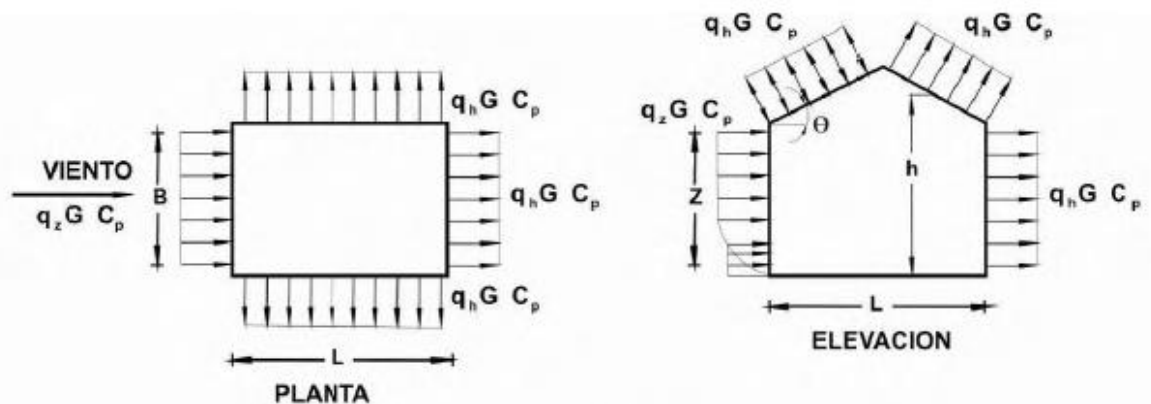


Figura 4. Distribución de presiones para el método analítico

Fuente: Comisión asesora permanente, «Reglamento colombiano de construcción sismo, NSR-10,» 2010.

5. DISEÑO METODOLÓGICO O METODOLOGÍA

En esta parte se ofrece una explicación de la estructura examinada a través de los tres métodos mencionados previamente. También, se muestran los resultados de los análisis realizados y los distintos requisitos normativos necesarios según el tipo de análisis presentado.

5.4. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA ANALIZADA

Para este documento se realizó el análisis de las tres diferentes metodologías a una estructura sólida (para simular una estructura cerrada), una estructura cuadrada de 60 metros de ancho por 60 metros de largo y teniendo esto en consideración, se llevó a cabo la elaboración de 5 modelos, cada uno para cada nivel de altura especificado., Lo que varía entre estos modelos es la región, lo que a su vez afecta la velocidad y el perfil de velocidades asociado. Se consideraron alturas de 16 y 32 metros. Estas alturas múltiples permiten una evaluación más completa y variada, proporcionando una visión detallada de cómo se comportan los modelos ante diferentes condiciones.

A continuación, en la tabla 2, se detallan los parámetros constantes utilizados al comparar el método analítico, el método simplificado y el CFD:

Método	Factor de importancia	Exposición	Topografía	Corrección en altura	Kd	Velocidad
Simplificado	Grupo de uso II factor I=1.00	D	Kzt=1.00	λ para Exp D	Na	Mapa
Analítico		D	Kzt=1.00	, $K_z: \alpha=11.5$, $Z_g=213.4$	1.00	Perfil con α, Z_g
CFD		Calibración	Geometría dominio	NA	Na	Perfil con α, Z_g

Tabla 3. Parametrización para construcción de modelos.

Fuente: Elaboración propia.

Mediante el uso de estos parámetros estandarizados, es posible llevar a cabo una evaluación sistemática y equilibrada de los diferentes métodos mencionados anteriormente. Mantener constantes estas variables asegura que cualquier diferencia observada se derive de las metodologías en sí y no de factores externos. Esta uniformidad en los criterios de comparación es crucial para entender y evaluar los pros y contras de cada técnica en relación con las demás.

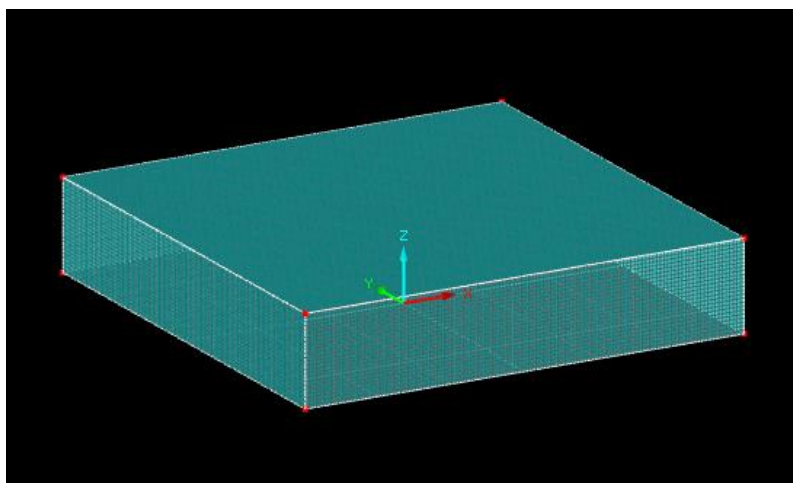


Figura 5. Modelo sólido en RFLAB.

Fuente: Elaboración propia.

Se ha evaluado la importancia del dominio en las simulaciones CFD, que comprende las condiciones de contorno y el espacio de simulación, siendo relevante para los valores obtenidos como resultado. Por lo tanto, dado que el dominio correctamente abordado, que investigación previa ofreció YANG, Tong [13], es crucial para obtener los resultados representativos y reales.

Resulta apropiado afirmar que, en este contexto, la combinación adecuada de herramientas robustas como RFLAB y RWIND, y la metodología adecuada son cruciales en la delimitación de análisis precisos y confiables. Estas herramientas y su mejora, así como la experiencia acumulada en la disciplina han hecho cada vez lograr resultados más realistas.

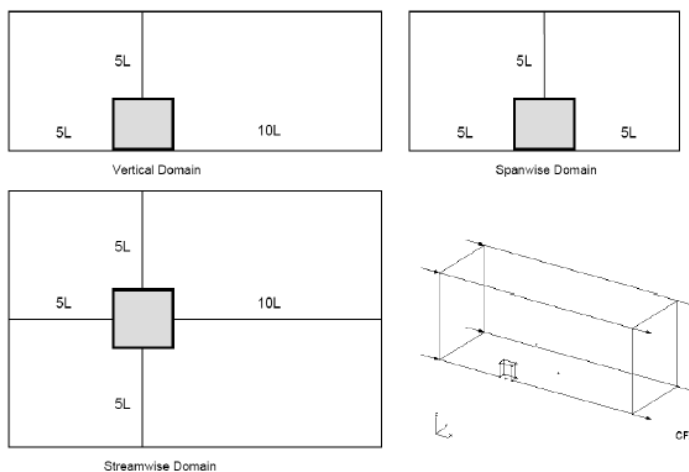


Figura 5. Parámetros geométricos del dominio.

Fuente: CFD and field testing of a naturally ventilated full-scale building.

De esta manera considerando los lados del modelo de 30 m, se obtienen las dimensiones: $X=450$ m, $Y=300$ m y $Z=150$ m.

En el proceso de modelado computacional, se diseñó la malla de modo que todas las superficies estuvieran subdivididas en elementos de dimensiones 50×50 . Dado que el modelo presenta una estructura plana y simétrica, se estima que esta configuración no introduce variaciones significativas en los resultados obtenidos. Es crucial resaltar la importancia de una malla bien definida, ya que influye directamente en la precisión y calidad de las simulaciones.

6. RESULTADOS

Como se mencionó anteriormente, se construyeron modelos de alturas de 16 y 32 metros con el fin de identificar una tendencia de los resultados.

Con el fin de realizar la comparación entre la normativa y la estimación por CFD, se analizó cada modelo con sus respectivas dimensiones y presiones para poder así realizar graficas donde se observen los resultados de cada uno de los métodos. Para los resultados obtenidos mediante el CFD se obtienen tres gráficas, una en la cual se presentan tres curvas, una correspondiente a los valores máximos, otra correspondiente a los valores mínimos y finalmente una curva en la que se observan los valores promedio. Adicionalmente, se presentan dos graficas que corresponden al contorno de presiones las cuales serán utilizadas para ver de una forma más clara el comportamiento de las presiones. Estas graficas fueron realizadas para presiones a barlovento, succiones en sotavento, succiones en fachadas laterales y succiones en cubierta.

Se considera necesario realizar una aclaración acerca de los resultados obtenidos y es que, el signo de las presiones obtenidas está ligado directamente al sistema de coordenadas globales del modelo presentadas en la figura 5, por lo que, por ejemplo, para la evaluación de las presiones en la fachada a barlovento, serán presiones positivas aquellas que se encuentren en dirección positiva al eje X y presiones negativas (o succiones) las que se encuentren en sentido contrario a la dirección positiva del eje X. Sin embargo, cuando se evalúan las presiones en la fachada a sotavento según los ejes globales del modelo se consideran positivas las succiones debido a que estas van en el mismo sentido que el eje X y se consideran

negativas las presiones debido a que estas se aplican en la cara de la fachada en sentido contrario al eje X.

6.4. PRESIÓN POR VELOCIDAD

La verificación de las presiones por velocidad es crucial precisamente por la relación de aumento de la presión del viento sobre una estructura en función de la velocidad. Esta relación es de especial importancia en el diseño de estructuras, ya que las cargas de viento pueden ser considerables y afectan la estabilidad y la seguridad de la estructura. Debido a esto se realizaron gráficas para verificar el normal comportamiento de las presiones calculadas mediante la normativa para presiones de cubierta tanto mínimas como máximas, presiones a barlovento, a sotavento y laterales.

Para las presiones de cubierta se evaluaron de manera separada las zonas E y F de las zonas G y H encontradas en la Figura 3. Adicionalmente, se presentan las gráficas para edificios menores a 16m con el fin de poder realizar la comparación entre los métodos propuestos por la normativa como se logrará evidenciar a continuación.

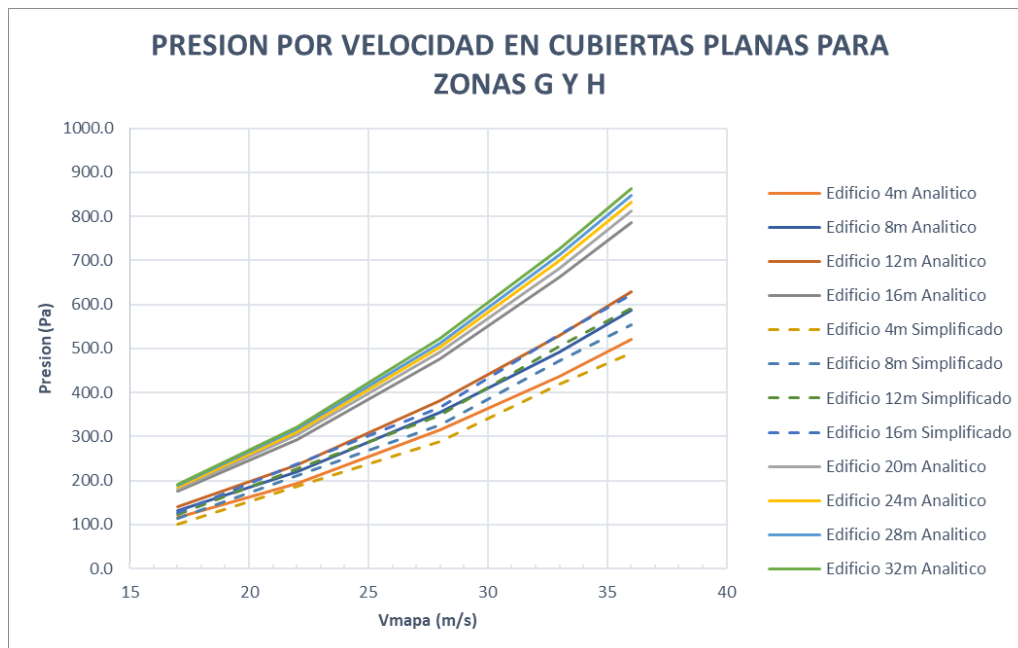


Figura 7. Presión por velocidad en cubiertas planas para zonas G y H.

Fuente: Elaboración propia.

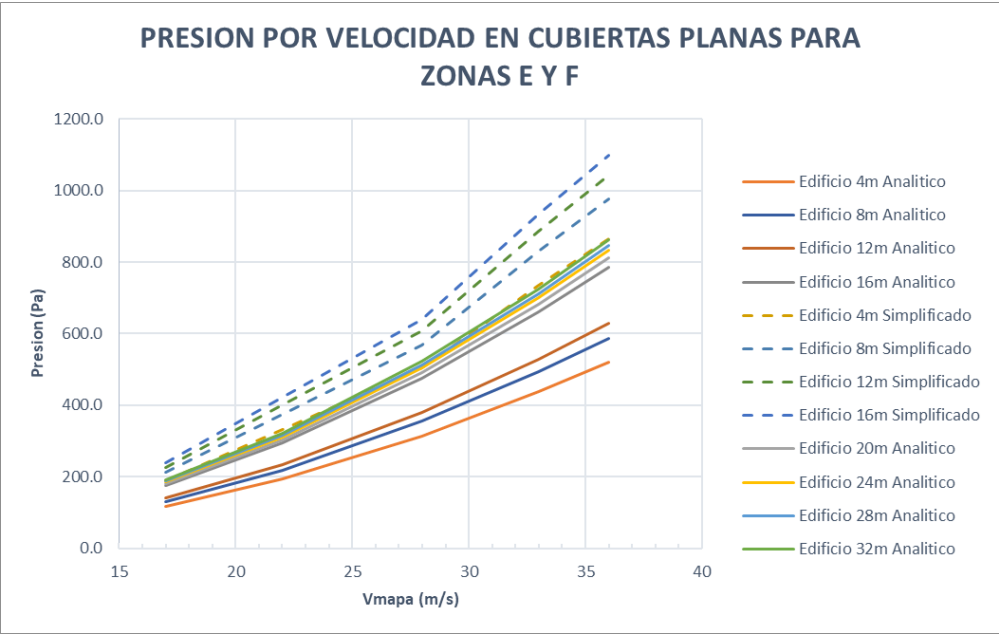


Figura 8. Presión por velocidad en cubiertas planas para zonas E y F.

Fuente: Elaboración propia.

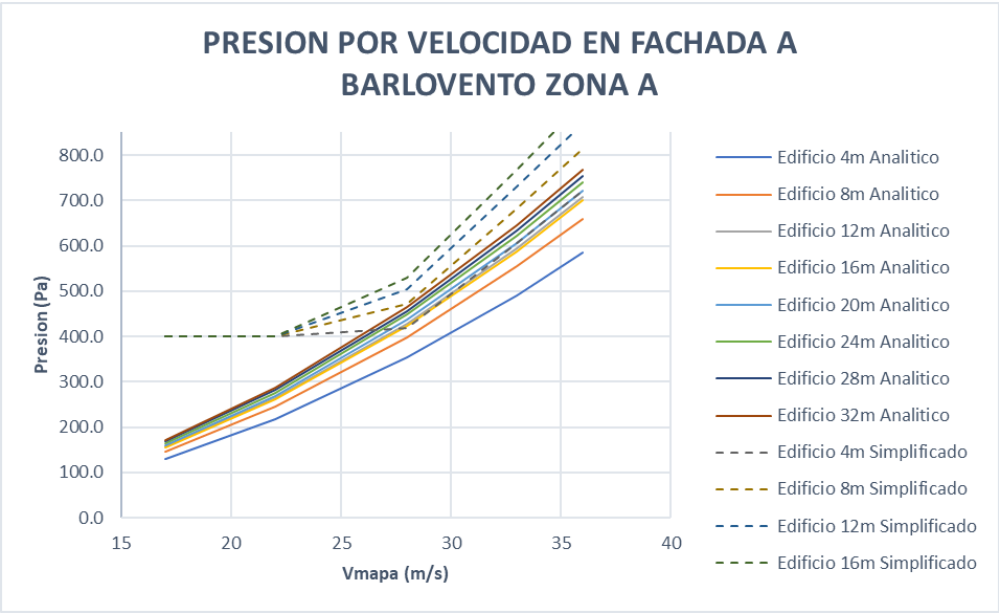


Figura 9. Presión por velocidad en fachada Barlovento para zona A.

Fuente: Elaboración propia.

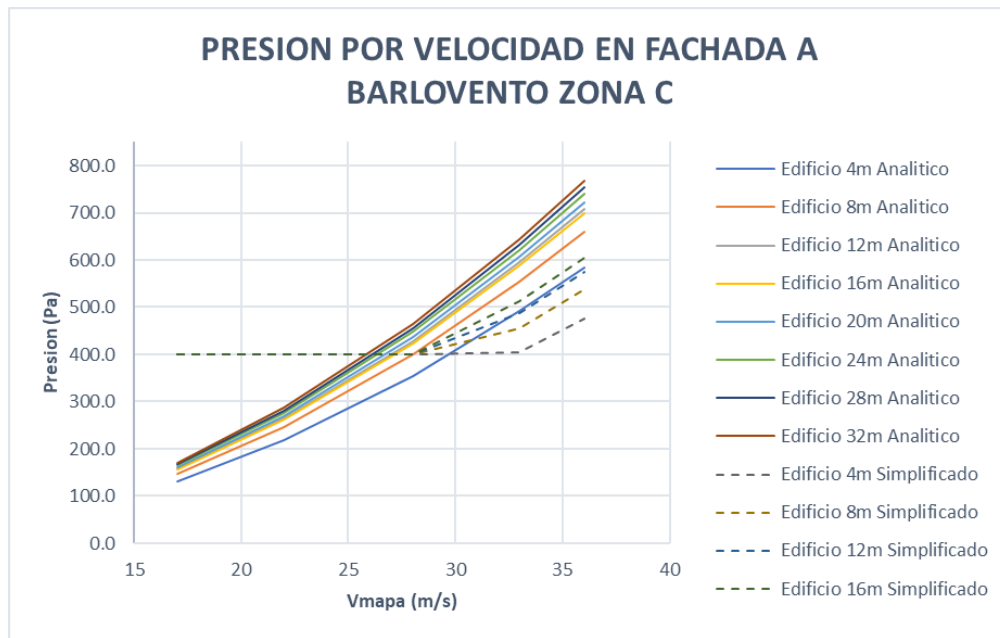


Figura 10. Presión por velocidad en fachada Barlovento para zona C.

Fuente: Elaboración propia.

Es relevante destacar, como se evidencia en la figura 3, que para las zonas E y F, mencionadas en el método simplificado (las cuales se concentran en una porción reducida de toda la fachada), se presentan presiones significativamente mayores que las obtenidas mediante el método analítico. No obstante, para las zonas G y H, se observa que en su mayoría son inferiores a las presiones obtenidas por el método analítico. En las fachadas que se encuentran a barlovento, el comportamiento es notablemente similar para la zona A y la zona C respectivamente. Resulta interesante que el método simplificado, a pesar de ser un método relativamente más sencillo que el analítico, no es necesariamente un método más conservador. Esto se refleja en las presiones obtenidas en el área de aplicación de los modelos, como se puede apreciar en las gráficas mencionadas anteriormente.

Finalmente, se confirma que según la tendencia observada de los resultados de la presión por velocidad de los métodos analítico y simplificado la presión aumenta a medida que la velocidad es mayor, lo cual se considera correcto.

6.5. PRESIÓN POR CUBIERTA

A continuación, se presentan los resultados de una cubierta plana para alturas de 16 y 32 metros. Como se mencionó previamente, los datos provenientes del CFD se darán en curvas de máximos, mínimos y

promedios con el fin de realizar una correcta comparación. Adicionalmente, se presentan los valores de los resultados de los métodos analítico y simplificado. Sin embargo, para este último se presentan de gráficas para las zonas descritas en la figura 3 como E, F, G y H. El análisis de la zona E y F se realiza por separado debido a que estas zonas difieren en áreas de aplicación. Como se indica en la presente norma, la distancia se calcula como $2a$, donde a es el menor valor entre el 10% de la menor dimensión horizontal, o 0,4 multiplicado por la altura o un 4% de la menor dimensión horizontal, pero no menos de 0,9 m.

Adicionalmente, se presentan gráficas de contorno debido a que son útiles cuando se quiere entender como una variable (La Presión o succión en este caso) cambia con relación a otras dos variables (longitud y ancho). Los distintos colores en la gráfica representan diferentes rangos de valores de presión, lo que permite identificar rápidamente las zonas de altas y bajas presiones.

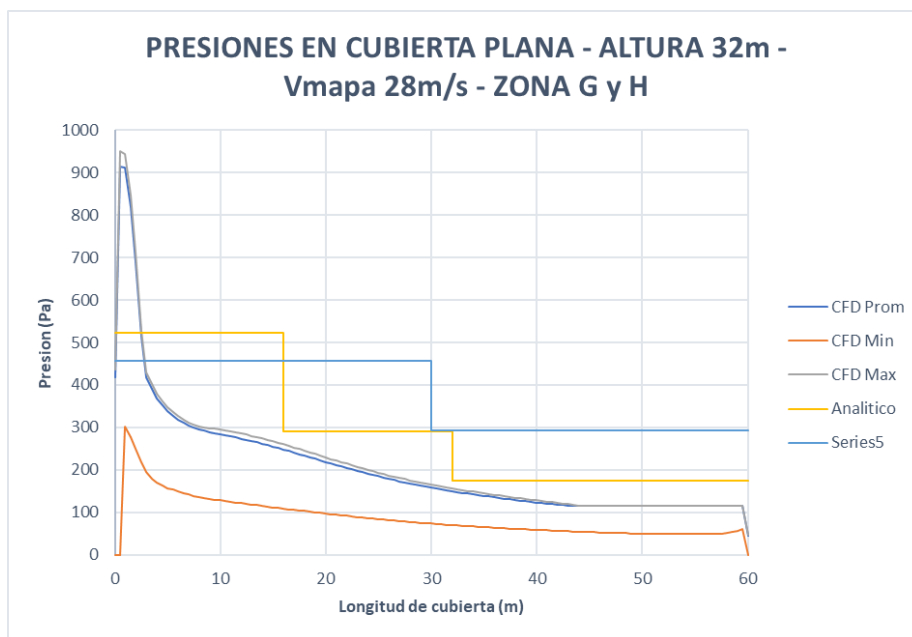


Figura 1. Presiones en cubiertas planas para zonas G y H para altura de 32m y velocidad de 28m/s.

Fuente: Elaboración propia.

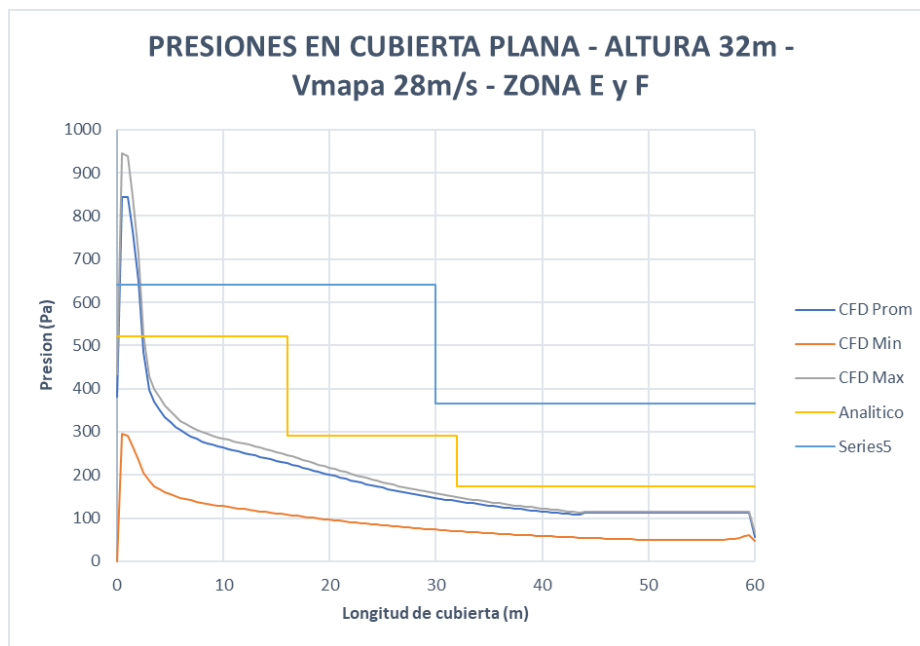


Figura 2. Presiones en cubiertas planas para zonas E y F para altura de 32m y velocidad de 28m/s.

Fuente: Elaboración propia.

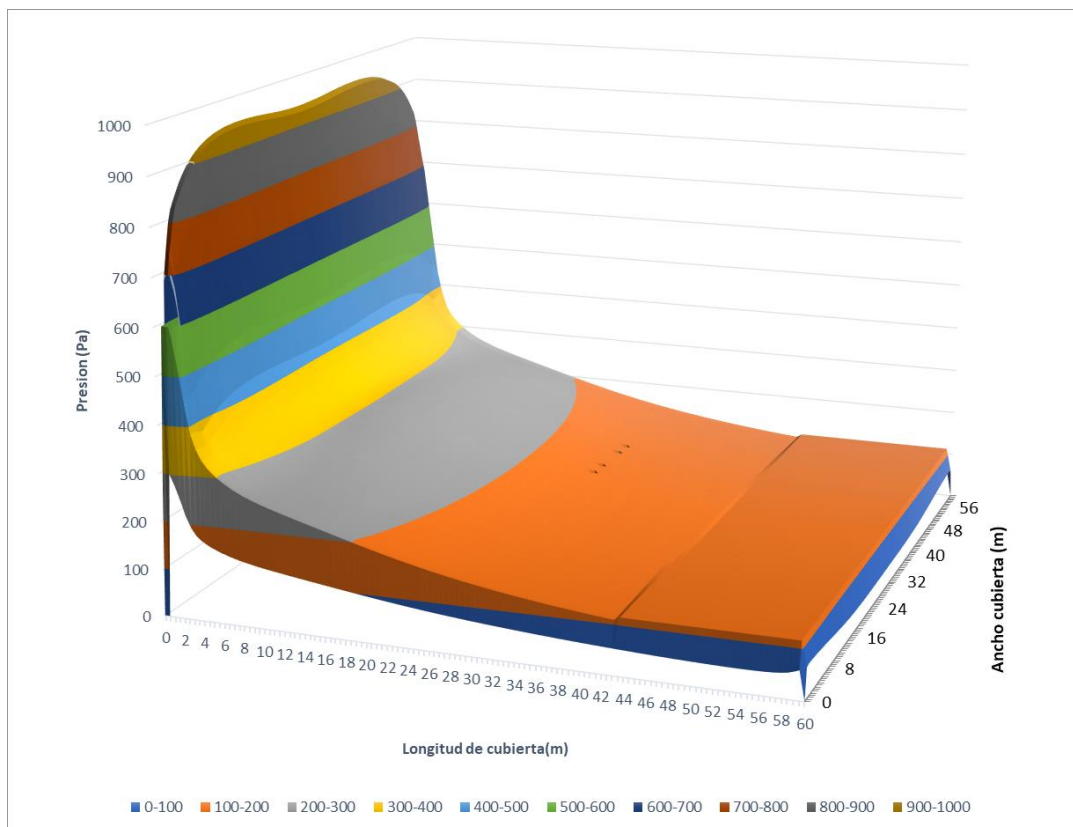


Figura 3. Contorno 3D de presiones en cubierta para altura de 32m y velocidad de 28 m/s.

Fuente: Elaboración propia.

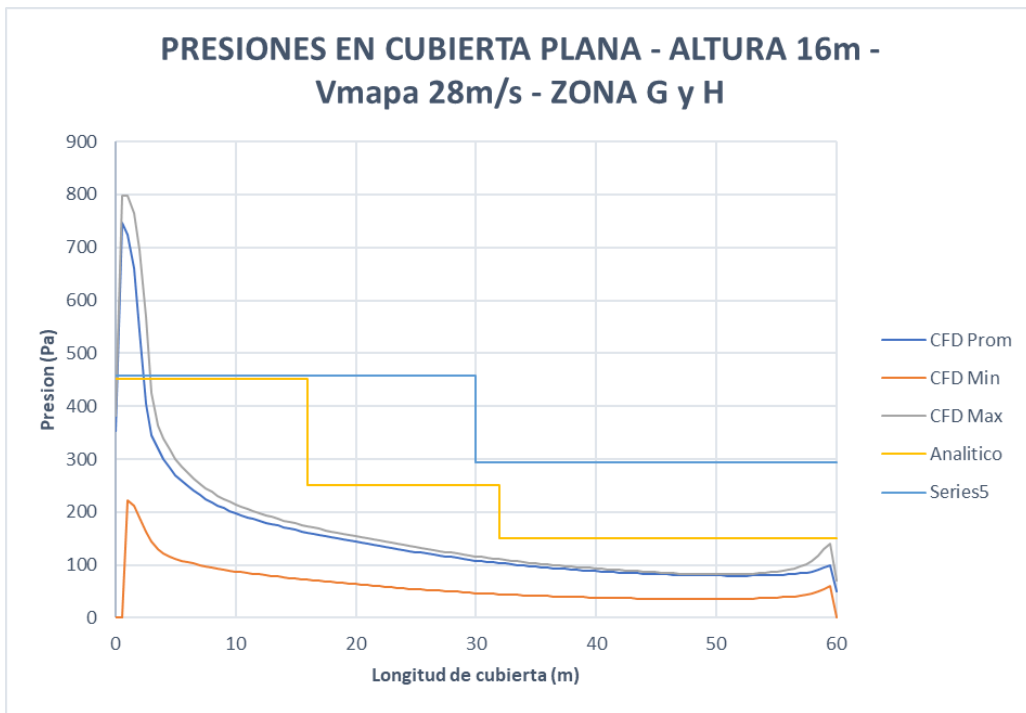


Figura 4. Presiones en cubiertas planas para zonas G y H para altura de 16m y velocidad de 28m/s.

Fuente: Elaboración propia.

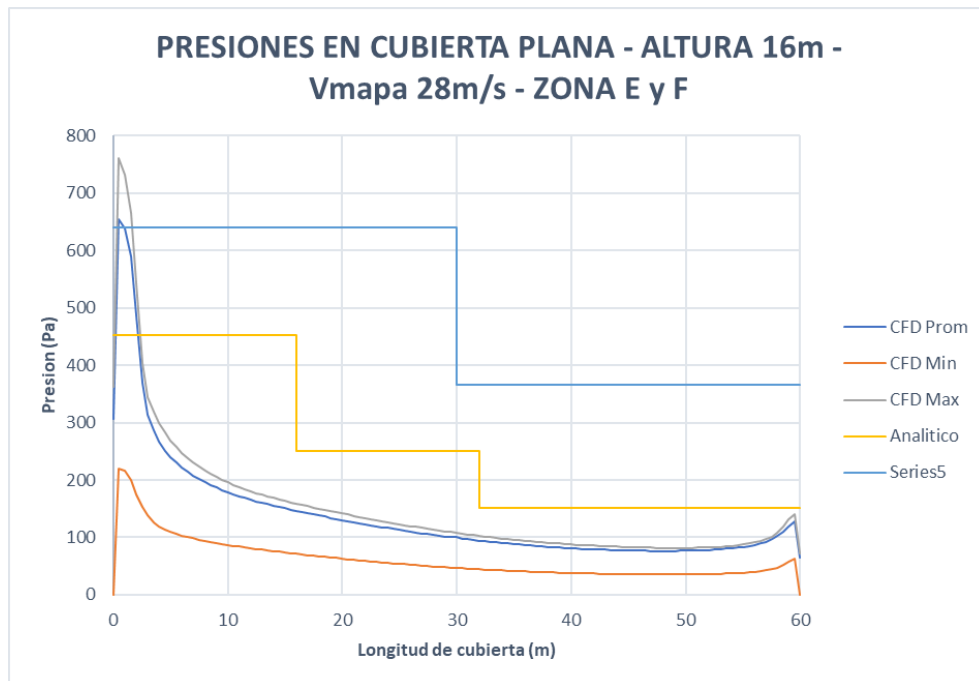


Figura 5. Presiones en cubiertas planas para zonas E y F para altura de 16m y velocidad de 28m/s.

Fuente: Elaboración propia.

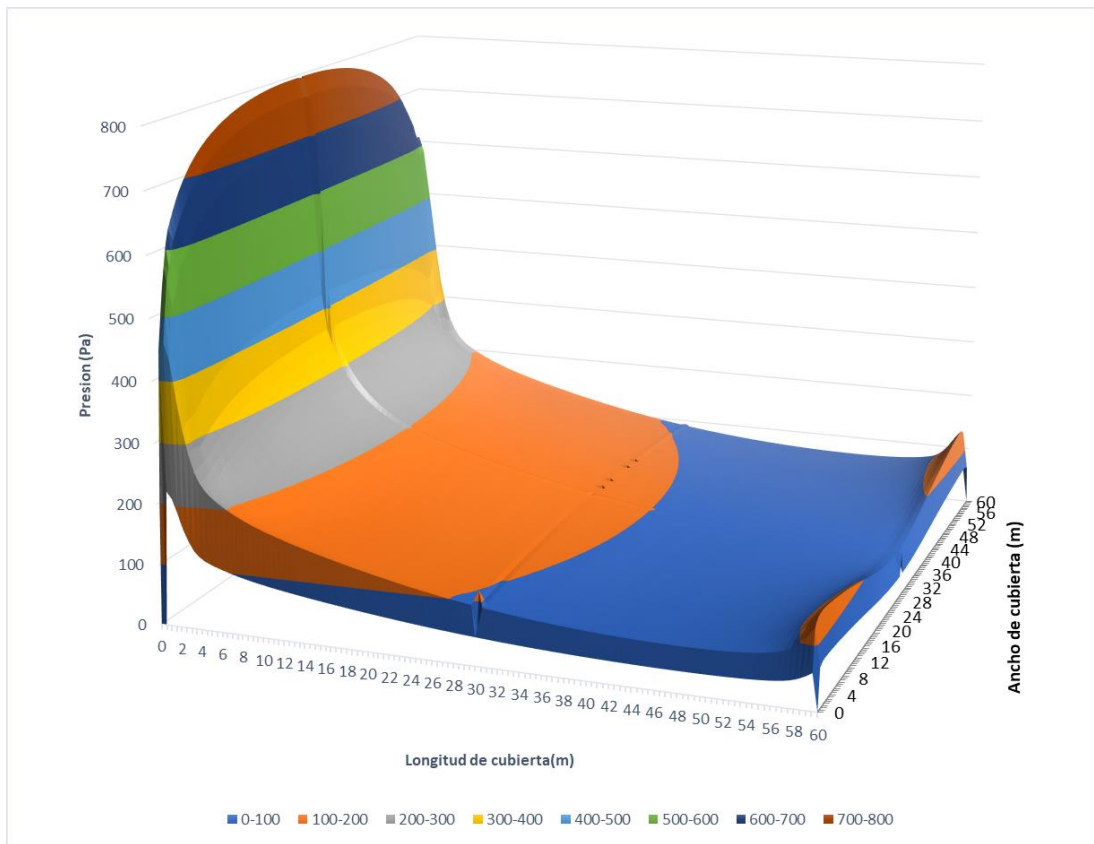


Figura 6. Contorno 3D de presiones en cubierta para altura de 16m y velocidad de 28 m/s.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en las figuras 11, 12, 14 y 15, en la zona en donde se presenta la transición de barlovento a sotavento, los valores obtenidos mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD) superan a los valores obtenidos por la normativa NSR-10. Además, se observa un pico de presión en los primeros metros de la cubierta. Este fenómeno se debe a que cuando el viento fluye alrededor de un objeto, el viento se acelera cerca de los bordes y crea áreas de baja presión, o vórtices. Estos vórtices pueden generar succiones, resultando en presiones negativas (succiones) en esos puntos de la superficie. Asimismo, el viento que golpea un edificio directamente puede ser desviado en hacia arriba la parte superior, creando una gran área de presión más alta. En resumen, habrá presiones más altas en la parte superior del edificio y presiones más bajas en la parte inferior.

Según lo observado en las figuras 13 y 16, la presión máxima se encuentra en los primeros metros de la cubierta, alcanzando su valor máximo aproximadamente en la mitad de la fachada a barlovento. Es notable que en los últimos metros de la cubierta se presenta un fenómeno en el cual las presiones se

elevan ligeramente, posiblemente debido a los posibles vórtices generados por la dirección del viento en esta zona.

En las zonas E y F, se observa un patrón de comportamiento que contrasta las zonas G y H evaluadas para la totalidad de la superficie de cubierta. Los coeficientes de presión Ps_{10} exhiben valores más altos en las zonas E y F que en las G y H. Esto resulta en cargas calculadas mediante el método simplificado que son mayores que las obtenidas por el método analítico en las zonas E y F. Sin embargo, los resultados analizados con la herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD) indican que, con el método simplificado las mayores presiones se encuentran en zonas G y H.

Es importante destacar lo que se observa en las gráficas 11, 12, 14 y 15. Es evidente que las líneas de máximos y promedios se encuentran muy próximas entre sí, mientras que los mínimos presentan una mayor diferencia. Esto se debe a que la mayoría de los datos, como se puede apreciar en la figura 16, son muy similares, por lo que hay una mayor cantidad de ellos. En contraste, las presiones menores se presentan en zonas específicas de la cubierta, por lo que hay una menor cantidad de datos.

6.6. PRESIONES EN LA CARA A BARLOVENTO

A continuación, se muestran los resultados para una fachada a barlovento para alturas de 16 y 32 metros. Los datos obtenidos mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD) se presentarán en curvas de máximos, mínimos y promedios para facilitar una comparación más precisa. Además, se mostrarán los valores resultantes de los métodos analítico y simplificado. Para este último se presentan de graficas para las zonas descritas en la figura 3 como A y C. El análisis de la zona A se realiza de manera independiente debido a las diferencias en las zonas de aplicación. Según la norma actual, la distancia se calcula como $2a$, donde a es el menor valor entre el 10% de la menor dimensión horizontal, o $0,4$ multiplicado por h o 4% de la menor dimensión horizontal, pero no menos de $0,9$ m.

En relación con la zona A, se observa un valor mayor de Ps_{10} para el método simplificado. Por lo tanto, en la mayoría de los casos los valores de presión serán mayores en este método que en el método analítico como se podrá apreciar en las gráficas siguientes.

Es importante destacar que para las gráficas con alturas mayores a 16 m no se presentaran los resultados del método simplificado ya que esta metodología no es aplicable en estos casos. Sin embargo, para el método analítico, se presentarán graficas para la zona A y la zona C respectivamente, con el objetivo de mostrar el comportamiento de ambas zonas para estructuras que no se ajustan al método simplificado.

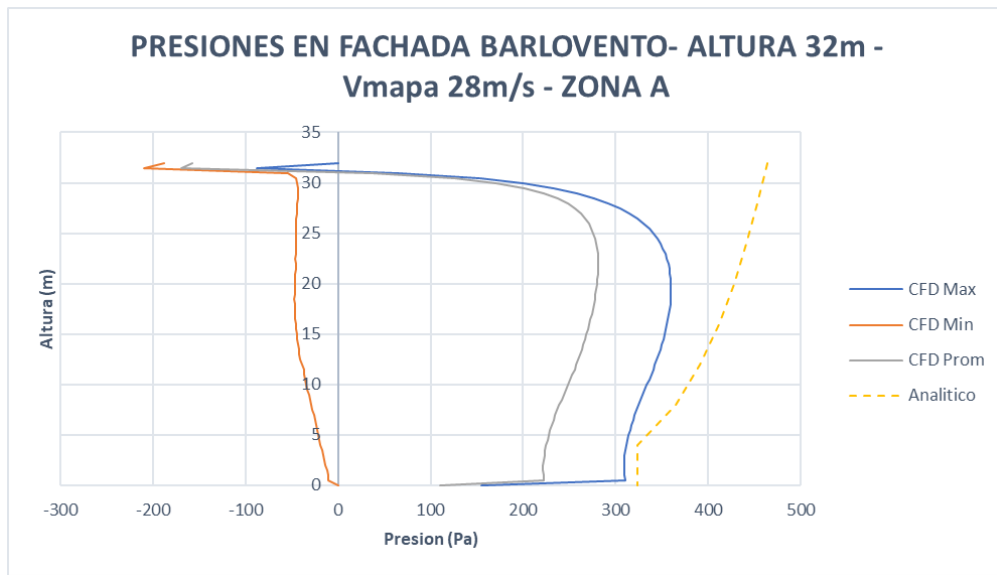


Figura 7. Presiones en fachada en barlovento para una altura de fachada de 32m, velocidad 28 m/s y en zona A.

Fuente: Elaboración propia.

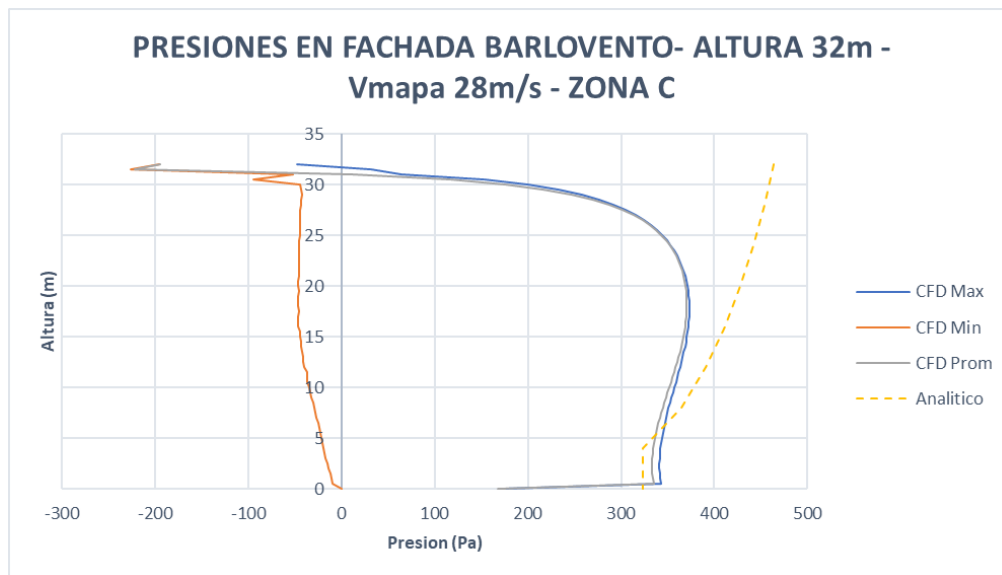


Figura 8. Presiones en fachada en barlovento para una altura de fachada de 32m, velocidad 28 m/s y en zona C.

Fuente: Elaboración propia.

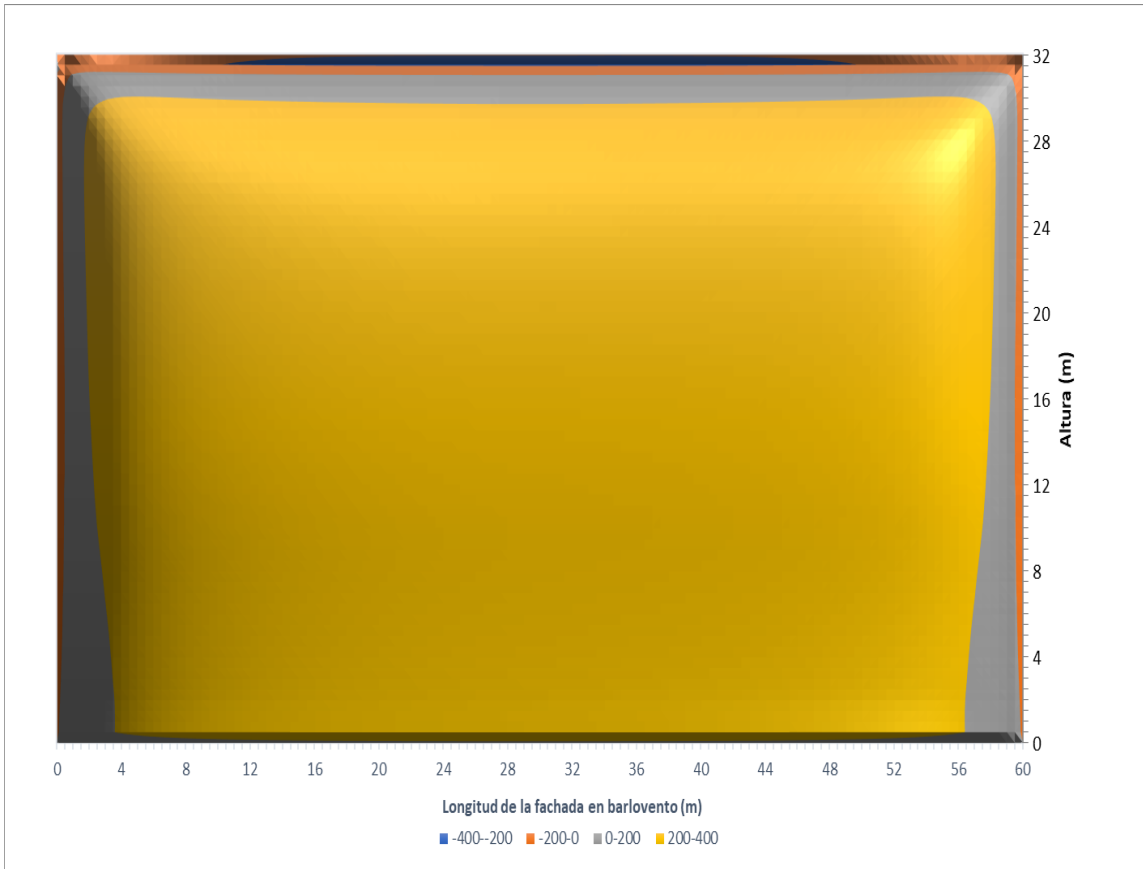


Figura 9. Contorno 3D de presiones en fachada a barlovento, apertura aproximada de 0.1° para altura 32m y velocidad de 28 m/s.

Fuente: Elaboración propia.

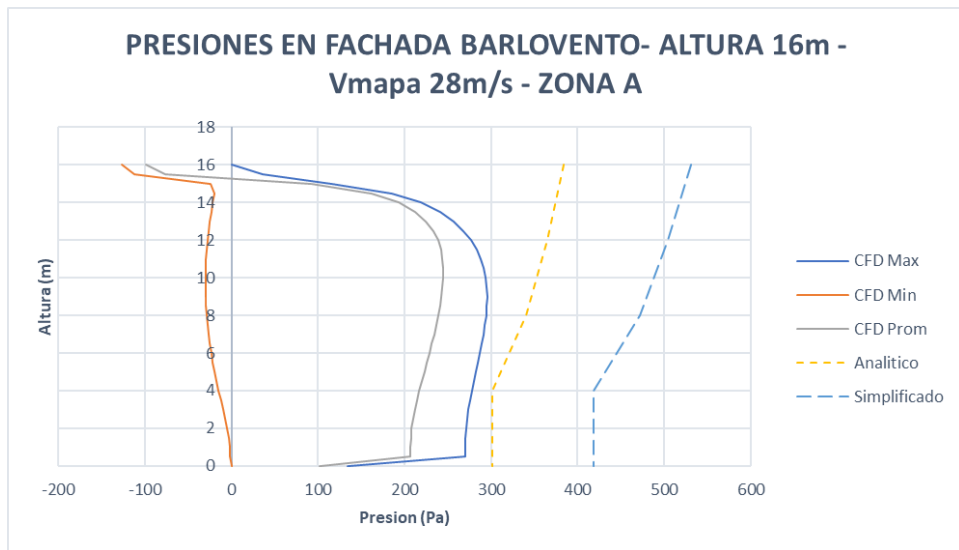


Figura 10. Presiones en fachada en barlovento para una altura de fachada de 16m, velocidad 28 m/s y En zona A.

Fuente: Elaboración propia.

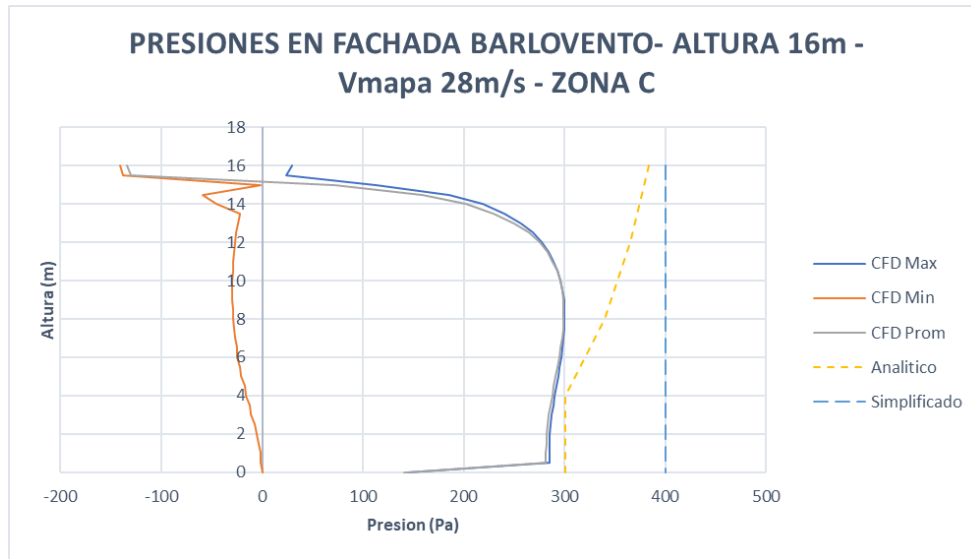


Figura 11. Presiones en fachada en barlovento para una altura de fachada de 16m, velocidad 28 m/s y En zona C.

Fuente: Elaboración propia.

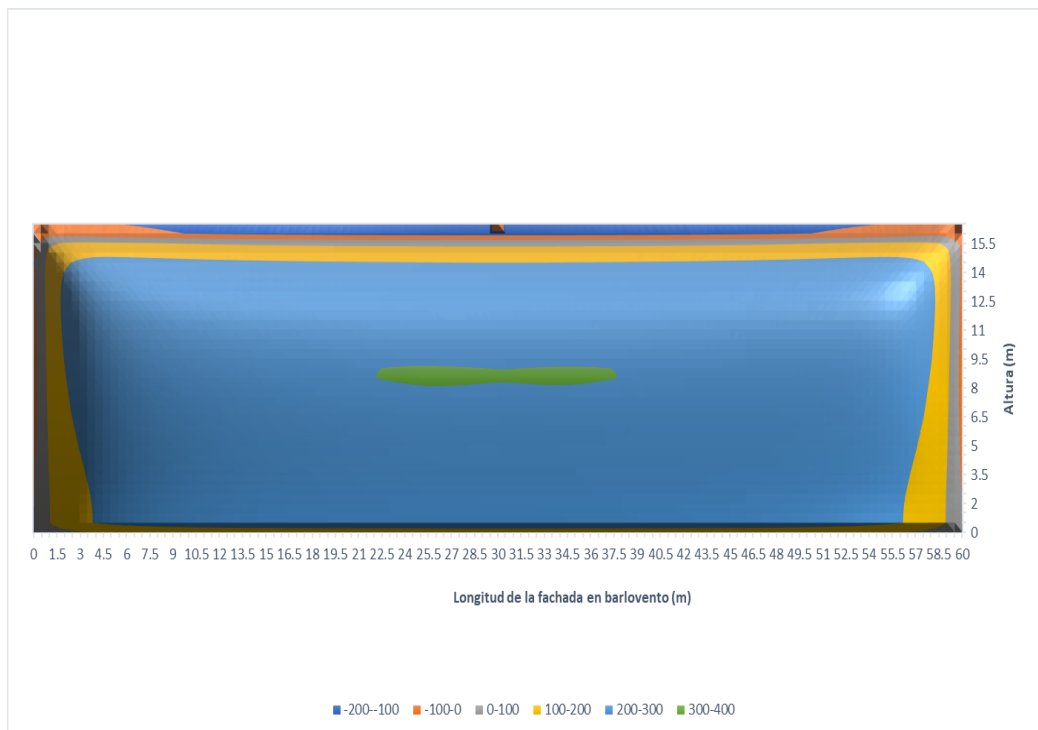


Figura 12. Contorno 3D de presiones en fachada a barlovento, apertura aproximada de 0.1° para altura 16m y velocidad de 28 m/s.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en las figuras 17, 18, 20 y 21, la zona A muestra valores más altos para el método simplificado que para el método analítico. Sin embargo, al evaluar los resultados provenientes de la dinámica de fluidos computacional (CFD), se observa que los valores son mayores en la zona C que en la zona A. Esto indica una discrepancia importante con respecto al método simplificado. Además, para el edificio más alto los valores máximos y promedios provenientes a través de CFD tienden a ser mayores que los valores obtenidos mediante el método propuesto por la norma. También es notable que la curva resultante para el método analítico tiene una tendencia muy similar a la encontrada en el CFD.

En las figuras 19 y 22 se puede constatar que la tendencia de las presiones en las fachadas a barlovento aumenta medida que se acerca al centro de la fachada. También se observa que en los bordes se presentan presiones negativas (succiones). Esto se debe a que el viento al, al fluir cerca de los bordes, crea zonas de baja presión, que se traducen en zonas de succión. Sin embargo, según el comportamiento esperado, la mayoría de la fachada está bajo presiones positivas.

Es relevante resaltar las observaciones de las gráficas 17, 18, 20 y 21. Se puede apreciar que las líneas de máximos y promedios se encuentran notablemente cercanas entre sí, mientras que los mínimos presentan una mayor variación. Esto se debe a que la mayoría de los datos, como se puede observar en la figura 16, son bastante similares, lo que resulta en una mayor concentración de estos. En contraposición, las presiones menores se manifiestan en zonas específicas de la cubierta, lo que conlleva a una menor cantidad de datos. Por ejemplo, debido a que la zona A tiene una longitud menor (ver figura 3) y presenta zonas de baja presión, la presión promedio se ve más centrada. Sin embargo, para la zona C, que tiene una mayor área de aplicación y por ende, más datos, la línea de valores promedios y máximos se encuentra muy próxima una de la otra.

6.7. PRESIONES A SOTAVENTO

A continuación, se presentan los resultados de una fachada a sotavento con alturas de 16 y 32 metros. Los datos obtenidos a través de la dinámica de fluidos computacional (CFD) se presentarán en curvas de máximos, mínimos y promedios para facilitar una comparación más precisa. Además, se mostrarán

los valores resultantes del método analítico. Sin embargo, dado que el método simplificado ya que no se menciona su aplicación para sotavento, no se consideraron valores para este método.

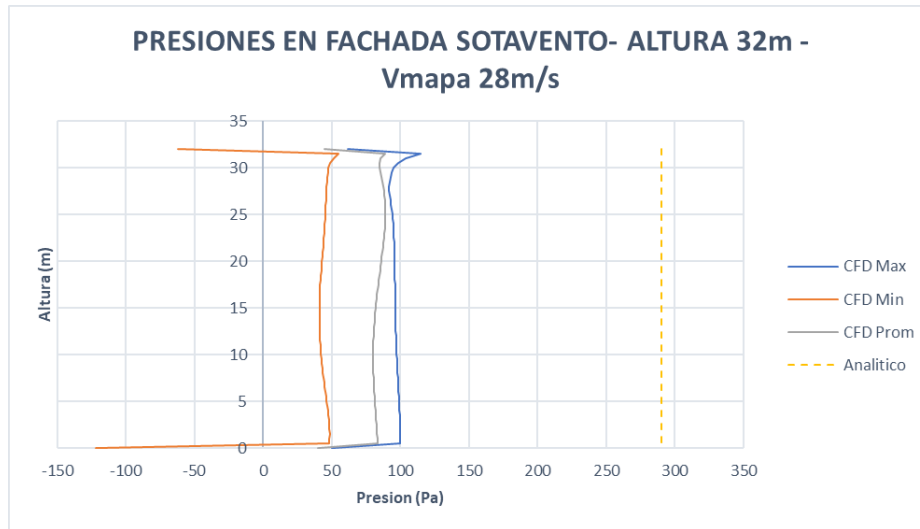


Figura 13. Presiones en fachada en sotavento para una altura de fachada de 32m, velocidad 28 m/s.

Fuente: Elaboración propia

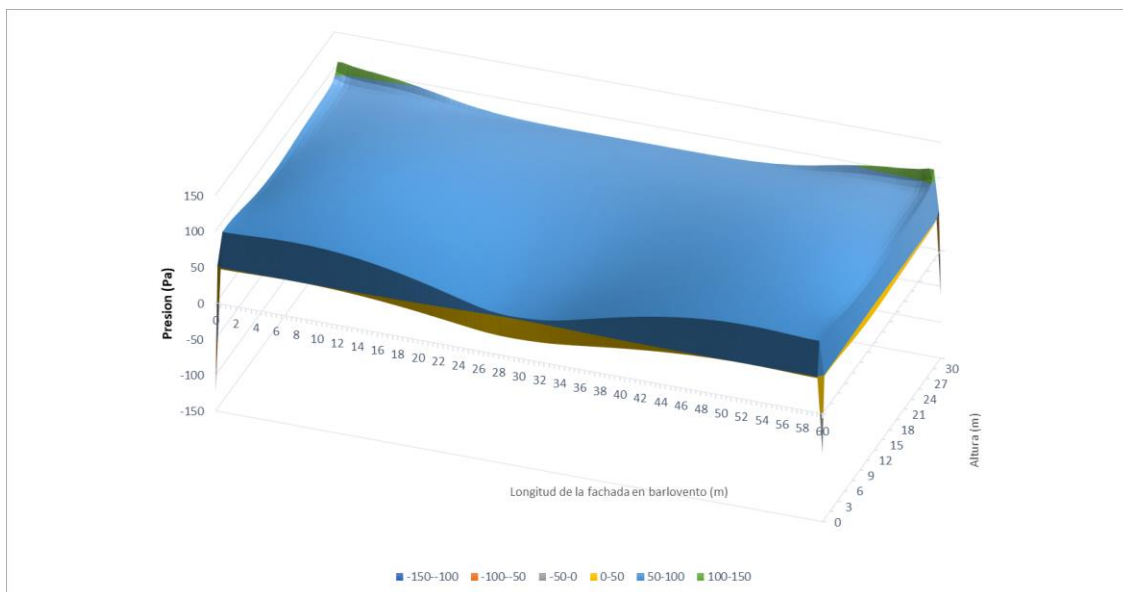


Figura 14. Contorno 3D de presiones en fachada en sotavento para altura de 32m y velocidad de 28 m/s.

Fuente: Elaboración propia.

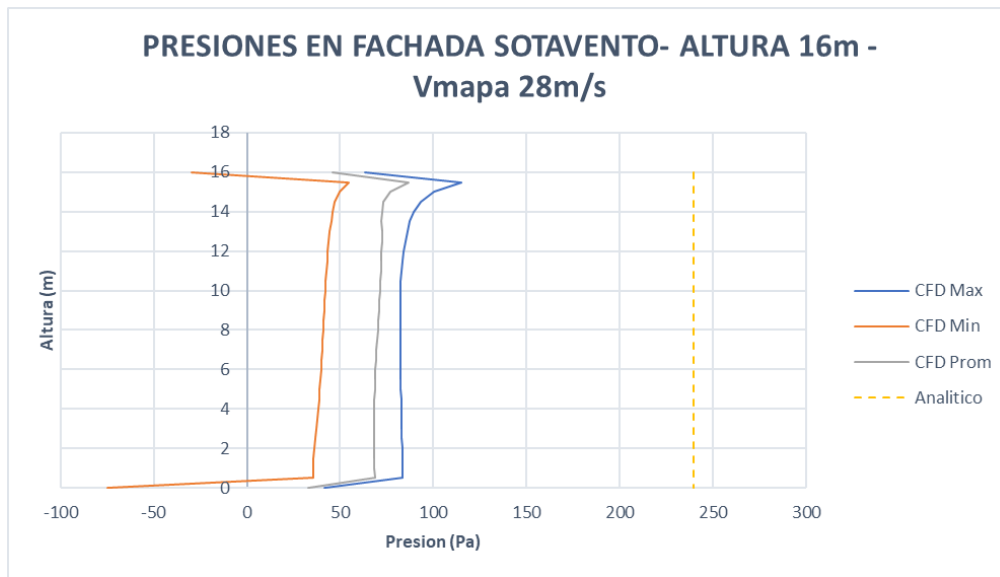


Figura 15. Presiones en fachada en sotavento para una altura de fachada de 16m, velocidad 28 m/s.

Fuente: Elaboración propia.

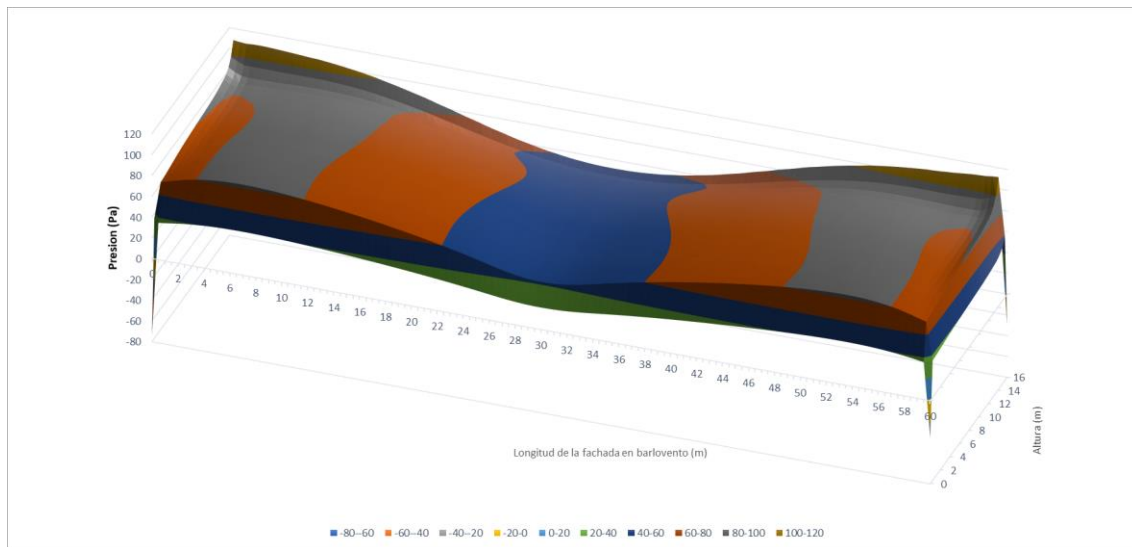


Figura 16. Contorno 3D de presiones en fachada en sotavento para altura de 16m y velocidad de 28 m/s.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en las gráficas 23 y 25, las presiones negativas o succiones, que en este caso se muestran como valores positivos (como se explicó al inicio del apartado de análisis de resultados), son significativamente menores cuando se evalúan con la dinámica de fluidos computacional (CFD) en

comparación a las obtenidas del método analítico. Esto sugiere una sobreestimación del método descrito en la normativa. Sin embargo, es importante destacar que la tendencia del método analítico es similar a la observada en los resultados del CFD.

Según la tendencia observada en las gráficas 24 y 26, se detectan picos de presiones negativas en la fachada a sotavento. En este caso, estas presiones negativas indicarían fuerzas que actúan contra la fachada. Este fenómeno se atribuye al efecto de los vórtices y turbulencias generados cuando el viento abandona la estructura.

Al comparar las figuras 28 y 31, se puede notar que ambas presentan una tendencia muy similar. Sin embargo, parece haber una variación de presiones tanto en la zona de menor presión como en las esquinas superiores de la estructura, donde las presiones parecen ser menores. Esto podría ser simplemente un efecto gráfico.

6.8. PRESIONES EN FACHADAS LATERALES

El probable que ciertas zonas reciban menos atención en las oficinas de diseño, ya que tener valores iguales en ambas caras de la fachada, no tiende a desestabilizar la estructura ni a producir torsiones. A continuación, se presentan los resultados de un análisis de una fachada lateral para alturas de 16 y 32 metros. Los datos obtenidos a través de la dinámica de fluidos computacional (CFD) se darán en curvas de máximos, mínimos y promedios para facilitar una comparación precisa, adicionalmente se presentan los valores de los resultados de los métodos analítico. Sin embargo, dado que el método simplificado no menciona su aplicación para sotavento, no se consideraron valores para este método.

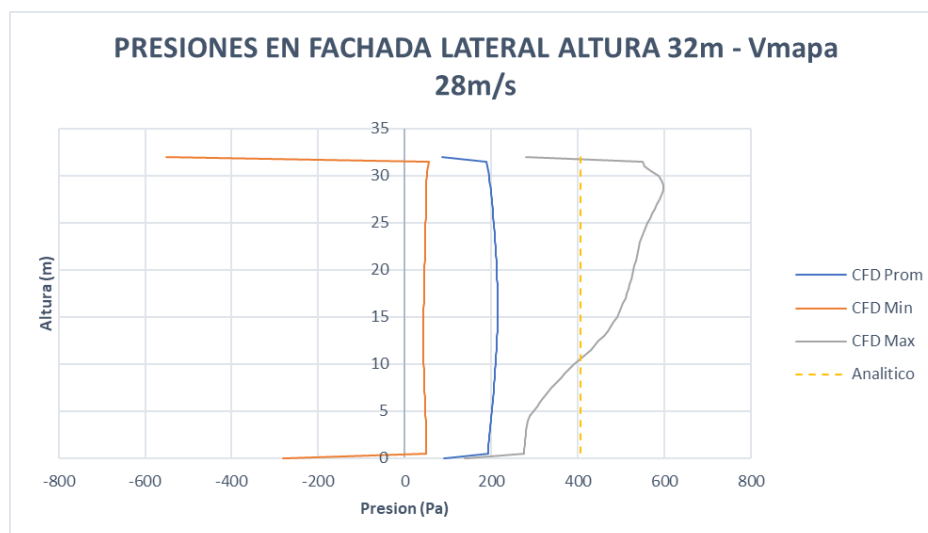


Figura 17. Presiones en fachada lateral izquierda para una altura de fachada de 32m, velocidad 28 m/s.

Fuente: Elaboración propia

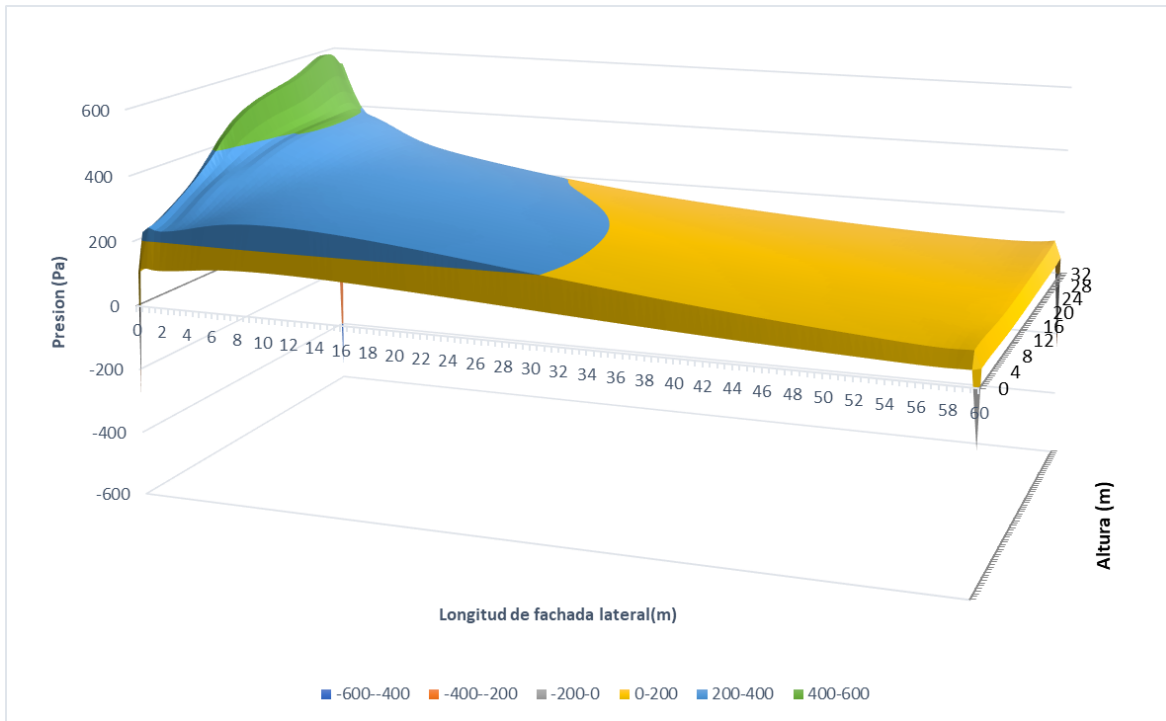


Figura 18. Contorno 3D de presiones en fachada lateral izquierda para altura de 32m y velocidad de 28 m/s.

Fuente: Elaboración propia

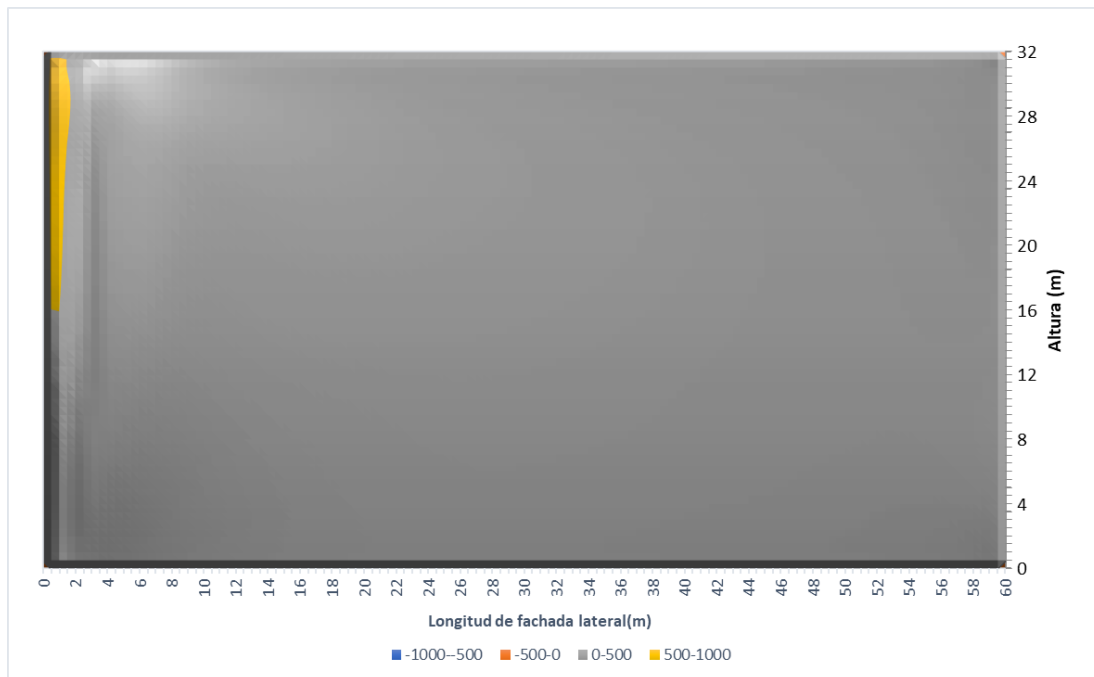


Figura 19. Contorno 3D de presiones en fachada lateral izquierda, apertura aproximada de 0.1° para altura 32m y velocidad de 28 m/s.

Fuente: Elaboración propia.

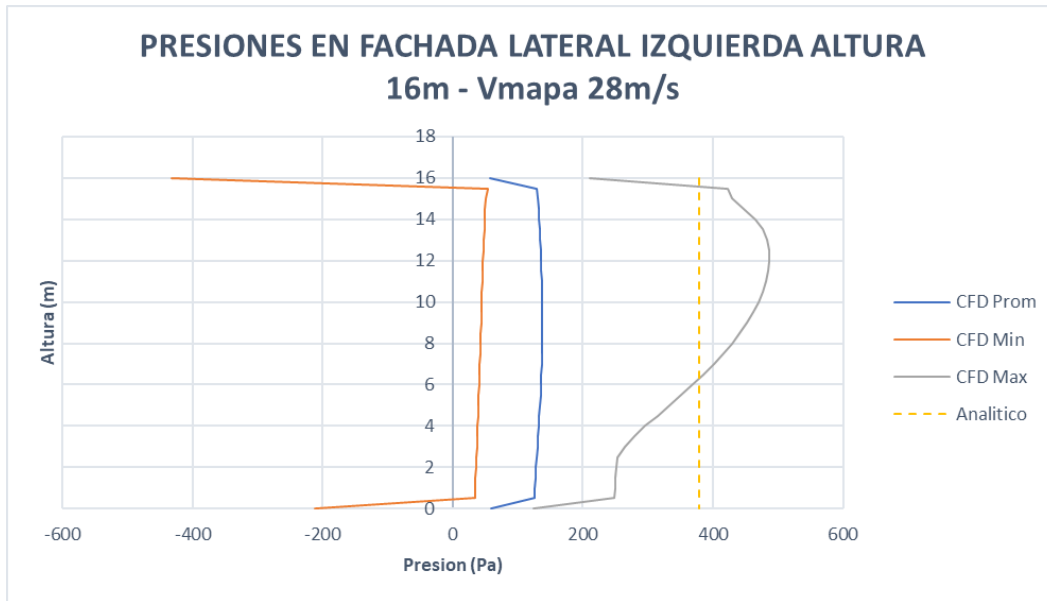


Figura 20. Presiones en fachada lateral izquierda para una altura de fachada de 16m, velocidad 28 m/s.

Fuente: Elaboración propia.

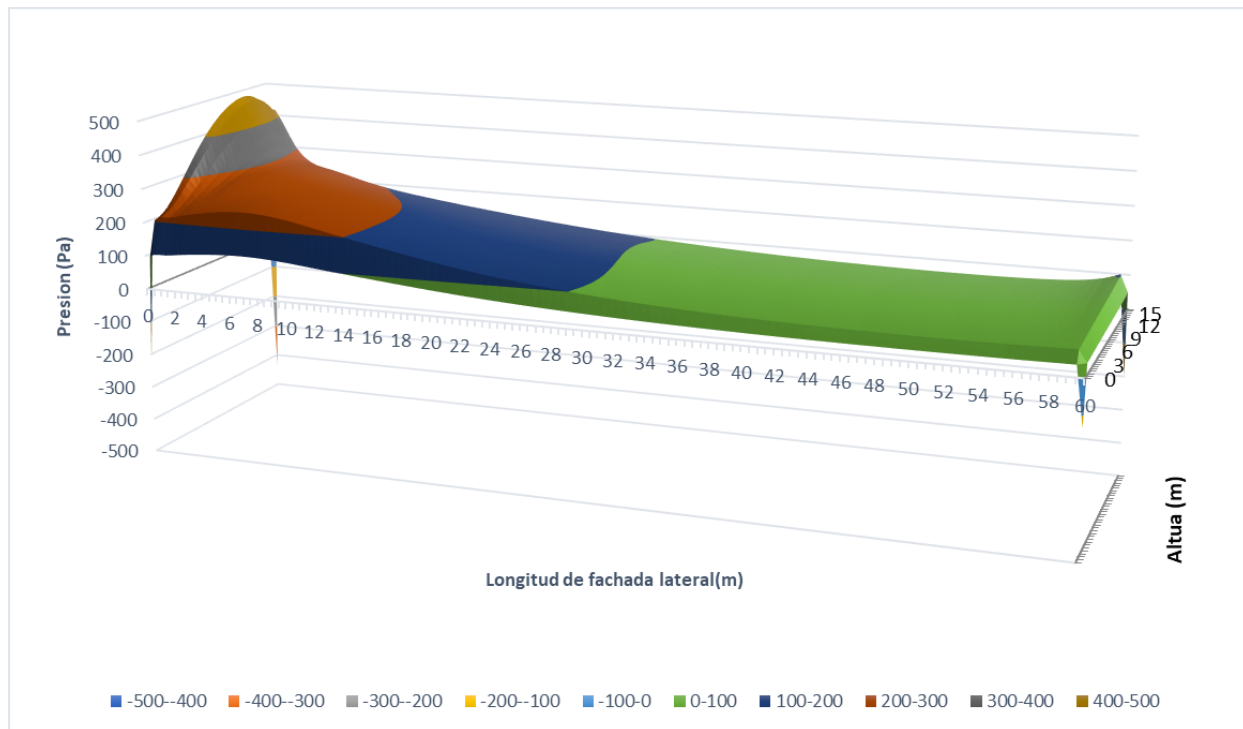


Figura 21. Contorno 3D de presiones en fachada lateral izquierda para altura de 16m y velocidad de 28 m/s.

Fuente: Elaboración propia.

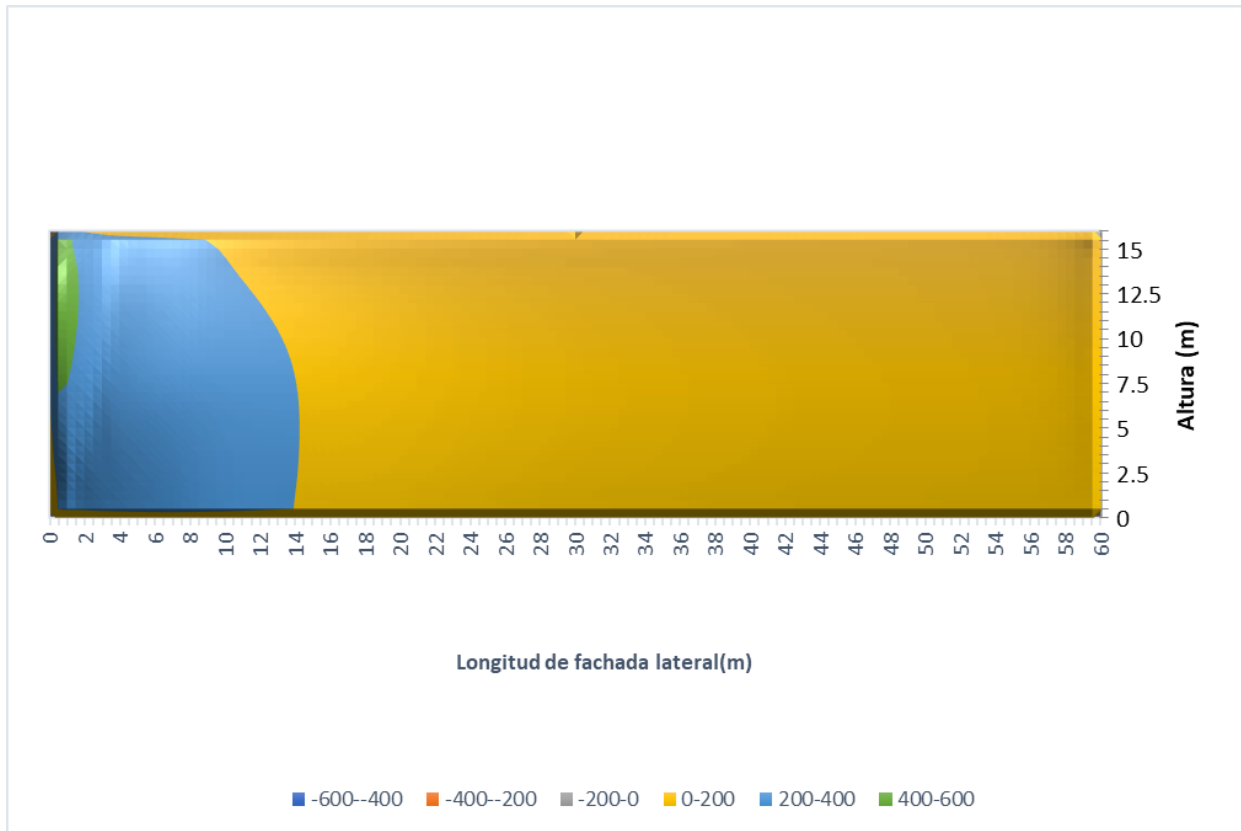


Figura 22. Contorno 3D de presiones en fachada lateral izquierda, apertura aproximada de 0.1° para altura 16m y velocidad de 28 m/s.

Fuente: Elaboración propia.

Como es posible apreciar en las figuras 27 y 30, el valor máximo obtenido mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD) supera los valores calculados por el método analítico. Sin embargo, al observar las gráficas de contorno de presiones, este máximo se presenta en una pequeña franja en los primeros dos metros de la fachada, y para el resto de la fachada, estos valores disminuyen considerablemente. Esto se evidencia en el valor promedio obtenido para CFD, que significativamente menor que el valor del máximo obtenido y el valor del método analítico.

Es importante destacar que estas fachadas laterales presentan un comportamiento muy similar a las cubiertas planas, estando sometidas principalmente a succiones y teniendo un valor máximo en los

primeros metros de la zona de análisis, que disminuye considerablemente a lo largo de la longitud restante. Sin embargo, las dos diferencias más notables son la ubicación de máximo en altura y el detalle del cálculo de los métodos simplificado y analítico. El máximo en la cubierta se encuentra en el centro de la longitud de la cubierta en la zona que linda con la fachada a barlovento, mientras que en la fachada lateral se encuentra localizada en la zona superior en altura, no en la zona central. La segunda diferencia más notable se encuentra en el detalle del cálculo de los métodos simplificado y analítico. Como se puede apreciar en las Figuras 11, 12, 15 y 16, los resultados de estas metodologías disminuyen a lo largo de la longitud para ajustarse a la tendencia de la curva obtenida mediante CFD, lo cual no sucede de manera evidente con los cálculos para las presiones laterales.

7. CONCLUSIONES

- De manera general se considera que los métodos propuestos por la normativa tienen tendencias similares a los resultados obtenidos mediante CFD, sin embargo, considerando que las curvas máximas se dan en zonas específicas de las zonas de análisis, estos métodos se observan bastante conservadores ante los valores promedio que deberían ser contra los que se evalué.
- Se concluye que las tendencias obtenidas a través del método simplificado para las zonas E, F y G, H no concuerdan con los valores obtenidos del análisis por dinámica de fluidos computacionales (CFD). Las simulaciones indican presiones menores en las zonas E y F, donde se suponen que se tendrán presiones mayores y sucede de manera inversa con las zonas G y H.
- Se reconoce la relevancia de la geometría de la estructura. Dependiendo de esta, el comportamiento del viento variará, lo que a su vez alterará las zonas de baja presión que generan distintos puntos de presiones, ya sean positivas o negativas.
- El viento en las fachadas de estructuras cuadradas y/o rectangulares con características similares a las estudiadas en este documento se comportan de manera similar a una cubierta plana como se logra observar en las gráficas del apartado con el mismo nombre, sin embargo, la norma no proporciona una metodología para obtener un perfil más cercano al comportamiento de las presiones.
- Es importante destacar que la normativa para las fachadas en barlovento no considera las presiones negativas presentes en las esquinas. Por lo tanto, se hace imprescindible una metodología que permita evaluar estas presiones dentro de las oficinas de diseño. Esta situación puede tener un impacto directo en el diseño de los ENE (Elementos No Estructurales), ya que estos elementos no están diseñados para soportar presiones negativas.

8. RECOMENDACIONES

- La principal recomendación es realizar el cálculo de presiones de viento para cualquier tipo de estructuras mediante túnel de viento o mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) con el fin de obtener las presiones más detalladas y lograr así tener un modelo lo más acercado a la realidad posible.
- Se recomienda ampliamente que, si no es posible realizar un estudio de túnel de viento o no se tiene la capacidad de realizar simulaciones mediante dinámica de fluidos computacional, utilizar el método analítico por encima del método simplificado debido a que este se ajusta de mejor forma a las tendencias obtenidas por el CFD.
- Para el cálculo de presiones en las fachadas laterales, se sugiere profundizar en la investigación de una metodología que permita un análisis más exhaustivo de las mismas. El objetivo de esto es evitar la obtención de valores de presión excesivamente conservadores.
- Se sugiere llevar a cabo una investigación de las variables de frontera adicionales, en línea con lo definido en la NSR-10. Esto incluye aspectos como la rugosidad del terreno, la categoría de exposición y los factores de ajuste topográficos, entre otros.

REFERENCIAS

- [1] V.C. Gabriel, “*Actualización en Cargas por Viento y en Elementos Finitos*”, presentada en El seminario de Actualización en Cargas por Viento y en Elementos Finitos, Medellin, Colombia, jul. 15-20, 2022.
- [2] H.K. Versteeg, W. Malalasekera, An introduction to computational fluid dynamics. Essex, Inglaterra: Pearson Education Limited, 2007.
- [3] A. Gilberto, “*Seminario de ingeniería eólica aplicada a la ingeniería civil*”, Medellin, Colombia, dic. 15-20, 2010.
- [4] A.D. John, Computational fluid dynamics: the basics with applications. Maryland, U.S.A: McGraw-Hill, 1995.
- [5] Dlubal software. “*Flujo constante y flujo transitorio*”. Dlubal software. Accedido: jun. 13, 2023. [En línea] Disponible en: <https://www.dlubal.com/es/descargas-e-informacion/documentos/manuales-en-linea/rwind-2/002681>
- [6] Dlubal software. “Rwind 2”. Dlubal software. Accedido: jun. 13, 2023. [En línea] Disponible en: <https://www.dlubal.com/es/descargas-e-informacion/documentos/manuales-en-linea/rwind-2>
- [7] B.S. Taranath, Reinforced concrete design of tall building. Florida, Estados Unidos: Taylor & Francis Group, 2010.
- [8] Y. Tong, “*CFD and Field testing of Naturally ventilated Full-Scale Building*”, Tesis de Ph.D., Universidad de Nottingham, Inglaterra, 2004.