



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIOS DEL EMPLAZAMIENTO EÓLICO EN MEDIOS URBANOS USANDO
SIMULACIÓN COMPUTACIONAL Y ANÁLISIS DE GENERACIÓN DE ENTROPÍA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL MECÁNICA

MARIANA DAFNE GALLARDO ÁVILA

PROFESOR GUÍA:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ÁLVARO VALENCIA MUSALEM
BENJAMÍN HERRMANN PRIESNITZ
SEBASTIÁN MAGGI SILVA

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA
POR: MARIANA DAFNE GALLARDO ÁVILA
FECHA: 2018
PROF. GUÍA: WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

ESTUDIOS DEL EMPLAZAMIENTO EÓLICO EN MEDIOS URBANOS USANDO SIMULACIÓN COMPUTACIONAL Y ANÁLISIS DE GENERACIÓN DE ENTROPÍA

La energía eólica en medios urbanos es un tema de gran interés por su cercanía al consumo y su origen renovable. Sin embargo, es necesario estudiar los emplazamientos óptimos para las turbinas eólicas con el fin de obtener la máxima generación de energía. El objetivo de este trabajo de título es estudiar, a través de simulaciones numéricas, el flujo de aire en ambientes urbanos con distintas configuraciones de ciudad, enfocándose en el análisis del potencial eólico y la generación de entropía. Entre sus objetivos específicos están generar un modelo simplificado de ciudad para realizar simulaciones en software CFD, simular la capa límite atmosférica, y obtener la distribución de potencial eólico y la generación de entropía en una ciudad.

Para el presente trabajo de título, se desarrolla una metodología de trabajo que consta de cuatro partes principales. En primer lugar, se define el problema y la manera en que se aborda. Luego, se define el entorno urbano con sus parámetros para un total de 18 casos a simular. Posteriormente, se realiza la simulación de fluidos computacional, donde se seleccionan los parámetros de malla, las condiciones de borde asociadas al problema, y las condiciones de las simulaciones. Además, se debe asegurar la homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica. Finalmente, se tiene la obtención y análisis de resultados a través de los softwares CFD Post y Matlab.

De los resultados, se obtiene que la configuración de la ciudad influye en gran medida en la distribución del potencial eólico, y que el criterio que permite seleccionar un emplazamiento por potencial no coincide con el de menor generación de entropía. Existe una gran concentración de flujo en el borde superior del edificio de interés que enfrenta el flujo, así como en los bordes laterales correspondientes, que es una zona que no suele considerarse para la instalación de turbinas eólicas. Los edificios que se encuentran tras otros de similar altura no presentan concentración de flujo. No obstante, al sobresalir de su entorno, éstos presentan una alta concentración independiente de su altura. Se observa que la generación de entropía es alta cercana a los bordes superior y laterales que enfrenta el flujo, por lo que se recomienda la instalación de turbinas eólicas por sobre los cinco metros como distancia segura en que existe una generación de entropía mínima.

En este trabajo de título se logra estudiar el emplazamiento de turbinas eólicas en medios urbanos, a través del análisis de generación de entropía y el potencial eólico. Como conclusión, las zonas de alta concentración de flujo no coinciden con las de menor generación de entropía, por lo que se necesita optimizar estas dos variables para determinar el mejor emplazamiento recomendable. A pesar de esto, se observa que sobre los cinco metros, como referencia, la generación de entropía es mínima en cualquier punto sobre el techo.

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecerle a mi familia por su apoyo incondicional, por su cariño y por todas las oportunidades que siempre me brindaron, pese a la distancia.

Otro agradecimiento es para mis amigos, muchos formados desde los primeros años de universidad, como Mario, Cami Ferrada de Parral, Beto, Pedro, entre otros. Darles las gracias por todos esos momentos memorables y por compartir las locuras de la juventud. Por otro lado, están los amigos mecánicos, con quienes vivimos experiencias de todo tipo que nos ayudaron a crecer como personas y como ingenieros. Una mención especial al Esperanto, que nos albergó en varias reuniones de liberación. Agregar también a mis amigas de Puerto Montt, por su cariño y apoyo en la vida.

Agradecerle a todas las personas que formaron parte de mi vida universitaria, al coro de la facultad, el equipo de handball de Beauchef, el equipo de difusión colegios, el equipo de baby fútbol de mecánica (del que guardé un especial recuerdo en el pie), los amigos de estudio y los amigos de malones. Mi experiencia universitaria no habría sido lo mismo sin estas vivencias, de las cuales obtuve muchos aprendizajes y pude conocer a grandes personas.

Gracias a mi profesor guía Williams Calderón por su orientación en este trabajo de título, y al profesor Álvaro Valencia, a Benjamin Herrmann y a Sebastián Maggi por su apoyo en el desarrollo de la memoria y por aceptar ser miembros de la comisión evaluadora.

Por último, quisiera agradecerle con todo mi corazón a Carlos, quien me apoyó y estuvo conmigo hasta las últimas, y nunca dejó de creer en mí. Agradecerte también el apoyo en programación, que ya el óxido me corroía. Muchas gracias Carlos por tu paciencia en esos días difíciles y por querer compartir tu vida con la mía.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Contexto	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Alcances	3
2. Antecedentes Generales	4
2.1. Turbinas Eólicas	4
2.1.1. Tipos de Turbinas Eólicas	5
2.1.2. Turbinas Eólicas en Medios Urbanos	7
2.2. Capa Límite Atmosférica	8
2.2.1. Capa Límite en Ambientes Urbanos	8
2.2.2. Concentración de Flujos Entorno a Edificios	10
2.3. Modelos de Turbulencia	10
2.3.1. Homogeneidad Horizontal de la Capa Límite Atmosférica	11
2.4. Generación de Entropía	11
3. Metodología	13
3.1. Definición del Problema	13
3.2. Entorno Urbano	13
3.3. Dinámica de Fluidos Computacional	14
3.3.1. Dimensiones del Dominio	14
3.3.2. Condiciones de Borde	16
3.3.3. Mallado	18
3.3.4. Setup ANSYS Fluent	18
3.3.5. Criterios de Convergencia	19
3.3.6. Homogeneidad de la Capa Límite	20
3.4. Presentación y Análisis de Resultados	20
4. Resultados	22
4.1. Resultados Simulaciones Computacionales	22
4.1.1. Dominio Computacional	22
4.1.2. Mallado	23
4.1.3. Homogeneidad Horizontal de Capa Límite	24
4.1.4. Criterio de Convergencia	24

4.1.5. Validación	25
4.1.6. Resultados de Casos	26
4.2. Resultados Numéricos	55
4.2.1. Resultados por Plano	65
5. Análisis de Resultados	70
6. Conclusión	73
Bibliografía	75

Índice de Tablas

2.1. Clasificación del terreno de Davenport (1960) adaptado por Wieringa (1980) en términos de la longitud de rugosidad aerodinámica z_0	10
2.2. Constantes del modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ estándar por defecto.	11
2.3. Constantes del modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ ajustados para HHABL.	11
3.1. Parámetros del entorno urbano para cada caso de estudio.	14
3.2. Setup para el Solver de ANSYS Fluent.	18
3.3. Configuración del modelo de turbulencia.	19
3.4. Configuración del método de solución.	19
4.1. Estadísticas de la malla del caso 6.	24
4.2. Métricas de la malla del caso 6.	24
4.3. Flujo másico neto para el caso 9.	26

Índice de Ilustraciones

1.1. Capacidad global acumulada de energía eólica hasta el 2016 (GWEC).	1
2.1. Turbinas de eje horizontal en parque eólico Canela, Chile. Fabricante: Vestas.	5
2.2. Turbinas eólicas de eje vertical. (a) Turbina tipo Darrieus. Fabricante: Urban Green Energy. (b) Turbina tipo Savonius. Fabricante: Helix Wind.	6
2.3. Turbinas eólicas en medios urbanos. (a) Turbina instalada en el techo, (b) Turbina instalada entre edificios, y (c) Turbina incorporada al diseño del edificio.	7
2.4. Esquema del perfil de velocidad horizontal promedio como una función de la altura z en la capa límite atmosférica desarrollada sobre praderas con una altura de rugosidad z_0	8
2.5. Esquema del perfil de velocidad horizontal promedio como una función de la altura z en la capa límite atmosférica desarrollada sobre un ambiente urbano con una altura de rugosidad z_0	9
3.1. Parámetros del entorno urbano.	15
4.1. Representación del dominio computacional con sus dimensiones, donde H es el la altura del edificio de interés.	22
4.2. Mallado caso 1. (a) Mallado del dominio. (b) Acercamiento al mallado de los edificios.	23
4.3. Gráficos de perfiles de entrada y salida de un dominio. (a) Perfil de velocidad, (b) Perfil de energía cinética turbulenta, y (c) Perfil de tasa de disipación turbulenta.	25
4.4. Residuos Caso 1.	25
4.5. Monitores de: (a) Presión en la salida. (b) Presión sobre edificio. (c) Velocidad en la salida. (d) Velocidad sobre edificio.	26
4.6. Contorno de presión del caso 1.	27
4.7. Contorno de velocidad del caso 1.	28
4.8. Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 1.	28
4.9. Contorno de presión del caso 2.	29
4.10. Contorno de velocidad del caso 2.	29
4.11. Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 2.	30
4.12. Contorno de presión del caso 3.	30
4.13. Contorno de velocidad del caso 3.	31
4.14. Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 3.	31
4.15. Contorno de presión del caso 4.	32
4.16. Contorno de velocidad del caso 4.	32

4.17. Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 4.	33
4.18. Contorno de presión del caso 5.	33
4.19. Contorno de velocidad del caso 5.	34
4.20. Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 5.	34
4.21. Contorno de presión del caso 6.	35
4.22. Contorno de velocidad del caso 6.	35
4.23. Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 6.	36
4.24. Contorno de presión del caso 7.	36
4.25. Contorno de velocidad del caso 7.	37
4.26. Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 7.	37
4.27. Contorno de presión del caso 8.	38
4.28. Contorno de velocidad del caso 8.	38
4.29. Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 8.	39
4.30. Contorno de presión del caso 9.	39
4.31. Contorno de velocidad del caso 9.	40
4.32. Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 9.	40
4.33. Contorno de presión del caso 10.	41
4.34. Contorno de velocidad del caso 10.	41
4.35. Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 10.	42
4.36. Contorno de presión del caso 11.	42
4.37. Contorno de velocidad del caso 11.	43
4.38. Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 11.	43
4.39. Contorno de presión del caso 12.	44
4.40. Contorno de velocidad del caso 12.	44
4.41. Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 12.	45
4.42. Contorno de presión del caso 13.	45
4.43. Contorno de velocidad del caso 13.	46
4.44. Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 13.	46
4.45. Contorno de presión del caso 14.	47
4.46. Contorno de velocidad del caso 14.	47
4.47. Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 14.	48
4.48. Contorno de presión del caso 15.	48
4.49. Contorno de velocidad del caso 15.	49
4.50. Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 15.	49
4.51. Contorno de presión del caso 16.	50
4.52. Contorno de velocidad del caso 16.	50
4.53. Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 16.	51
4.54. Contorno de presión del caso 17.	51
4.55. Contorno de velocidad del caso 17.	52
4.56. Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 17.	52
4.57. Contorno de presión del caso 18.	53
4.58. Contorno de velocidad del caso 18.	53
4.59. Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 18.	54
4.60. Gráficos 3D para el caso 1. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	55
4.61. Gráficos 3D para el caso 2. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	56

4.62. Gráficos 3D para el caso 3. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	56
4.63. Gráficos 3D para el caso 4. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	57
4.64. Gráficos 3D para el caso 5. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	57
4.65. Gráficos 3D para el caso 6. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	58
4.66. Gráficos 3D para el caso 7. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	58
4.67. Gráficos 3D para el caso 8. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	59
4.68. Gráficos 3D para el caso 9. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	59
4.69. Gráficos 3D para el caso 10. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	60
4.70. Gráficos 3D para el caso 11. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	60
4.71. Gráficos 3D para el caso 12. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	61
4.72. Gráficos 3D para el caso 13. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	61
4.73. Gráficos 3D para el caso 14. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	62
4.74. Gráficos 3D para el caso 15. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	62
4.75. Gráficos 3D para el caso 16. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	63
4.76. Gráficos 3D para el caso 17. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	63
4.77. Gráficos 3D para el caso 18. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	64
4.78. Gráficos 3D hasta una altura de 10 metros sobre el techo para el caso 1. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	65
4.79. Gráfico 2D en $z = 150$ [m]. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	66
4.80. Gráfico 2D en $z = 156$ [m]. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	67
4.81. Gráfico 2D en $z = 164$ [m]. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	68
4.82. Gráfico 2D en $z = 170$ [m]. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.	69

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto

En las últimas décadas, una creciente necesidad por recursos energéticos y la existencia de conflictos ambientales causados por el uso de combustibles fósiles han incrementado el interés en el desarrollo de las energías renovables. La energía eólica es una de ellas, que transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica por medio de turbinas eólicas. Estos sistemas ofrecen una serie de ventajas con respecto a los que operan con recursos fósiles, como ser una energía limpia, renovable, prácticamente ilimitada, y replicable a baja escala. Según la base de datos de Global Wind Energy Council (GWEC), la capacidad global de energía eólica a finales del año 2016 se ha multiplicado por 20 desde el 2001 [1], como se observa en la Figura 1.1.

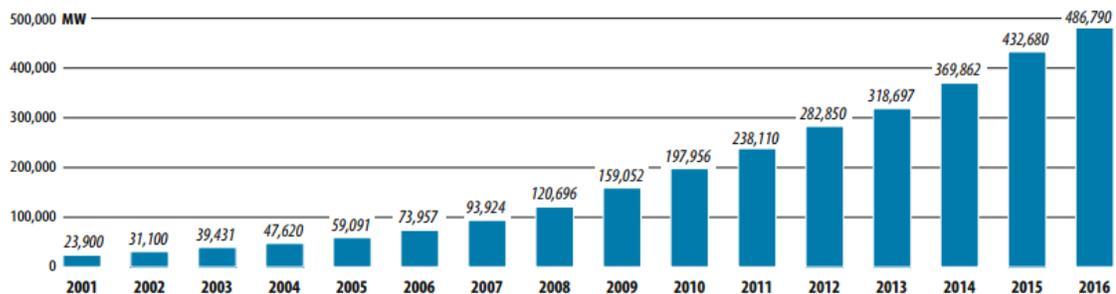


Figura 1.1: Capacidad global acumulada de energía eólica hasta el 2016 (GWEC).

Sin embargo, gran parte de las turbinas eólicas se encuentran ubicadas en áreas rurales o fuera de la costa, por lo que las zonas favorables para el desarrollo de energía eólica van disminuyendo con su ocupación. Además, estas zonas tienen el inconveniente de encontrarse a gran distancia de los consumidores, por lo que existen pérdidas de energía y costos asociados a su transmisión y distribución. Por este motivo, ha surgido el interés por el desarrollo de la energía eólica en medios urbanos, con la cual se genera electricidad cerca del punto de consumo, previniendo pérdidas por transporte y sin requerir instalaciones adicionales para la

distribución de la energía eléctrica generada. No obstante, la ubicación de las turbinas urbanas (o en inglés, *Urban Turbines* o UT) se encuentra restringida por los espacios disponibles y el potencial eólico de un lugar, por lo cual es un tema de estudio importante al considerar integrar una o más turbinas a un ambiente urbano.

La localización de las turbinas eólicas es un tema de gran importancia si se trata de maximizar la generación de energía eléctrica. Una ubicación adecuada permite aprovechar al máximo los recursos presentes en el medio. En áreas urbanas, existen múltiples factores que influyen en el potencial eólico, como lo son edificios, capa límite típica del lugar y rugosidades del suelo de la zona.

Sin embargo, el emplazamiento de turbinas eólicas en medios urbanos depende de más de una variable. Por un lado, se encuentra el potencial eólico, que indica la velocidad del viento presente en el lugar debido a concentración de flujos u otros factores locales. Por otro lado, se encuentra la generación de entropía del flujo de aire afectado por las construcciones adyacentes al punto de interés. Al estudiar estos dos parámetros en un entorno urbano es posible determinar desde un punto de vista más amplio los lugares óptimos para la ubicación de turbinas eólicas.

En el presente trabajo de título se estudian los distintos emplazamientos eólicos dentro de un espacio urbano a través del uso de simulación computacional en software CFD y el análisis de generación de entropía.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo de investigación es determinar el emplazamiento de turbinas eólicas en un medio urbano usando como criterio de calificación la generación de entropía.

1.2.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son:

- Generar un modelo simplificado de una ciudad para realizar una simulación en software CFD.
- Simular la capa límite atmosférica.
- Representar la distribución de potencial eólico de un lugar.
- Obtener la variación de entropía en distintas configuraciones de ciudad.
- Comparar resultados obtenidos con análisis de generación de entropía y sin él.

1.3. Alcances

Entre los alcances de este trabajo de título, se encuentran los siguientes:

- La ciudad se genera como un modelo simplificado en tres dimensiones, con edificios de forma hexaédrica simple dispuestos en configuraciones dadas.
- La simulación se lleva a cabo en el software comercial Ansys Fluent.
- Se realiza un análisis estacionario del flujo en el entorno urbano.
- Para obtener la tasa de generación de entropía se considera una situación con temperatura ambiental constante.
- No se obtienen resultados experimentales en este trabajo.
- El estudio se centra en la parte superior del edificio de interés, no es la paredes laterales.
- Se realiza un análisis cualitativo de los resultados.

Capítulo 2

Antecedentes Generales

La presente sección muestra los antecedentes generales de esta investigación. Inicia introduciendo al tema de las turbinas eólicas, para luego continuar con la capa límite atmosférica y los modelos asociados a ella. Finalmente, se presenta el modelo con que se calcula la generación de entropía en un flujo tridimensional.

2.1. Turbinas Eólicas

El uso de la energía eólica tiene una historia de más de 3000 años de antigüedad, sin embargo, la humanidad empezó a utilizarla para la generación de electricidad hace cerca de 120 años. El desarrollo de la energía eólica siempre ha fluctuado según los precios del petróleo. La tecnología eólica tuvo su primer impulso durante la crisis del petróleo de los años 70, pero luego se este desarrollo se frenó. En las últimas décadas, la energía eólica ha vuelto a crecer rápidamente debido a políticas que se han adoptado en diversos países, con el objetivo de reducir la huella de carbono y obtener energía limpia y renovable. La energía que se consume hoy en día proviene principalmente de turbinas eólicas en tierra en grandes campos eólicos. Sin embargo, hay un creciente interés por la generación eólica fuera de la costa [2] (*offshore* en inglés) debido a que el viento alcanza mayores velocidades y suele ser más constante que en tierra. Así mismo, se ha vuelto interesante el estudio de generar energía eléctrica en las ciudades, que es donde se produce el consumo.

Una turbina eólica es una máquina que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica. Su principio de funcionamiento se basa en que la energía del viento hace girar unas palas dispuestas alrededor de un rotor. El rotor está conectado al eje principal, el cual hace girar un generador para convertir la energía mecánica en electricidad.

El potencial técnico de las turbinas eólicas en tierra es vasto, alcanzando entre 20×10^9 - 50×10^9 GWh por año en el mundo, en contraste con el consumo total anual del mundo de cerca de 15×10^9 GWh en el año 2005. El potencial económico de la energía eólica depende de factores como la velocidad promedio del viento, la distribución estadística de la velocidad del viento, intensidad de la turbulencia y el costo de los sistemas de turbinas eólicas [3].

2.1.1. Tipos de Turbinas Eólicas

Las turbinas eólicas modernas se clasifican básicamente en dos, las de eje horizontal (HAWTs, por su sigla en inglés para *Horizontal Axis Wind Turbines*) y las de eje vertical (VAWTs, por su sigla en inglés para *Vertical Axis Wind Turbines*). A continuación se muestra una breve descripción de cada tipo.

Turbinas de Eje Horizontal

Las turbinas de eje horizontal son aquellas con su eje dispuesto de manera horizontal, paralelo a la dirección del viento (ver Fig. 2.1 [4]). En este caso, el movimiento de las palas se produce debido a la fuerza de sustentación generada por el flujo de viento que las atraviesa. Este tipo de turbinas están compuestas típicamente por dos o tres palas. Las turbinas usadas en campos eólicos tienen tres palas.

Las turbinas de eje horizontal deben estar orientadas en la dirección del viento para generar electricidad, para lo cual se utilizan sensores y servomotores. Las HAWTs son sensibles a los cambios de dirección del viento y a la turbulencia, lo que tiene un efecto negativo en su rendimiento debido a la necesidad de reposicionar la turbina a la dirección del flujo. Las mejores ubicaciones para estas turbinas son los espacios abiertos con flujos suaves de aire y con pocos obstáculos.

El tamaño de estas turbinas crece año a año, llegando a unos 80 metros el largo de las palas de mayores dimensiones, y a alturas de la torre de hasta 160 metros. La tendencia en los últimos años es disponer estas grandes turbinas agrupadas formando los parques eólicos, ubicados generalmente en amplios espacios abiertos.



Figura 2.1: Turbinas de eje horizontal en parque eólico Canela, Chile. Fabricante: Vestas.

Turbinas de Eje Vertical

Las turbinas eólicas de eje vertical son aquellas cuyo eje es perpendicular a la dirección del flujo. En contraste con las turbinas de eje horizontal, su desarrollo ha sido más lento y existe menos experiencia internacional en su uso.

Las VAWTs son típicamente desarrolladas para uso urbano, debido a características propias de este tipo de turbinas que las de eje horizontal no tienen. Por una parte, los cambios de la dirección del viento tienen menos efectos negativos en este tipo de turbina, ya que no necesita ser posicionada en la dirección del flujo. Gracias a esto, las turbinas de eje vertical son útiles para la generación de electricidad en sitios donde la dirección del viento no es constante o donde exista alta turbulencia. Además, las VAWTs son menos ruidosas que las HAWTs, lo que favorece su instalación en medios urbanos. Sin embargo, su eficiencia global al producir electricidad es menor a la de las turbinas de eje horizontal.

Históricamente, estas turbinas han sido divididas en dos categorías de acuerdo al principio usado para captar el flujo de viento: las de tipo Savonius y las de tipo Darrieus. En las de tipo Savonius (ver Fig. 2.2a), el viento empuja las palas, lo que implica que la velocidad de rotación es siempre menor que la velocidad del viento. Por el contrario, la forma del rotor de las de tipo Darrieus (ver Fig. 2.2b) hace posible para el rotor girar más rápido que la velocidad del viento.



(a)



(b)

Figura 2.2: Turbinas eólicas de eje vertical. (a) Turbina tipo Darrieus. Fabricante: Urban Green Energy. (b) Turbina tipo Savonius. Fabricante: Helix Wind.

2.1.2. Turbinas Eólicas en Medios Urbanos

Las turbinas eólicas se han ido adaptando a diversos ambientes, de modo de obtener energía limpia tanto a gran escala como a escala domiciliaria. Las turbinas pequeñas, o turbinas eólicas urbanas, se definen como aquellas especialmente diseñadas para ambientes urbanos, y pueden ser ubicadas en edificios o en el suelo cercano a éstos. Esto implica que estas turbinas han sido adaptadas para el régimen de vientos de una zona urbana, y puede resistir ráfagas de viento y turbulencias. Además, las turbinas han sido diseñadas de manera que su forma y tamaño se integren visualmente a los alrededores de los edificios. La capacidad de turbinas en medios urbanos varía entre 1 y 20 kW [5].

Otro concepto asociado a las turbinas en medios urbanos es el de turbinas eólicas integradas con la presencia de edificios, o turbinas eólicas aumentadas por edificios (BAWTs, por su sigla en inglés *Building Augmented Wind Turbines*). Esta idea nace como una manera de aprovechar la concentración de flujo de aire que se produce por la presencia de edificaciones en las ciudades, aumentando de manera notoria la velocidad del viento en comparación a una zona abierta. En este caso, se identifica tres formas de integración de turbinas [6]:

- Turbina instalada en el techo o zona lateral del edificio (ver Fig. 2.3a);
- Turbina instalada entre edificios en zona de concentración (ver Fig. 2.3b);
- Turbina incorporada al diseño del edificio (ver Fig. 2.3c).

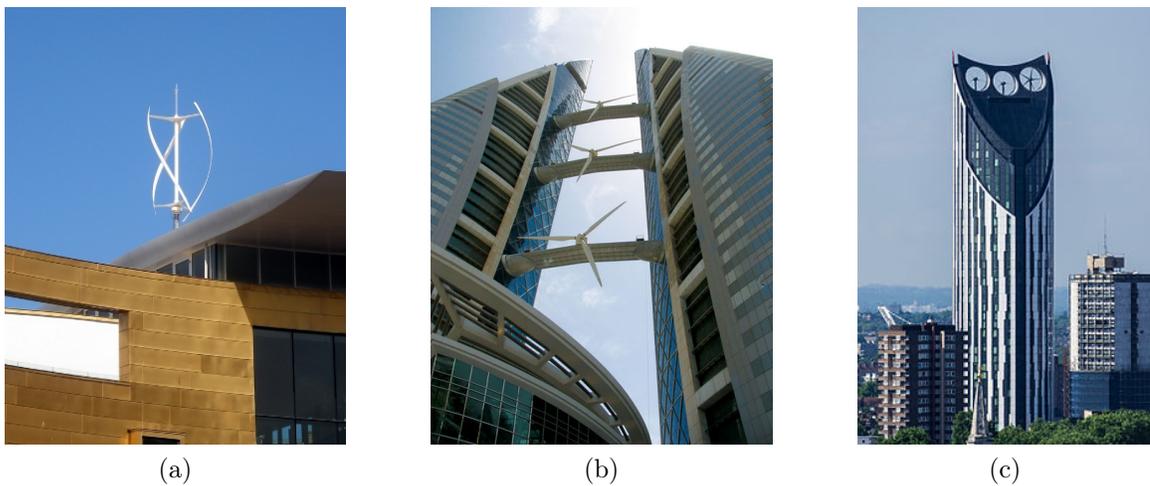


Figura 2.3: Turbinas eólicas en medios urbanos. (a) Turbina instalada en el techo, (b) Turbina instalada entre edificios, y (c) Turbina incorporada al diseño del edificio.

2.2. Capa Límite Atmosférica

La capa límite atmosférica corresponde a la capa de la atmósfera más cercana al suelo terrestre, donde ésta interactúa con los elementos presentes en la superficie. La ABL (por su sigla en inglés de *Atmospheric Boundary Layer*) juega un importante rol en muchos campos, como la contaminación del aire, hidrología, pronóstico del tiempo y clima. Las variaciones dentro de la capa límite son muy altas, sobretodo cerca de la superficie terrestre, debido a que la velocidad de los flujos de aire pasa de ser muy alta a cero producto del roce con los elementos del terreno.

2.2.1. Capa Límite en Ambientes Urbanos

Un entorno urbano, o área urbana, se define como un asentamiento humano con alta densidad de población y una amplia dotación de todo tipo de infraestructuras. Numerosas propiedades del ambiente urbano y la atmósfera influyen la velocidad del viento. Ésta muestra un comportamiento muy complejo, difícil de modelar. Para cumplir con la condición sin deslizamiento en la superficie terrestre, la velocidad del viento decrece a cero en el suelo. El resultado es la capa límite atmosférica (ver Fig. 2.4 [6]).

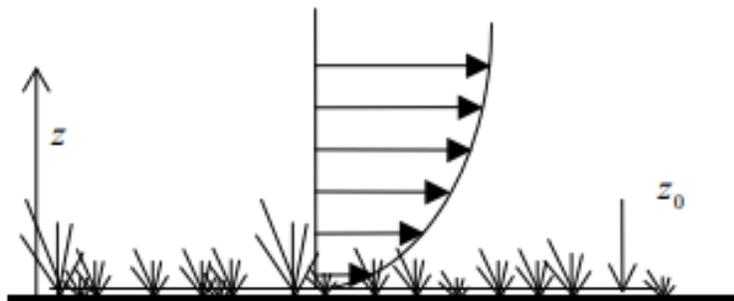


Figura 2.4: Esquema del perfil de velocidad horizontal promedio como una función de la altura z en la capa límite atmosférica desarrollada sobre praderas con una altura de rugosidad z_0 .

La turbulencia mecánica es la principal fuerza motriz para la estructura de la capa límite atmosférica, con una velocidad promedio de 6 metros por segundo a 10 metros de altura [6]. Por sobre esta velocidad del viento, la ABL turbulenta completamente desarrollada es principalmente neutral, y los efectos de la temperatura pueden ser despreciados. Observaciones adicionales muestran que el flujo en la zona neutral de la ABL puede ser dividida en dos regiones de igual esfuerzo cortante pero diferente escala; una capa límite interior y una exterior. Haciendo coincidir el gradiente de velocidad en ambas regiones, resulta el perfil logarítmico para la capa límite atmosférica, o *log-law*, que se observa en la ecuación 2.1.

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (2.1)$$

Donde $u(z)$ denota la velocidad del viento a la altura z , u_* es la velocidad de fricción, κ es la constante de Von Karman tomada como $\kappa = 0,41$, z_0 es la longitud de rugosidad aerodinámica de la superficie terrestre. La *log-law* es válida hasta al menos 150 - 200 metros en una atmósfera neutral con vientos fuertes. La velocidad de fricción se relaciona con el esfuerzo de corte de pared τ_w y la densidad del aire ρ según la ecuación 2.2 [7]. Para ambientes urbanos, existen distintos estudios que presentan valores para el esfuerzo de corte de pared determinados [7].

$$u_*^2 = \frac{\tau_w}{\rho} \quad (2.2)$$

Para un ambiente con mayores rugosidades superficiales, como un ambiente urbano, la *log-law* requiere una modificación. Ajustar la *log-law* con las medidas de velocidad sobre la altura promedio de los elementos de rugosidad muestran un nuevo nivel de superficie virtual en $d + z_0$ por sobre la superficie terrestre (ver Fig. 2.5), donde d es llamada la altura de desplazamiento [6].

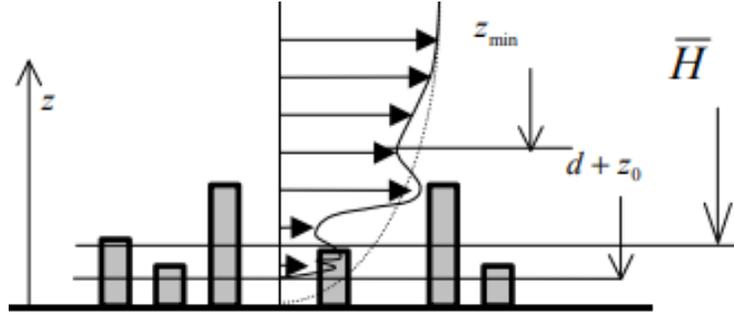


Figura 2.5: Esquema del perfil de velocidad horizontal promedio como una función de la altura z en la capa límite atmosférica desarrollada sobre un ambiente urbano con una altura de rugosidad z_0 .

Entonces, la *log-law* para el ambiente urbano queda como muestra la ecuación 2.3.

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z - d}{z_0} \right) \quad z \geq z_{min} \quad (2.3)$$

Cerca de los elementos de rugosidad, la velocidad del viento es influenciada por la rugosidad local y la *log-law* deja de ser válida. En la Tabla 2.1 se presenta una lista con los valores típicos de longitud de rugosidad aerodinámica z_0 según el tipo de terreno uniforme que se presente [8].

Tabla 2.1: Clasificación del terreno de Davenport (1960) adaptado por Wieringa (1980) en términos de la longitud de rugosidad aerodinámica z_0 .

Descripción del terreno	z_0 [m]
Mar abierto	0.0002
Llanura de marea; nieve; sin vegetación; sin obstáculos	0.005
Terreno abierto plano; pasto; pocos obstáculos aislados	0.03
Cultivos bajos; obstáculos ocasionales grandes	0.1
Cultivos altos; obstáculos dispersos	0.25
Zonas verdes; numerosos obstáculos	0.5
Cobertura regular de grandes obstáculos (bosque, suburbios)	1.0
Centro de la ciudad con altos y bajos edificios	≥ 2.0

2.2.2. Concentración de Flujos Entorno a Edificios

La presencia de construcciones en el medio urbano modifica el flujo de aire localmente, pues éste se ve desviado por las paredes de los edificios y se produce el efecto de concentración alrededor de ellos. Así mismo, se genera una burbuja de separación en el borde de los edificios, mientras más arriba se produce la aceleración del flujo. En la parte posterior y lateral de los edificios se genera una serie de vórtices producto del obstáculo que impide el paso libre del flujo de aire.

El aumento de la velocidad del flujo de aire por la presencia del edificio puede ser medido definiendo el factor de concentración C_f , el cual compara la velocidad en cierto punto con la velocidad del flujo en un ambiente libre a la misma altura. El factor de concentración se define en la ecuación 2.4 [9].

$$C_f = \frac{u(x, y, z)}{u_\infty(z)} \quad (2.4)$$

Donde $u(x, y, z)$ es la velocidad en un punto dado según las coordenadas cartesianas, y $u_\infty(z)$ es la velocidad en un espacio vacío a la misma altura z . Notar que $u_\infty(z)$ corresponde al perfil logarítmico de velocidad en un ambiente urbano para un espacio vacío, dado por la ecuación 2.3.

2.3. Modelos de Turbulencia

El modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ es el más comúnmente usado en fluidodinámica computacional (CFD, por sus siglas en inglés) para simular las características de un flujo en condiciones de flujo turbulento. El modelo $k-\varepsilon$ ha mostrado ser útil para flujos con gradientes de presión relativamente pequeños [10], y se caracteriza por ser robusto, económico y preciso.

Éste incorpora dos ecuaciones de balance en derivadas parciales en las que interrelacionan

la energía cinética del fluido turbulento k y su velocidad de disipación ε al sistema de ecuaciones del fluido. Por medio de estas dos ecuaciones se calculan los valores de estas variables para posteriormente calcular la viscosidad de remolino μ_t , según la ecuación 2.5 [11].

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, k es la energía cinética turbulenta, ε es la tasa de disipación turbulenta y C_μ es una constante del modelo. El modelo consta de cinco constantes dentro de sus ecuaciones, las cuales son C_μ , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k y σ_ε . Sus valores se obtienen a partir de ajustes con datos experimentales, y varían según el tipo de aplicación. Sin embargo, el software ANSYS Fluent, así como otros software de simulación computacional, contienen valores por defecto que aplican a una gran variedad de casos. Estos valores se encuentran en la Tabla 2.2 [12].

Tabla 2.2: Constantes del modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ estándar por defecto.

Constante	Valor por defecto
C_μ	0.09
$C_{1\varepsilon}$	1.44
$C_{2\varepsilon}$	1.92
σ_k	1.0
σ_ε	1.3

2.3.1. Homogeneidad Horizontal de la Capa Límite Atmosférica

Para obtener la homogeneidad horizontal, es necesario ajustar las constantes del modelo de turbulencia $k - \varepsilon$, las cuales se observan en la Tabla 2.3 [7].

Tabla 2.3: Constantes del modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ ajustados para HHABL.

Constante	Valor para HHABL
C_μ	0.028
$C_{1\varepsilon}$	1.5
$C_{2\varepsilon}$	1.92
σ_k	1.67
σ_ε	2.51

2.4. Generación de Entropía

En un sistema de generación de potencia, como lo son las turbinas eólicas, se requiere que en el entorno exista una generación de entropía mínima o un mínimo de destrucción

de la exergía. De este modo, es posible aprovechar el máximo de energía disponible para la generación. Bejan [13] deriva la tasa de generación de entropía local según la ecuación 2.6.

$$S_{gen}''' = \frac{k}{T^2}(\Delta T)^2 + \frac{\mu}{T}\Phi \quad (2.6)$$

Donde k es al conductividad térmica, T es la temperatura absoluta en el punto de evaluación, y μ es la viscosidad dinámica del fluido.

Para el caso tridimensional cartesiano (x, y, z) se tiene la función de disipación viscosa Φ presentada en la ecuación 2.7.

$$\begin{aligned} \Phi = & 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] \\ & + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] \\ & - \frac{2}{3} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right]^2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

Por tanto, la tasa de generación de entropía local es una función de los campos de velocidades del flujo tridimensional, de la temperatura y de la variación de ésta.

Capítulo 3

Metodología

El presente capítulo describe la metodología de investigación utilizada en este trabajo.

3.1. Definición del Problema

El presente trabajo de investigación busca llevar a cabo una serie de simulaciones computacionales en un entorno urbano para el estudio del potencial eólico en una ciudad y la generación de entropía en el flujo de aire producto de la presencia de edificios. De este modo, se determina la ubicación óptima según estos dos parámetros para las turbinas eólicas en un edificio en particular, que es el objeto de estudio.

Las simulaciones del flujo de aire son desarrolladas en el software comercial *Ansys Fluent 17.1*, a través del método de volúmenes finitos. Para llevarlo a cabo, se utiliza un dominio computacional tridimensional, dentro del cual se sitúan los bloques que representan los edificios de una ciudad. Se usan diferentes configuraciones de ciudad al variar tres parámetros, que corresponden a la altura del edificio objetivo, la altura del edificio adyacente y la distancia entre edificios.

Por otro lado, se considera que las simulaciones son estacionarias y que el flujo de aire es incompresible. La turbulencia se resuelve mediante el modelo κ - ε , modificando algunos de sus parámetros de modo de obtener la homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica.

3.2. Entorno Urbano

El entorno urbano a modelar consiste en un volumen de control rectangular, donde se sitúan los edificios de interés. Existen diversos parámetros que definen este espacio, como lo son la rugosidad del suelo dada por la vegetación u otros elementos presentes, y la distancia entre edificios y sus dimensiones. Los tres parámetros a modificar en este caso son la altura del edificio contiguo aguas arriba del edificio de interés (a), la distancia a la que se encuentran

(*b*) y la altura del edificio de interés (*c*), que en todos los casos corresponde al de mayor altura. En el presente trabajo de título se simulan 18 casos con diferentes geometrías, cuyos parámetros se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Parámetros del entorno urbano para cada caso de estudio.

Caso	<i>a</i> [m]	<i>b</i> [m]	<i>c</i> [m]
1	20	10	60
2	20	10	70
3	20	10	80
4	20	20	60
5	20	20	70
6	20	20	80
7	20	40	60
8	20	40	70
9	20	40	80
10	40	10	60
11	40	10	70
12	40	10	80
13	40	20	60
14	40	20	70
15	40	20	80
16	40	40	60
17	40	40	70
18	40	40	80

Los edificios son representados por estructuras de base cuadrada de lado 20 [m] y altura variable. Se simulan 4 edificios en todos los casos de estudio, donde los dos más cercanos a la entrada del flujo son de altura constante igual a 20 [m]. En la Figura 3.1 se observan los parámetros del entorno urbano.

3.3. Dinámica de Fluidos Computacional

3.3.1. Dimensiones del Dominio

El tamaño del dominio computacional en las distintas direcciones depende de las condiciones de borde usadas. La extensión del área construida que se represente en el dominio computacional depende de la influencia de las características en la región de interés. Es decir, si cierta construcción se encuentra a una distancia tal que no influye en el área de interés, entonces ésta no se representa en el dominio computacional. A continuación se describen las dimensiones del dominio computacional en sus distintas direcciones [14].

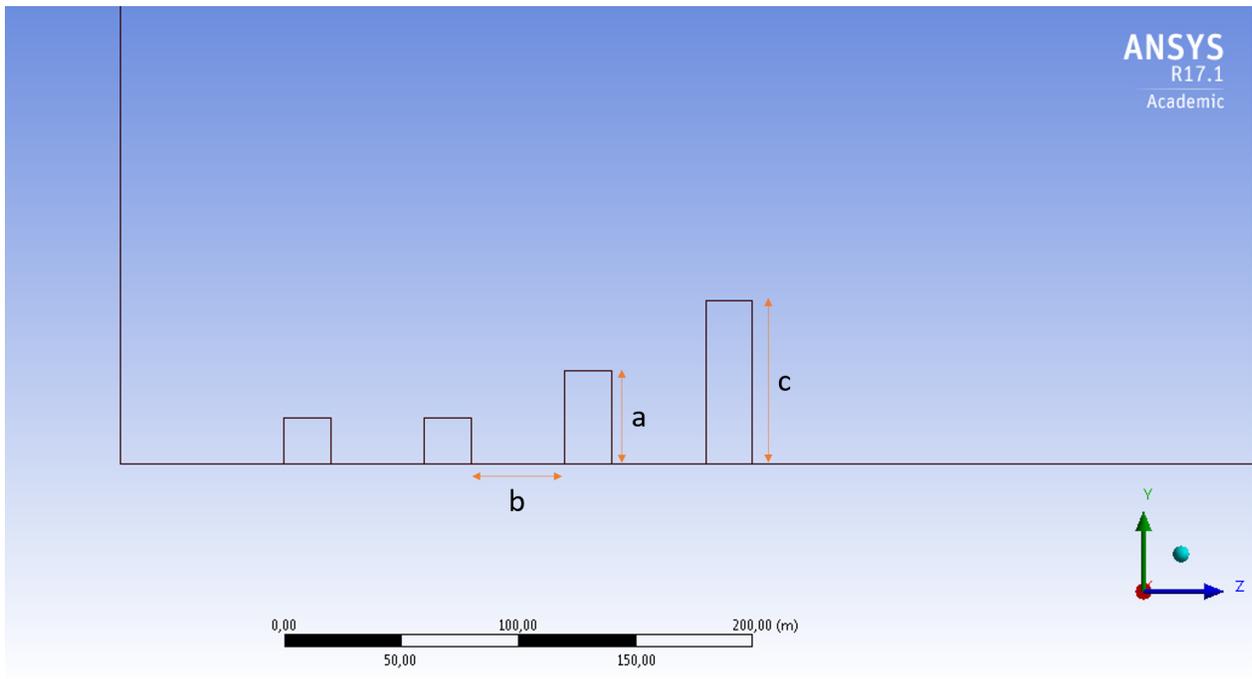


Figura 3.1: Parámetros del entorno urbano.

Extensión Vertical

La extensión vertical debe ser lo suficientemente grande como para evitar la aceleración artificial sobre los edificios debido a las condiciones de borde. Para un bloqueo pequeño, donde el bloqueo se define como la razón entre el área proyectada de los edificios en la sección transversal del flujo y la sección total transversal del flujo, se sugiere una extensión de $4H$, donde H corresponde a la altura del edificio más alto. En la comunidad CFD normalmente se recomienda un bloqueo máximo menor al 3% [14].

Extensión Lateral

Luego de haber definido la altura del dominio computacional, se determina la extensión lateral en base al bloqueo requerido. Al respecto, se recomienda una extensión lateral entre $5H$ y $6H$.

Extensión del Dominio en la Dirección del Flujo

La extensión del dominio en esta dirección se separa en dos partes principales: aguas arriba (donde el flujo se aproxima a los edificios) y aguas abajo (donde el flujo ya ha pasado por los edificios) de la zona de interés. La extensión aguas arriba depende de si los perfiles de entrada son conocidos o si deben desarrollarse en el mismo dominio. Si no son conocidos, se recomienda una entrada previa al medio urbano de $8H$; mientras que si se conocen los perfiles basta con una entrada igual a H . La extensión del dominio aguas abajo se recomienda de

una longitud igual a $15H$ para permitir la estabilización del flujo antes de la salida.

3.3.2. Condiciones de Borde

Las condiciones de borde indican cómo influyen los alrededores del dominio computacional al acotar el problema a este espacio. La elección de éstas es de gran importancia, debido a que si no son las adecuadas se inducen errores de cálculo en la solución. Si las condiciones de borde no son conocidas, como ocurre en algunos casos, entonces se opta por agrandar el dominio de modo de impedir que éstas influyan en el resultado final. A continuación se describen las condiciones de borde para cada zona [7].

Condición de Borde de Entrada

En la entrada del dominio computacional se ingresan los perfiles dados para la velocidad $u(y)$, energía cinética turbulenta $k(y)$ y la tasa de disipación turbulenta $\varepsilon(y)$, de modo que se cumpla la homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica. Esto significa que los perfiles deben mantenerse constantes a lo largo de un dominio sin perturbaciones u obstáculos. El perfil de velocidad horizontal está dado por la ecuación 3.1.

$$u(y) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{y + y_0}{y_0} \right) \quad (3.1)$$

Por otro lado, los perfiles de energía cinética turbulenta $k(y)$ y tasa de disipación turbulenta $\varepsilon(y)$ están dados por las ecuaciones 3.2 y 3.3.

$$k(y) = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \cdot \sqrt{C_1 \cdot \ln \left(\frac{y + y_0}{y_0} \right) + C_2} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon(y) = \frac{u_*^3}{\kappa(y + y_0)} \cdot \sqrt{C_1 \cdot \ln \left(\frac{y + y_0}{y_0} \right) + C_2} \quad (3.3)$$

Donde u_* es la velocidad de fricción, κ es la constante de von Karman igual a 0.41, y_0 es la rugosidad del suelo, C_μ es la constante del modelo de turbulencia, y C_1 y C_2 son constantes obtenidas al ajustar el modelo a las curvas empíricas, con un valor de -0.17 y 1.62 respectivamente [7].

En primera instancia se realizan simulaciones en 3 dominios computacionales vacíos, correspondientes a las 3 alturas del edificio de interés que se estudian. Las simulaciones se realizan con las mismas configuraciones descritas para los dominios con edificios. En la primera simulación de cada dominio, se ingresa como condición de borde de entrada los perfiles de velocidad, energía cinética turbulenta y tasa de disipación turbulenta. Posteriormente, se obtiene el perfil de salida de esta simulación, para luego utilizarlo como perfil de entrada en

la siguiente. Este procedimiento se realiza 5 veces en cada dominio, de lo cual se obtienen los perfiles finales a ser usados como perfiles de entrada en las simulaciones definitivas [7].

Condición de Borde en el Suelo y Edificios

Al suelo y a las paredes de los edificios se le aplica la condición de borde de no deslizamiento o *non-slip*, lo que significa que el flujo no puede pasar a través de estas superficies, y que éste tiene una velocidad nula en contacto con ellas. Además, en estos bordes deben cumplirse las requisitos descritos a continuación.

- La resolución de la malla debe ser lo suficientemente alta.
- Se debe asegurar la homogeneidad de la capa límite atmosférica.
- Debe cumplir la relación dada para la altura de la rugosidad.
- La distancia desde el centro de la primera celda hasta el suelo del dominio (y_p) debe ser mayor a la altura de rugosidad k_s .

Considerando los requisitos mencionados, debe notarse que el primero indica la necesidad de una malla fina, mientras que el último entrega la cota inferior dada para el tamaño de las celdas del suelo, donde $y_p > k_s$. Por otro lado, k_s debe cumplir la relación dada por la ecuación 3.4, donde depende de la longitud de la rugosidad y_0 y de la constante de rugosidad, cuyo valor varía entre 0 y 1. Para facilitar el cumplimiento del primer y último requisito de manera simultánea, se escoge $C_s = 1$.

$$k_s = \frac{9,793 \cdot y_0}{C_s} \quad (3.4)$$

Para el presente trabajo de título se utilizan dos rugosidades distintas. Una corresponde a la del suelo, que reemplaza el efecto del pasto y de pocos obstáculos aislados, y es igual a $y_0 = 0,0306$ [m]. La segunda rugosidad corresponde a la de las superficies de los edificios, la cual es prácticamente lisa y se utiliza $y_0 = 0,000306$ [m]. El primer valor incorporando se obtiene de sugerencias de otros autores [8], mientras que el segundo se asume dos órdenes de magnitud inferior. Estas configuraciones se incluyen al definir las condiciones de borde de pared en ANSYS Fluent. Cabe destacar que la rugosidad de la ciudad está representada geoméricamente por la presencia de edificios, por lo tanto, no es necesario incorporarla al sistema.

Condición de Borde en Bordes Superior y Laterales

En el borde superior y en los bordes laterales se impone la condición de simetría o *symmetry*, lo cual fuerza que el flujo tenga una dirección paralela a las paredes, desapareciendo las componentes normales a éstas. Por esta razón, los bordes deben encontrarse lo suficientemente lejos de la zona de interés para no inducir flujos acelerados en la misma [7].

Condición de Borde de Salida

La condición de borde en la salida del dominio es de salida de flujo o *pressure-outlet*, lo que implica que las derivadas de todas las variables desaparecen para inducir el flujo totalmente desarrollado. Por esta razón, la salida debe estar lo suficientemente lejos para permitir que el flujo se desarrolle a medida que llega a la salida y no genere problemas de convergencia.

3.3.3. Mallado

La malla de un dominio computacional debe ser tal de no inducir a errores en la solución, pero al mismo tiempo, debe no debe exigir más recurso computacional del que se posee. De este modo, la malla debe ser lo suficientemente fina para captar todos los fenómenos físicos que se producen en la zona de interés.

Con respecto a la forma de los elementos, para dominios en que se trabaja con flujos de aire con una dirección predominante se recomienda utilizar mallas con hexaedros en vez de tetraedros, debido a que inducen un menor error de truncamiento y muestran una mejor convergencia al iterar. Así mismo, se prefiere una malla equidistante, es decir, elementos cuyas caras estén a distancias similares unas de otras sin existir estiramientos o alargamientos notorios. Estos parámetros se analizan en Ansys a través del *Skewness* y del *Orthogonal Quality* para una malla dada.

Para el mallado de ciertas zonas, se debe tener en cuenta las condiciones de borde impuestas, como ocurre con el suelo y los edificios, que tienen restricciones específicas con el tamaño de la malla.

3.3.4. Setup ANSYS Fluent

El setup del software depende de las ecuaciones a utilizar para resolver el problema y además del recurso computacional disponible. En esta sección se definen las condiciones generales del problema, como el estado en que se simula por ejemplo. El tipo de simulación es basado en presión, dado que se asume flujo incompresible por la velocidad de trabajo, y son estacionarias para estudiar lo que ocurre en un largo período de tiempo y de forma constante. En la Tabla 3.2 se observa un resumen de las condiciones generales de la simulación.

Tabla 3.2: Setup para el Solver de ANSYS Fluent.

Solver	
Tipo	Basado en presión
Formulación de velocidad	Absoluta
Tiempo	Estacionario

Posteriormente, se configura el modelo de turbulencia a utilizar según lo mostrado en el capítulo 2. En la Tabla 3.3 se aprecian las principales configuraciones del modelo. Tal como

ésta indica, las constantes del modelo seleccionado se ajustan para la simulación de flujo de aire en ambientes urbanos, según lo indicado por la Tabla 2.3.

Tabla 3.3: Configuración del modelo de turbulencia.

Modelo de Turbulencia	
Modelo	$k - \varepsilon$
Modelo $k - \varepsilon$	Estándar
Tratamiento cerca de la pared	Funciones de pared estándar
Constantes	Ajustadas

Las propiedades del aire utilizadas corresponden a las integradas por defecto en el software ANSYS Fluent. A continuación se ajustan las condiciones de borde según lo visto en este mismo capítulo. En primera instancia, se realizan las simulaciones en el dominio computacional vacío con el mismo setup a utilizar para los casos con edificios. La diferencia es la condición de borde de entrada inicial, que consiste en los perfiles de velocidad, energía cinética turbulenta y tasa de disipación turbulenta, los cuales se introducen al sistema por medio de una UDF (por sus siglas en inglés de *User Defined Function*), la cual contiene la información de entrada en el lenguaje computacional C que puede ser interpretado por ANSYS Fluent. Las simulaciones posteriores, tanto en espacios vacíos como en dominios con edificios, tiene como condición de borde de entrada los perfiles de salida de las simulaciones correspondientes.

En cuanto al método de solución, se sigue el esquema SIMPLE y se utiliza la discretización de segundo orden para la presión, momento, energía cinética turbulenta y tasa de disipación turbulenta. En la Tabla 3.4 se aprecia un resumen de estas configuraciones.

Tabla 3.4: Configuración del método de solución.

Método de Solución	
Esquema de acoplamiento	SIMPLE
Gradiente	Least Squares Cell Based
Presión	Second Order
Momento	Second Order Upwind
Energía Cinética Turbulenta	Second Order Upwind
Tasa de Disipación Turbulenta	Second Orden Upwind

Luego, se añaden cuatro monitores, dos en la salida y dos a cinco metros del centro del techo del edificio de interés, los cuales monitorean velocidad y presión estática. Finalmente, se utiliza como método de inicialización la híbrida.

3.3.5. Criterios de Convergencia

Ansyes Fluent realiza iteraciones al resolver numéricamente un conjunto de ecuaciones dadas, partiendo de un valor inicial y aproximando la solución final iteración tras iteración.

Este método iterativo se detiene cuando se alcanza cierto nivel de error determinado por el usuario. Usualmente, se utiliza como criterio de convergencia los residuos de las ecuaciones de interés para el usuario, lo cual está predeterminado por el software en 10^{-3} . Idealmente, estos residuos deben ser cero. Sin embargo, para simulaciones de la naturaleza del presente trabajo se recomienda obtener residuos del orden de 10^{-4} - 10^{-6} .

En conjunto con la observación de los residuos, se implementan monitores que vigilan el comportamiento de variables de interés, como puede ser la velocidad o la presión, en ciertos puntos del dominio. El criterio de convergencia asociado indica que estos valores deben llegar a un valor y permanecer constantes iteración tras iteración.

3.3.6. Homogeneidad de la Capa Límite

Como se menciona anteriormente, se realizan una serie de simulaciones con el objetivo de que el flujo con los perfiles predeterminados se estabilice, alcanzando la homogeneidad horizontal de la capa límite deseado. Luego de cinco simulaciones en un dominio computacional vacío, se obtienen los perfiles finales que ingresan como condición de borde de entrada a la simulación con edificios. La condición para que ese perfil sea el deseado es que los perfiles de entrada y salida para la velocidad, energía cinética turbulenta y tasa de disipación turbulenta coincidan.

3.4. Presentación y Análisis de Resultados

Los resultados de las simulaciones se extraen a través de la herramienta de ANSYS CFD-Post, en la cual se crean cinco planos en YZ (con X siendo el ancho) de 40 metros de altura en una base cuadrada de 20 por 20 metros sobre el edificio de interés. Los resultados de velocidad y derivadas de ésta se obtienen en este volumen, debido a que es la zona de potencial instalación de turbinas eólicas. Los resultados son exportados en un documento de tipo CSV, lo cual posteriormente se trata para obtener un archivo de Excel funcional. Con esta información, se calcula el factor de concentración definido en el capítulo 2 y la generación de entropía. Cabe destacar que por practicidad sólo se calcula la generación de entropía a partir de las derivadas parciales, obviando las constantes que entregan las unidades de medida correspondientes. Se considera como una buena aproximación, debido a que la única variación viene de las derivadas parciales de la velocidad, por lo que permite comparar los casos de buena manera.

Con esta información, se generan gráficos tridimensionales en el software matemático Matlab, que contienen los tres ejes cartesianos, y que presentan tanto el factor de concentración de flujo como la tasa de generación de entropía calculada a partir de las derivadas parciales de la velocidad. El paralelo de estos gráficos permite la visualización de los lugares óptimos para la instalación de turbinas eólicas en medios urbanos.

Posteriormente, para el caso 1 se realizan cortes de los gráficos anteriores y un acercamiento a la zona de interés, que corresponde al volumen sobre el edificio hasta 10 metros de altura

desde el techo. Los cortes se realizan en el sentido del flujo, y se grafican cuatro planos siguiendo la misma metodología anterior, es decir, con círculos representando la magnitud relativa del factor de concentración y de la generación de entropía.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Resultados Simulaciones Computacionales

4.1.1. Dominio Computacional

El dominio computacional resultante para cada caso sigue las indicaciones del capítulo 3. En la Figura 4.1 se observa el dominio computacional del caso 1, con las dimensiones generales en largo, alto y ancho. Además, se incluyen los dos edificios en la entrada de altura constante 20 metros, el edificio de altura variable en tercer lugar, y el edificio de interés en cuarto lugar. Las medidas se realizan desde y hasta las paredes externas de los edificios. El eje X coincide con el ancho del dominio, el eje Z con el largo, y la altura está en el eje Y .

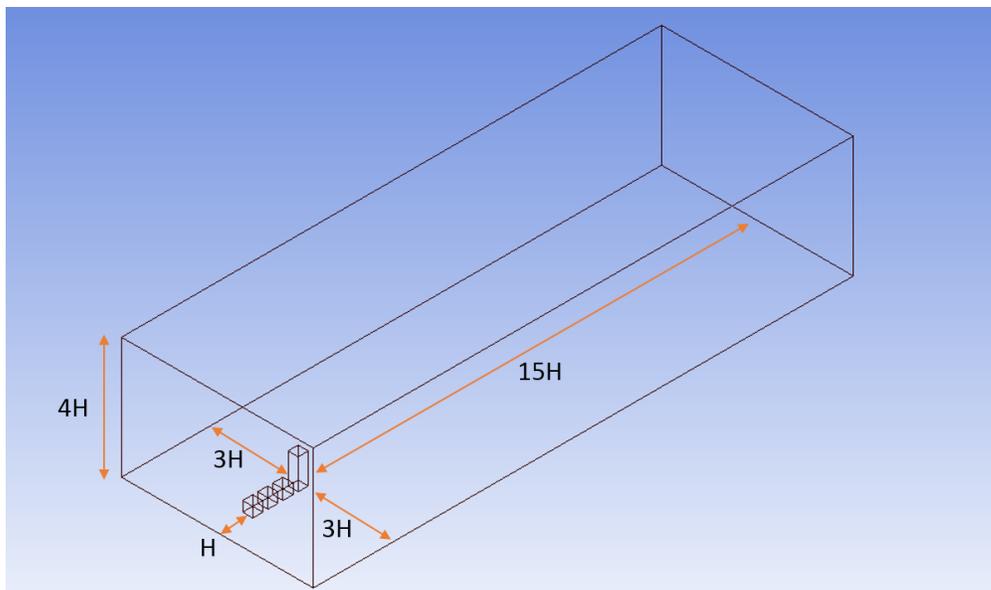
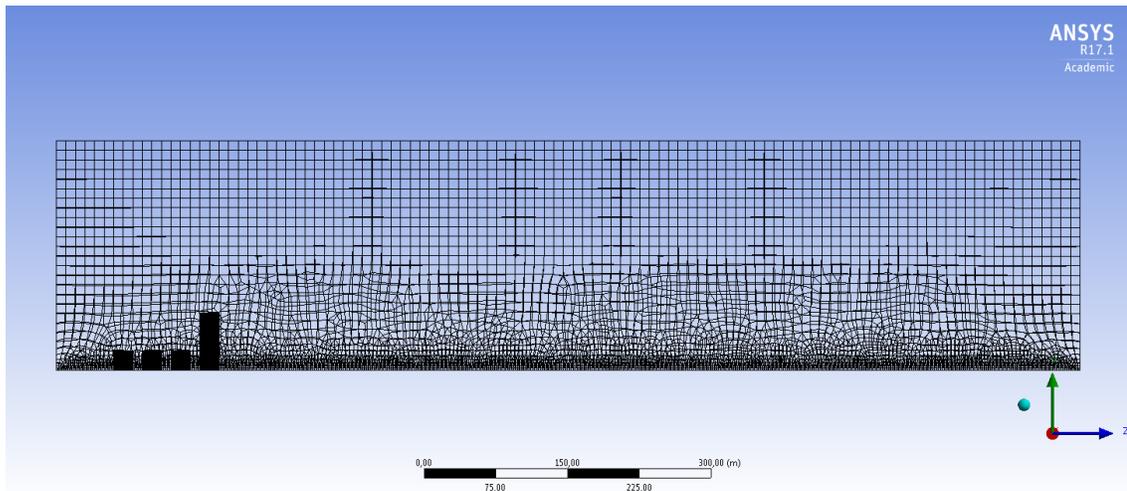


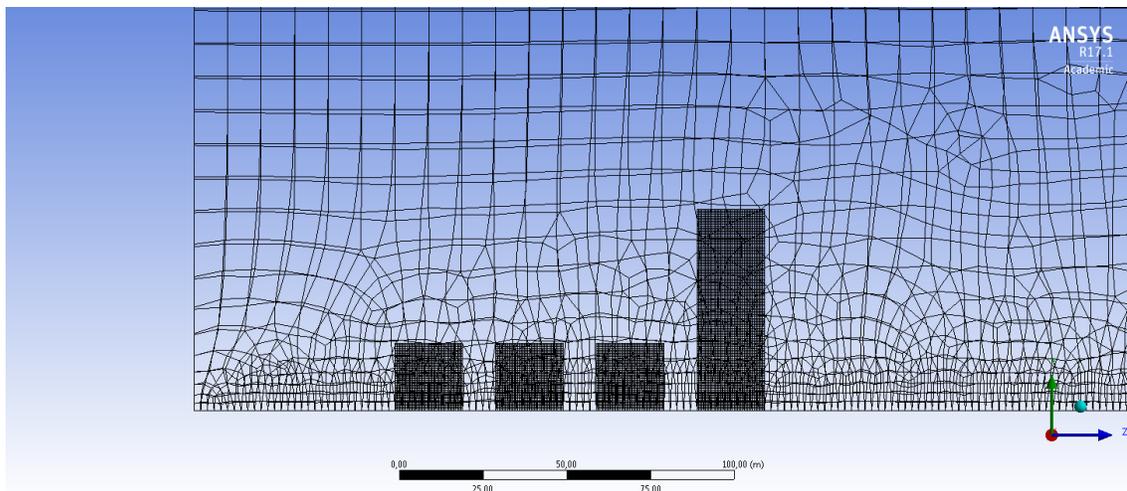
Figura 4.1: Representación del dominio computacional con sus dimensiones, donde H es la altura del edificio de interés.

4.1.2. Mallado

El mallado se realiza siguiendo los parámetros definidos en el capítulo 3. A continuación se presentan los resultados obtenidos para el caso 1. Las Figuras 4.2a y 4.2b muestran el tamaño de los elementos lejos de los edificios igual a 10 metros, y cercano a los edificios, se observa el refinamiento realizado en sus paredes y a nivel de suelo.



(a)



(b)

Figura 4.2: Mallado caso 1. (a) Mallado del dominio. (b) Acercamiento al mallado de los edificios.

Por otro lado, los parámetros de la malla varían según las dimensiones del dominio de cada caso. Con fines prácticos, se muestran los parámetros de la malla del caso 6 en las Tablas 4.1 y 4.2.

Tabla 4.1: Estadísticas de la malla del caso 6.

Estadísticas de malla	
Nodos	3697946
Elementos	4186275

Tabla 4.2: Métricas de la malla del caso 6.

	Mínimo	Promedio	Desviación Estándar	Máximo
Oblicuidad	0.00	0.21	0.29	0.99
Calidad Ortogonal	0.01	0.86	0.25	1.00

4.1.3. Homogeneidad Horizontal de Capa Límite

Como se menciona en el Capítulo 3, la homogeneidad de la capa límite se logra realizando una serie de simulaciones previas en tres tipos de dominios, dados por las tres alturas H que alcanza el edificio de interés, por lo que cada conjunto de casos tiene la misma sección transversal.

Los dominios para estas simulaciones, generados a partir de $H = 60, 70$ y 80 , corresponden a dominios vacíos dentro de los cuales se simula 5 veces los perfiles de la condición de borde de entrada, es decir, se simula en un largo equivalente a $75H$ para cada caso [15].

Para verificar que existe homogeneidad horizontal de la capa límite, se grafica la velocidad, la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación turbulenta tanto en la entrada como en la salida del dominio cada vez que se realiza una simulación. Al coincidir estos perfiles en la entrada y salida del dominio, es que se logra la homogeneidad buscada. En las Figuras 4.3a, 4.3b y 4.3c se observan los perfiles de entrada y salida correspondientes al caso 1. El perfil de salida obtenido es aquel que es usado como perfil de entrada en las simulaciones de los dominios computacionales con edificios.

Se observa que en el perfil de la energía cinética turbulenta existe una leve diferencia entre el perfil de entrada y salida, lo cual indica que no es completamente homogéneo. Sin embargo, dado que los perfiles coinciden en prácticamente todos los puntos, se considera que se logra la homogeneidad horizontal de la capa límite.

4.1.4. Criterio de Convergencia

Tal como se menciona en el capítulo 3, el criterio de convergencia se basa en el monitoreo de dos variables en dos puntos distintos, además del criterio de minimización de los residuos. Para evitar redundancias, se incluye a modo de ejemplo los resultados para el caso 1. En la Figura 4.4 se observan los residuos de la continuidad, la velocidad en X, Y y Z , la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación turbulenta.

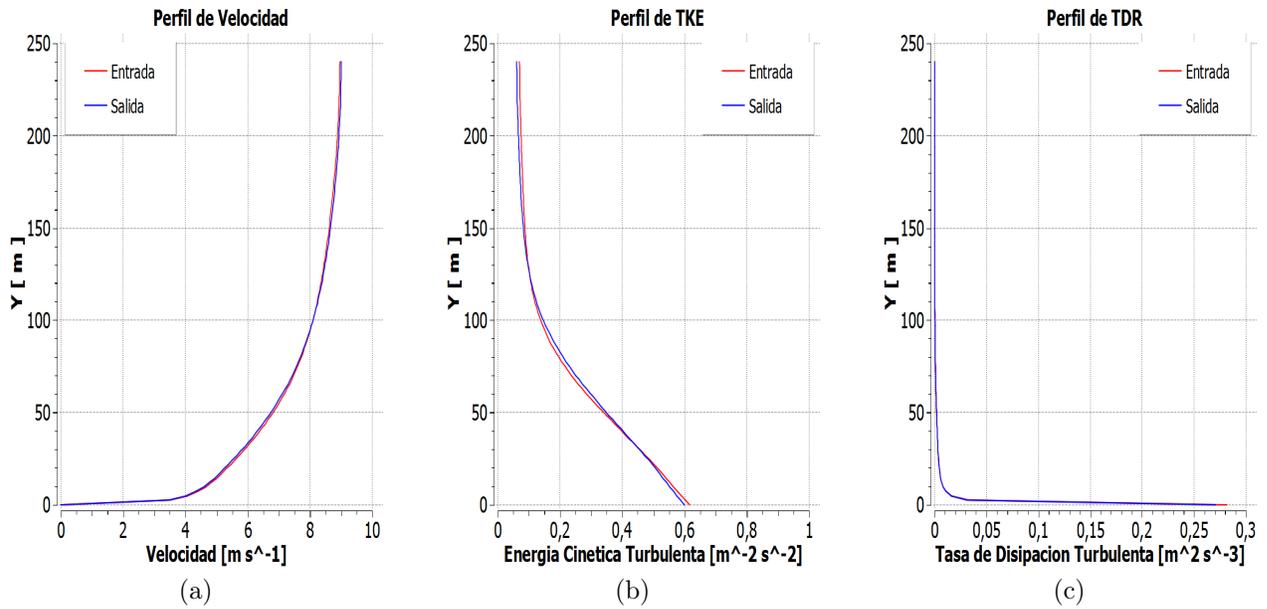


Figura 4.3: Gráficos de perfiles de entrada y salida de un dominio. (a) Perfil de velocidad, (b) Perfil de energía cinética turbulenta, y (c) Perfil de tasa de disipación turbulenta.

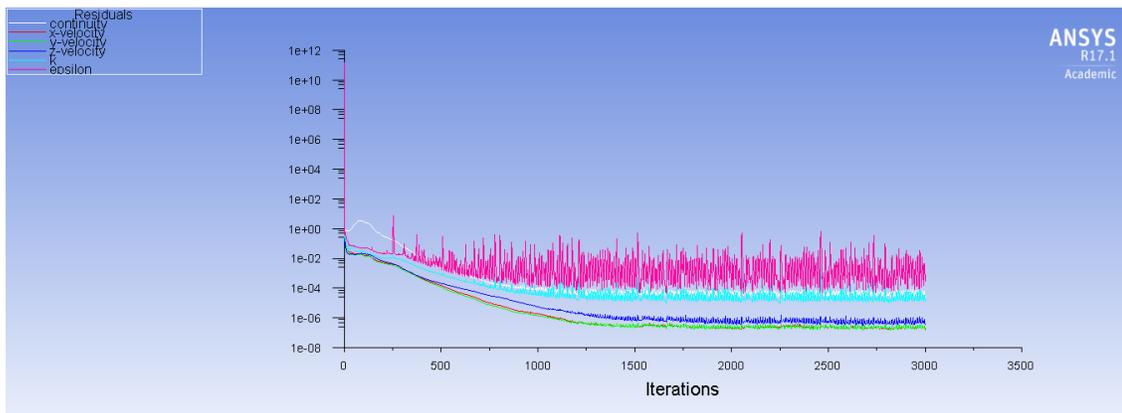
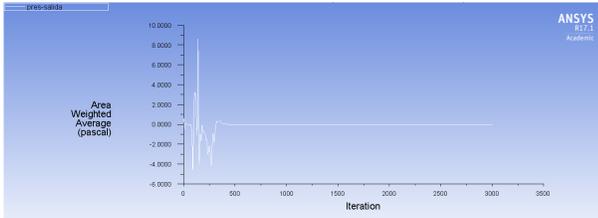


Figura 4.4: Residuos Caso 1.

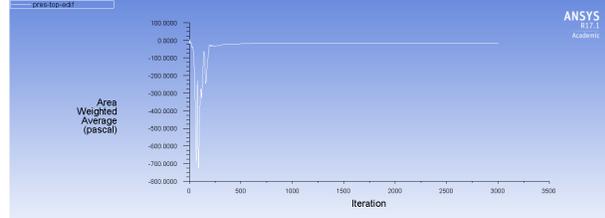
En las Figuras 4.5a, 4.5b, 4.5c y 4.5d se observan los monitores de presión y velocidad en dos puntos, los cuales se estabilizan luego de 1000 iteraciones aproximadamente.

4.1.5. Validación

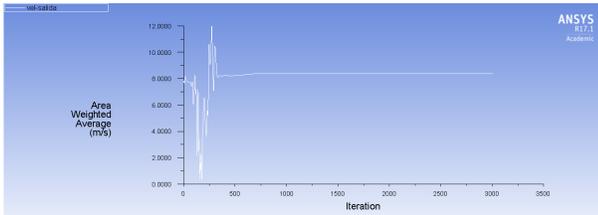
La primera forma de validar los resultados es a través del análisis de flujo másico neto. Para efectos prácticos, se muestra en la Tabla 4.3 a continuación a modo de ejemplo el flujo másico neto del caso 9.



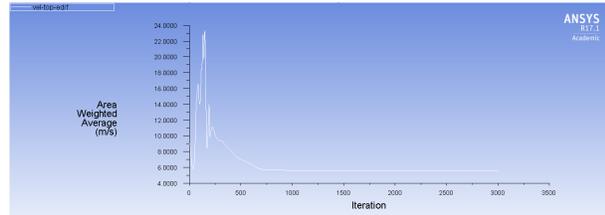
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.5: Monitores de: (a) Presión en la salida. (b) Presión sobre edificio. (c) Velocidad en la salida. (d) Velocidad sobre edificio.

Tabla 4.3: Flujo másico neto para el caso 9.

Flujo másico neto	[kg/s]
Entrada	(+) 1195963.0
Salida	(-) 1195963.1
Neto	(-) 0.07472

Se debe notar que, a simple vista, el flujo másico neto tiene un valor lejano a cero. Sin embargo, considerando las dimensiones del problema y el gran flujo másico de entrada y salida, el flujo neto que debería tender a cero representa una parte mínima de las grandes masas de aire en movimiento. Por tanto, se considera válido. Por otro lado, esta consideración no valida por si misma las simulaciones, sino que representa una condición mínima de validez de una simulación.

4.1.6. Resultados de Casos

En la presente sección se detallan los resultados por caso de las simulaciones computacionales. Para cada caso, se presentan tres figuras que presentan información en el plano de simetría del dominio, correspondiente a $x = 0\text{m}$.

La primera figura corresponde al contorno de presión en todo el dominio, con los vectores de velocidad superpuestos para entender el comportamiento del flujo. En ella, se observa los lugares en que la presión es mayor a la presión atmosférica y aquellos donde es menor. Donde mayor sea el gradiente de presión, el fluido tiene que tener una mayor velocidad y por tanto, son zonas de aceleración. La segunda figura presenta el contorno de la magnitud de la velocidad en el dominio, con los vectores de velocidad en él. Esto permite observar

la influencia de las distintas configuraciones de ciudad en el flujo de aire. La tercera figura presenta las líneas de corriente, provenientes de un área virtual que parte del segundo edificio del dominio. Esta imagen muestra la forma en que es influenciado el flujo por la presencia de los edificios, y la concentración que se produce al pasar por los bordes del edificio principal.

Caso 1: $a = 20\text{m}$, $b = 10\text{m}$, $c = 60\text{m}$

En la Figura 4.6 se observa el contorno de presión en el dominio, donde se aprecia el alza de ésta en la pared frontal del edificio de interés. Esto concuerda con lo esperado, debido a que el flujo impacta en la construcción desviándose a otros puntos. Lo mismo se observa en la pared frontal del primer edificio. Por otra parte, existen zonas de baja presión por sobre el edificio principal, que es donde se acelera el flujo.

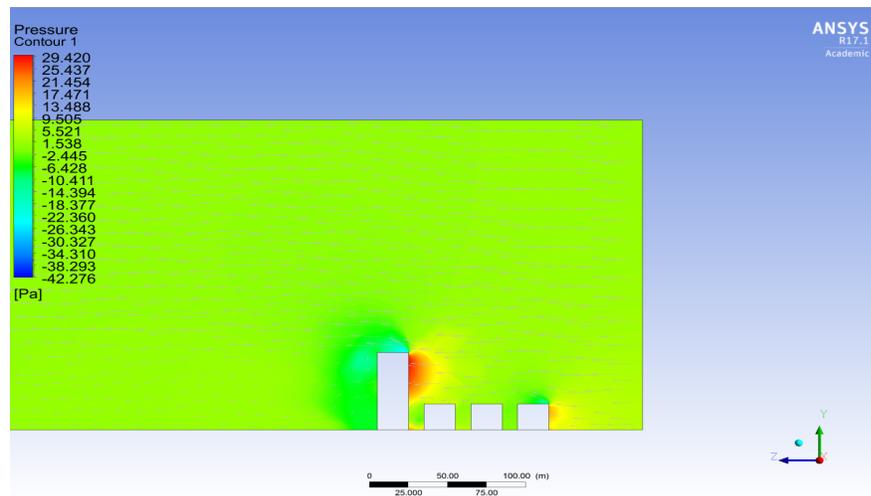


Figura 4.6: Contorno de presión del caso 1.

En la Figura 4.7 se observa claramente el comportamiento del flujo producto de la presencia de obstáculos, acelerándose en la parte superior frontal del edificio principal. Se aprecia zonas de baja velocidad, que corresponde a la recirculación, aguas abajo de los edificios. Finalmente, se observa como se reestablece el flujo luego de pasar por la zona urbana.

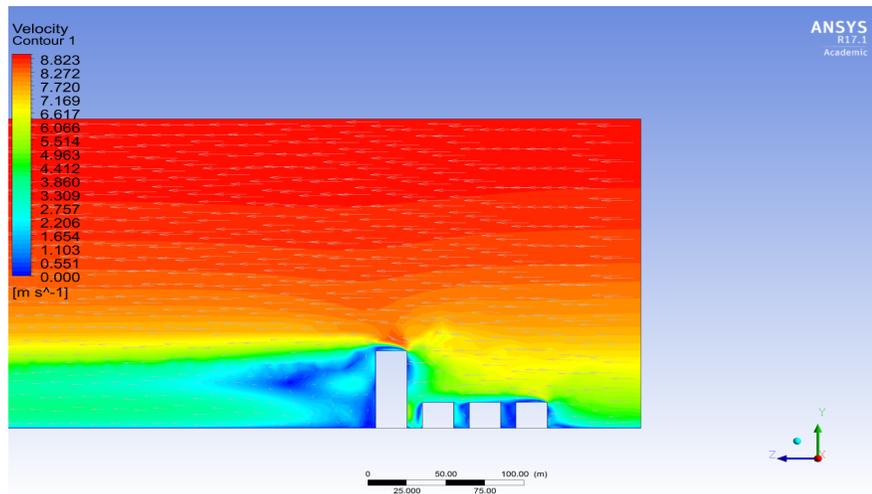


Figura 4.7: Contorno de velocidad del caso 1.

En la Figura 4.8 se aprecia el flujo acelerado por la presencia del edificio principal, generándose las líneas de corriente de color rojizo en los bordes de éste. En la parte posterior, se observan como el flujo se reestablece luego de tener una especie de burbuja de recirculación.

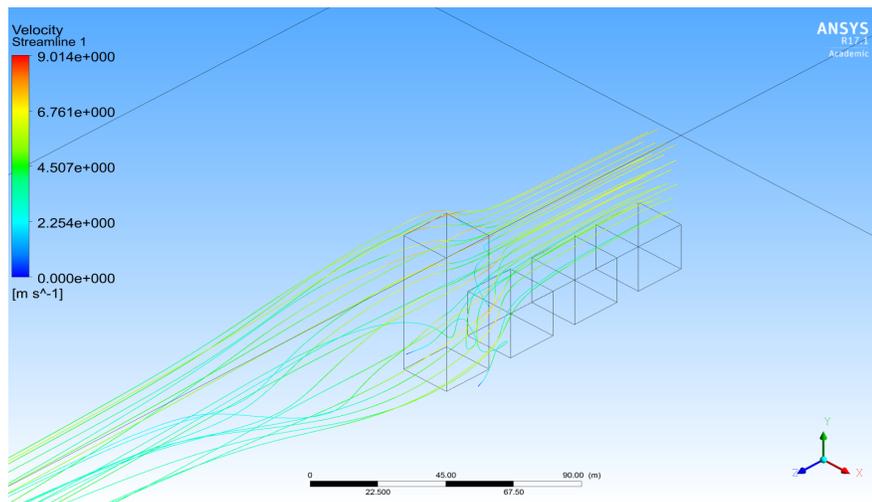


Figura 4.8: Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 1.

Caso 2: $a = 20\text{m}$, $b = 10\text{m}$, $c = 70\text{m}$

En la Figura 4.9 se observa el contorno de presión en el dominio, donde se aprecia el alza de ésta en la pared frontal del edificio de interés. Esto concuerda con lo esperado, debido a que el flujo impacta en la construcción desviándose a otros puntos. Lo mismo se observa en la pared frontal del primer edificio. Por otra parte, existen zonas de baja presión por sobre el edificio principal, que es donde se acelera el flujo.

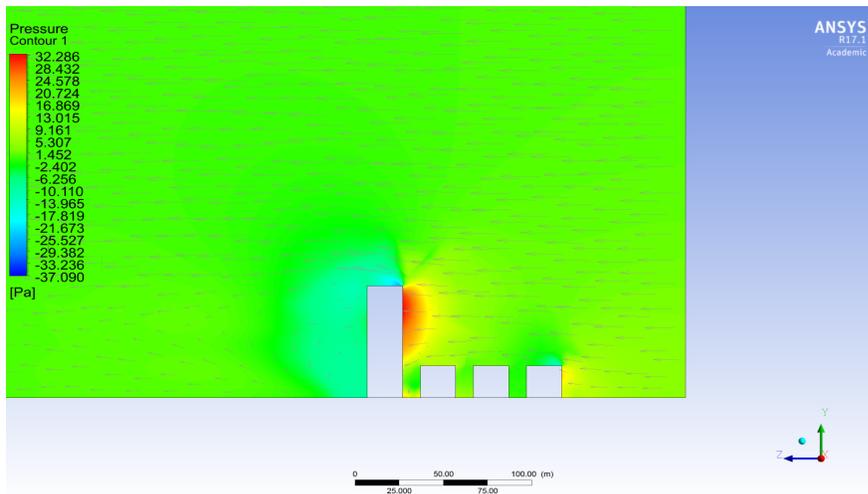


Figura 4.9: Contorno de presión del caso 2.

En la Figura 4.10 se observa claramente el comportamiento del flujo producto de la presencia de obstáculos, acelerándose en la parte superior frontal del edificio principal. Se aprecia zonas de baja velocidad, que corresponde a la recirculación, aguas abajo de los edificios. Finalmente, se observa como se reestablece el flujo luego de pasar por la zona urbana.

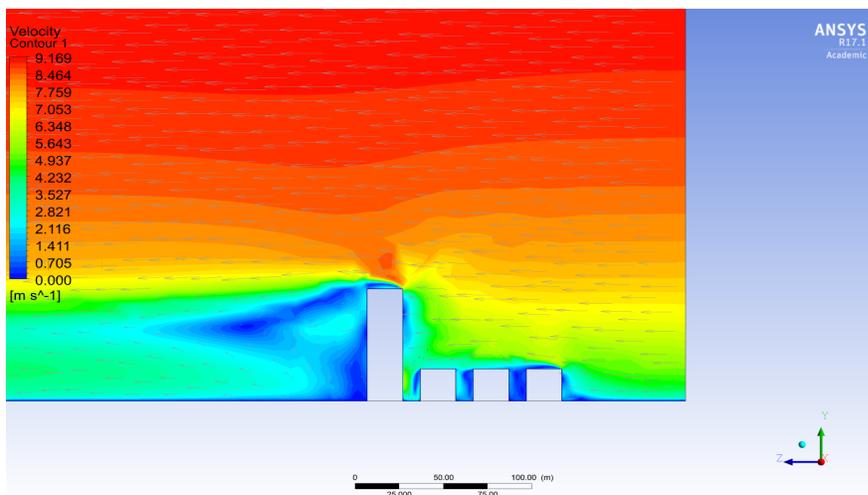


Figura 4.10: Contorno de velocidad del caso 2.

En la Figura 4.11 se aprecia el flujo acelerado por la presencia del edificio principal, generándose las líneas de corriente de color rojizo en los bordes de éste. A diferencia del caso anterior, se observa notoriamente la burbuja de recirculación en la zona posterior del edificio, lo cual entorpece el reestablecimiento del flujo.

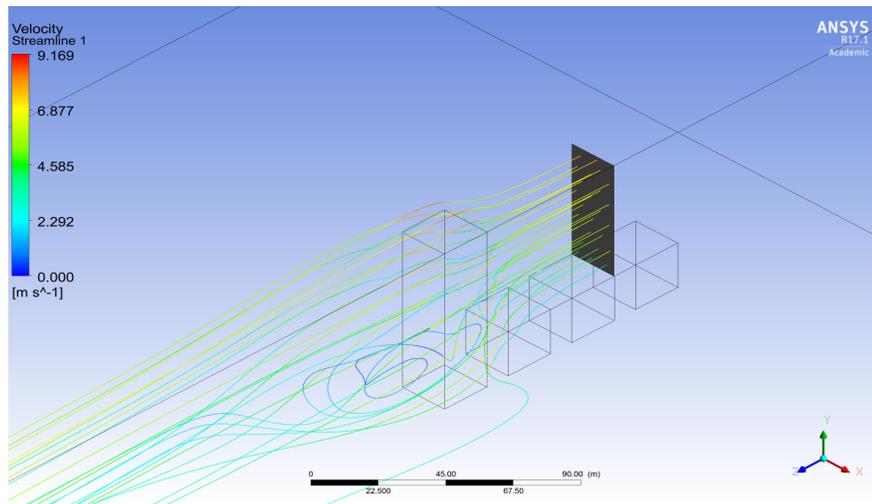


Figura 4.11: Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 2.

Caso 3: $a = 20\text{m}$, $b = 10\text{m}$, $c = 80\text{m}$

En la Figura 4.12 se observa el contorno de presión en el dominio, donde se aprecia el alza de ésta en la pared frontal del edificio de interés. Esto concuerda con lo esperado, debido a que el flujo impacta en la construcción desviándose a otros puntos. Lo mismo se observa en la pared frontal del primer edificio. Por otra parte, existen zonas de baja presión por sobre el edificio principal, que es donde se acelera el flujo.

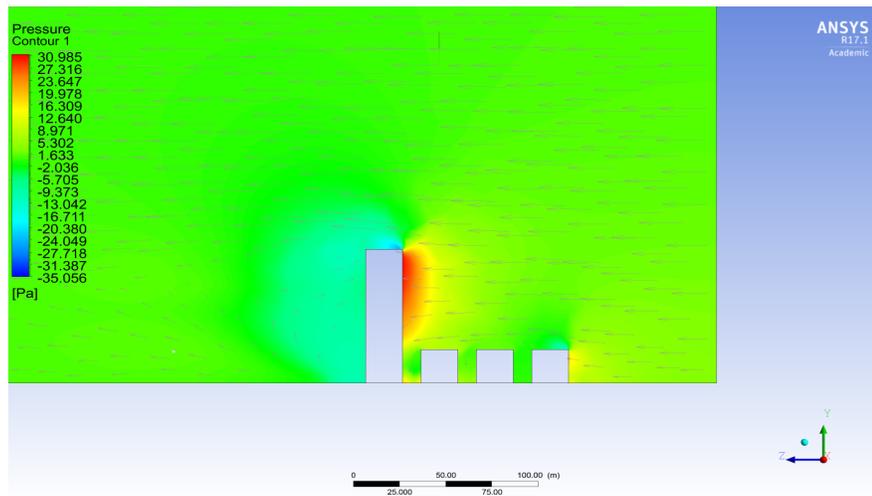


Figura 4.12: Contorno de presión del caso 3.

En la Figura 4.13 se observa claramente el comportamiento del flujo producto de la presencia de obstáculos, acelerándose en la parte superior frontal del edificio principal. Se aprecia zonas de baja velocidad, que corresponde a la recirculación, aguas abajo de los edificios. Finalmente, se observa como se reestablece el flujo luego de pasar por la zona urbana.

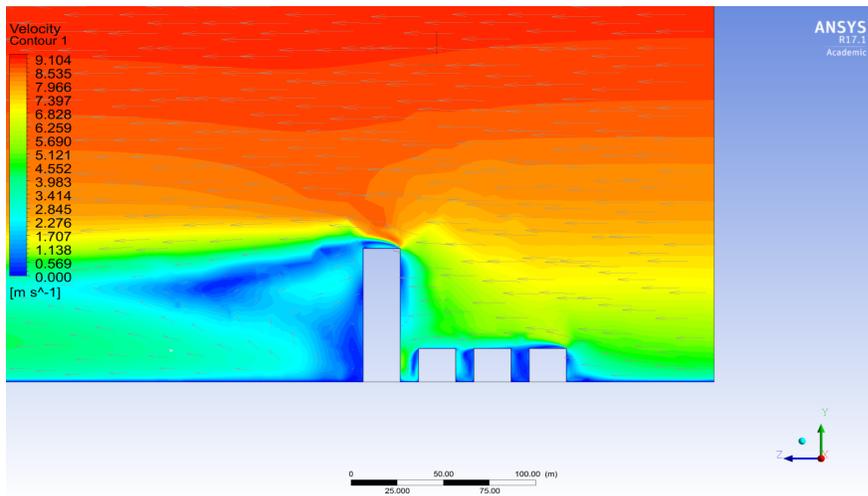


Figura 4.13: Contorno de velocidad del caso 3.

En la Figura 4.14 se aprecia el flujo acelerado por la presencia del edificio principal, generándose las líneas de corriente de color rojizo en los bordes de éste. En la parte posterior, se observan como el flujo se reestablece luego de tener una especie de burbuja de recirculación. Al igual que el caso anterior, se aprecia una gran burbuja de recirculación por la mayor altura del edificio.

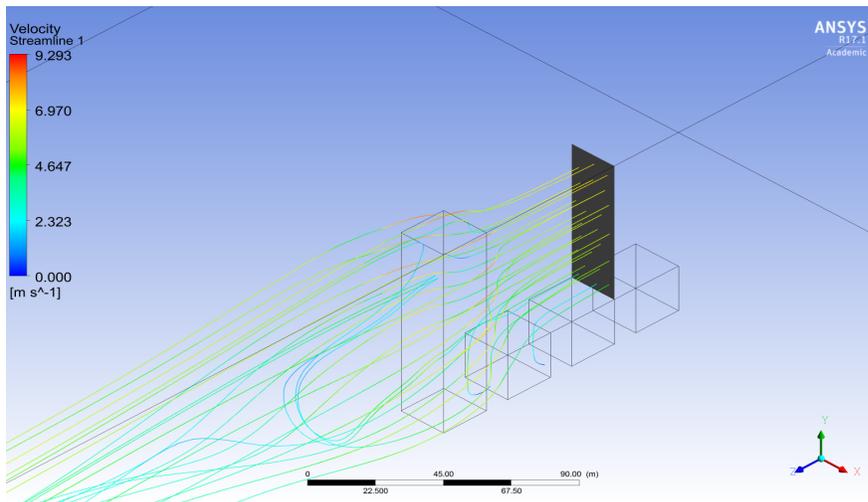


Figura 4.14: Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 3.

Caso 4: $a = 20\text{m}$, $b = 20\text{m}$, $c = 60\text{m}$

En la Figura 4.15 se observa el contorno de presión en el dominio, donde se aprecia el alza de ésta en la pared frontal del edificio de interés. Esto concuerda con lo esperado, debido a que el flujo impacta en la construcción desviándose a otros puntos. Lo mismo se observa en la pared frontal del primer edificio. Por otra parte, existen zonas de baja presión por sobre el edificio principal, que es donde se acelera el flujo.

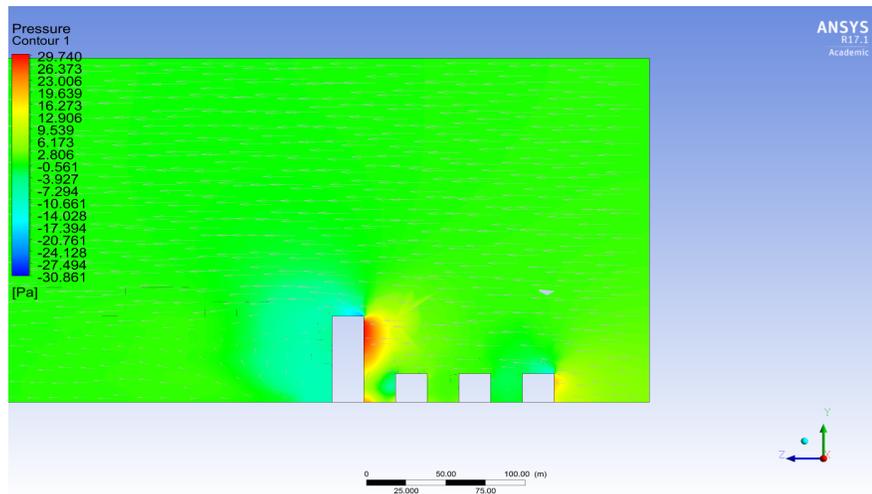


Figura 4.15: Contorno de presión del caso 4.

En la Figura 4.16 se observa claramente el comportamiento del flujo producto de la presencia de obstáculos, acelerándose en la parte superior frontal del edificio principal. Se aprecia zonas de baja velocidad, que corresponde a la recirculación, aguas abajo de los edificios. Finalmente, se observa como se reestablece el flujo luego de pasar por la zona urbana. Notar que el flujo posterior al edificio contiene más vórtices que el caso 1 al variar la distancia entre edificios.

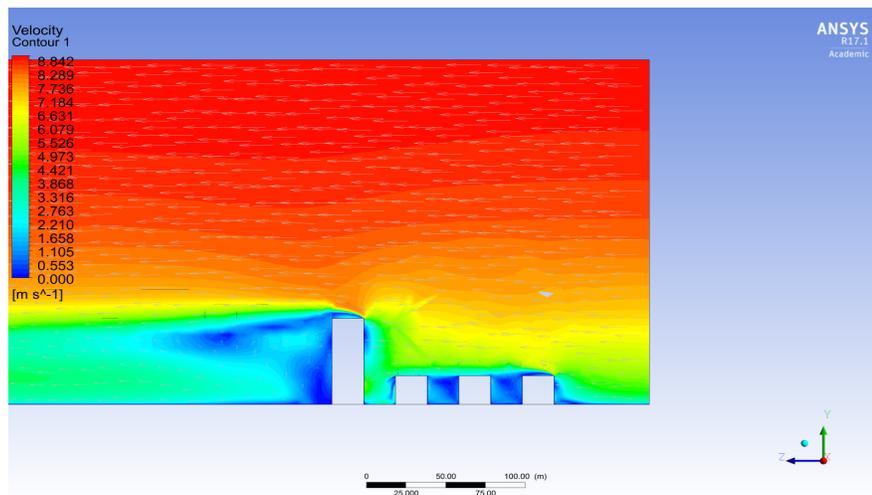


Figura 4.16: Contorno de velocidad del caso 4.

En la Figura 4.17 se aprecia el flujo acelerado por la presencia del edificio principal, generándose las líneas de corriente de color rojizo en los bordes de éste. A diferencia del caso anterior, se observa notoriamente la burbuja de recirculación en la zona posterior del edificio, lo cual entorpece el reestablecimiento del flujo.

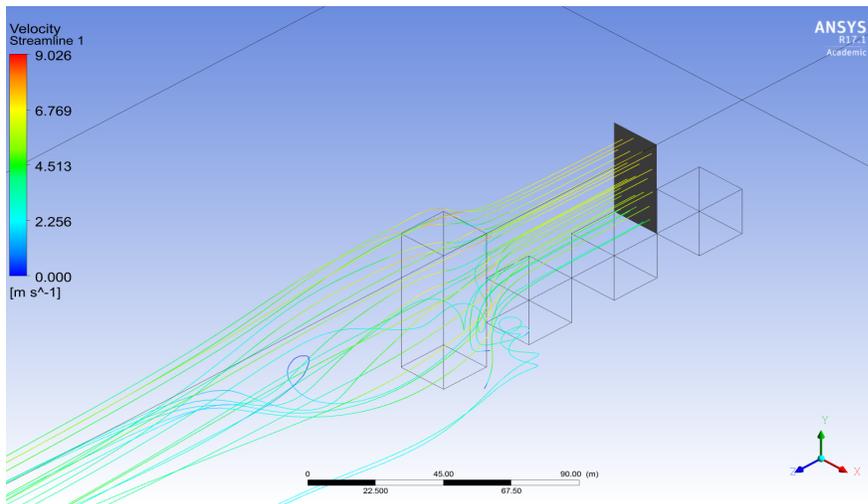


Figura 4.17: Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 4.

Caso 5: $a = 20\text{m}$, $b = 20\text{m}$, $c = 70\text{m}$

En la Figura 4.18 se observa el contorno de presión en el dominio, donde se aprecia el alza de ésta en la pared frontal del edificio de interés. Esto concuerda con lo esperado, debido a que el flujo impacta en la construcción desviándose a otros puntos. Lo mismo se observa en la pared frontal del primer edificio. Por otra parte, existen zonas de baja presión por sobre el edificio principal, que es donde se acelera el flujo.

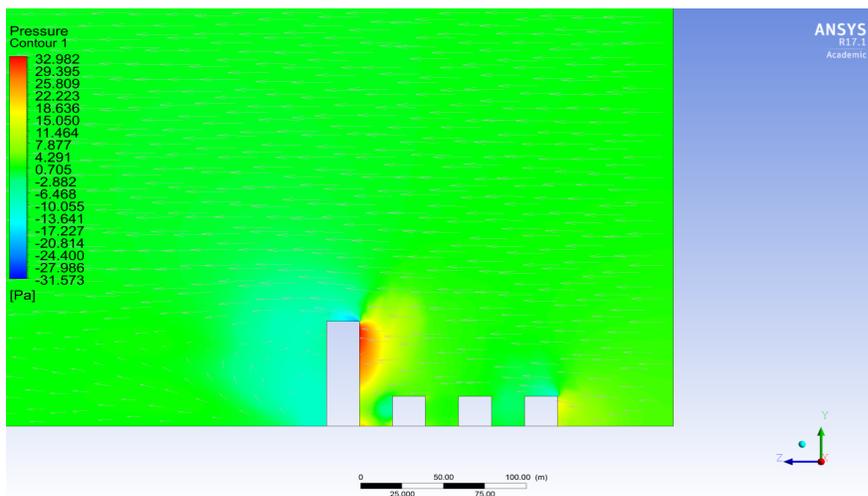


Figura 4.18: Contorno de presión del caso 5.

En la Figura 4.19 se observa claramente el comportamiento del flujo producto de la presencia de obstáculos, acelerándose en la parte superior frontal del edificio principal. Se aprecia zonas de baja velocidad, que corresponde a la recirculación, aguas abajo de los edificios. Finalmente, se observa como se reestablece el flujo luego de pasar por la zona urbana.

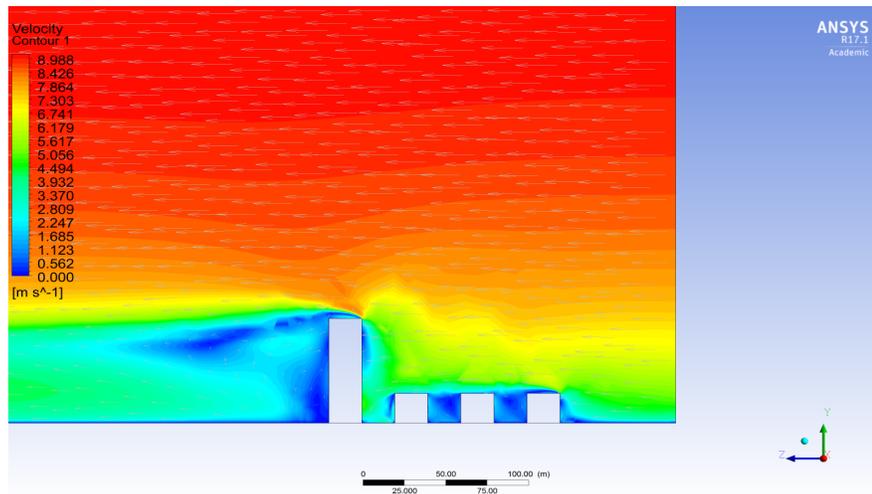


Figura 4.19: Contorno de velocidad del caso 5.

En la Figura 4.20 se aprecia el flujo acelerado por la presencia del edificio principal, generándose las líneas de corriente de color rojizo en los bordes de éste. En la parte posterior, se observan como el flujo se reestablece luego de tener una especie de burbuja de recirculación. Al igual que antes, se observa el flujo con vórtices luego de pasar por el edificio principal.

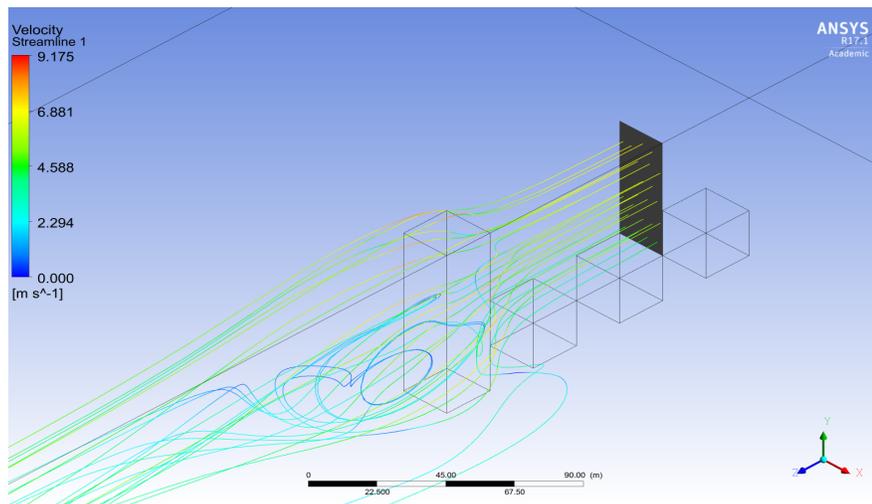


Figura 4.20: Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 5.

Caso 6: $a = 20\text{m}$, $b = 20\text{m}$, $c = 80\text{m}$

En la Figura 4.21 se observa el contorno de presión en el dominio, donde se aprecia el alza de ésta en la pared frontal del edificio de interés. Esto concuerda con lo esperado, debido a que el flujo impacta en la construcción desviándose a otros puntos. Lo mismo se observa en la pared frontal del primer edificio. Por otra parte, existen zonas de baja presión por sobre el edificio principal, que es donde se acelera el flujo.

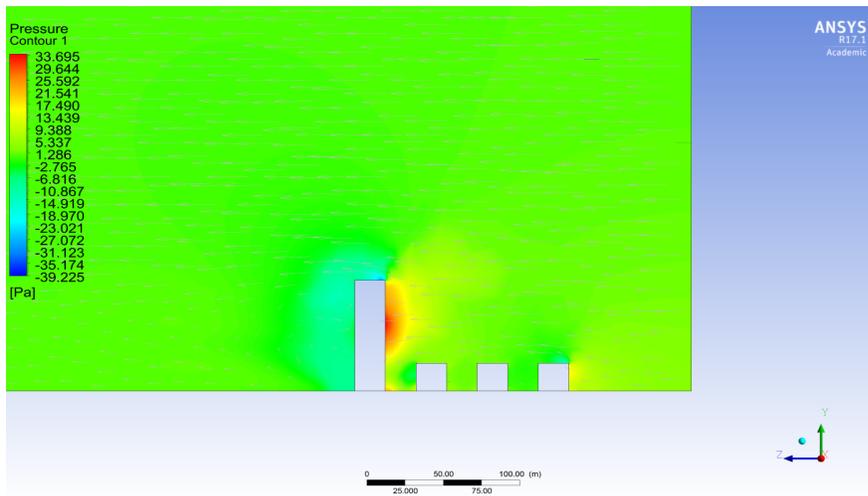


Figura 4.21: Contorno de presión del caso 6.

En la Figura 4.22 se observa claramente el comportamiento del flujo producto de la presencia de obstáculos, acelerándose en la parte superior frontal del edificio principal. Se aprecia zonas de baja velocidad, que corresponde a la recirculación, aguas abajo de los edificios. Finalmente, se observa como se reestablece el flujo luego de pasar por la zona urbana.

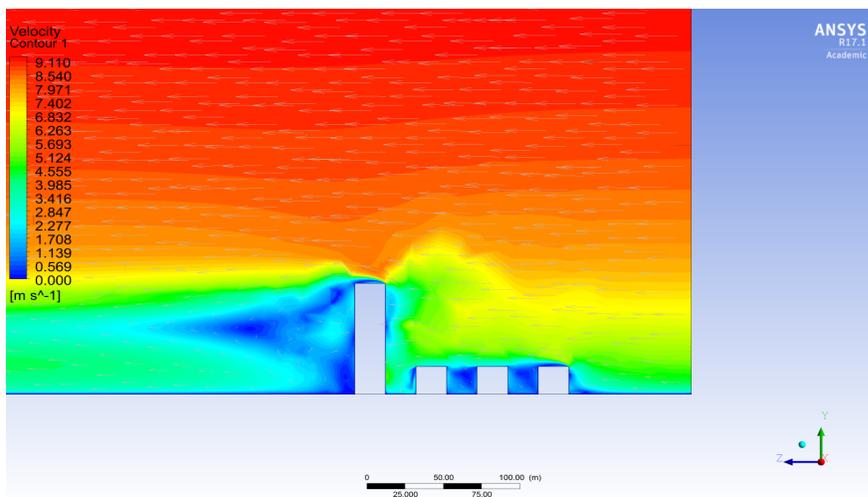


Figura 4.22: Contorno de velocidad del caso 6.

En la Figura 4.23 se aprecia el flujo acelerado por la presencia del edificio principal, generándose las líneas de corriente de color rojizo en los bordes de éste. También se observa notoriamente la burbuja de recirculación en la zona posterior del edificio, lo cual entorpece el reestablecimiento del flujo.

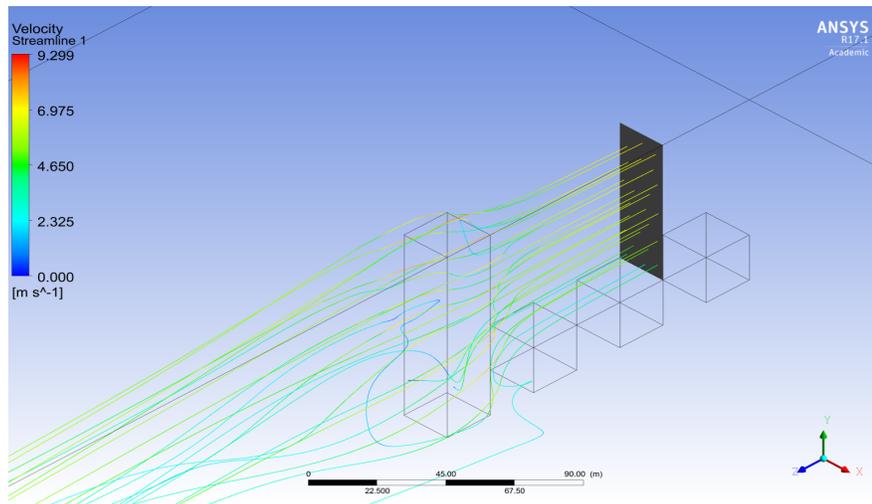


Figura 4.23: Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 6.

Caso 7: $a = 20\text{m}$, $b = 40\text{m}$, $c = 60\text{m}$

En la Figura 4.24 se observa el contorno de presión en el dominio, donde se aprecia el alza de ésta en la pared frontal del edificio de interés. Esto concuerda con lo esperado, debido a que el flujo impacta en la construcción desviándose a otros puntos. Lo mismo se observa en la pared frontal del primer edificio. Por otra parte, existen zonas de baja presión por sobre el edificio principal, que es donde se acelera el flujo.

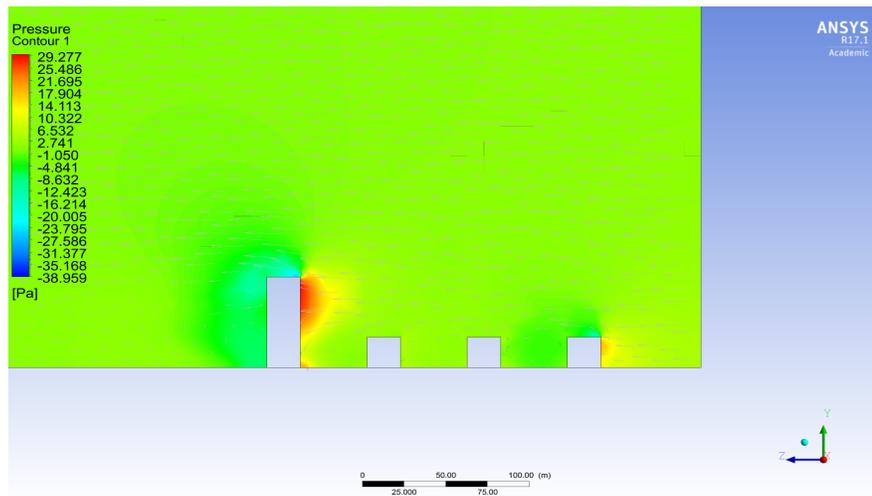


Figura 4.24: Contorno de presión del caso 7.

En la Figura 4.25 se observa claramente el comportamiento del flujo producto de la presencia de obstáculos, acelerándose en la parte superior frontal del edificio principal. Se aprecia zonas de baja velocidad, que corresponde a la recirculación, aguas abajo de los edificios. Finalmente, se observa como se reestablece el flujo luego de pasar por la zona urbana.

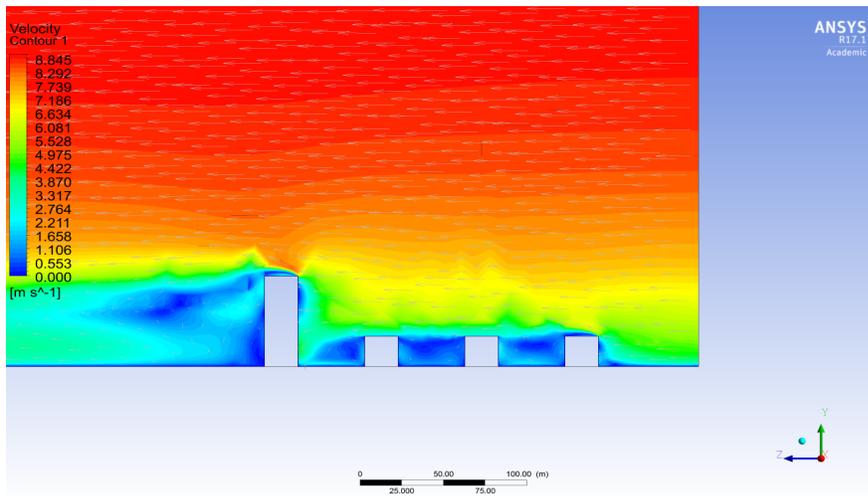


Figura 4.25: Contorno de velocidad del caso 7.

En la Figura 4.26 se aprecia el flujo acelerado por la presencia del edificio principal, generándose las líneas de corriente de color rojizo en los bordes de éste. También se observa notoriamente la burbuja de recirculación en la zona posterior del edificio, lo cual entorpece el reestablecimiento del flujo.

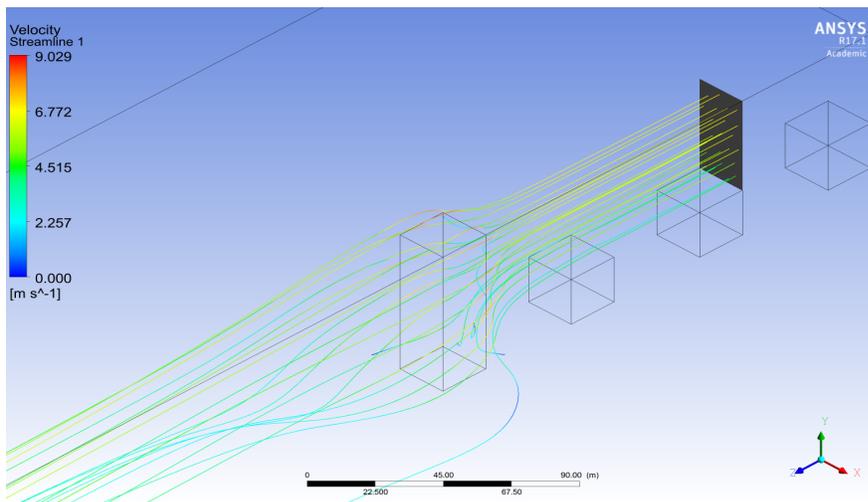


Figura 4.26: Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 7.

Caso 8: $a = 20\text{m}$, $b = 40\text{m}$, $c = 70\text{m}$

En la Figura 4.27 se observa el contorno de presión en el dominio, donde se aprecia el alza de ésta en la pared frontal del edificio de interés. Esto concuerda con lo esperado, debido a que el flujo impacta en la construcción desviándose a otros puntos. Lo mismo se observa en la pared frontal del primer edificio. Por otra parte, existen zonas de baja presión por sobre el edificio principal, que es donde se acelera el flujo.

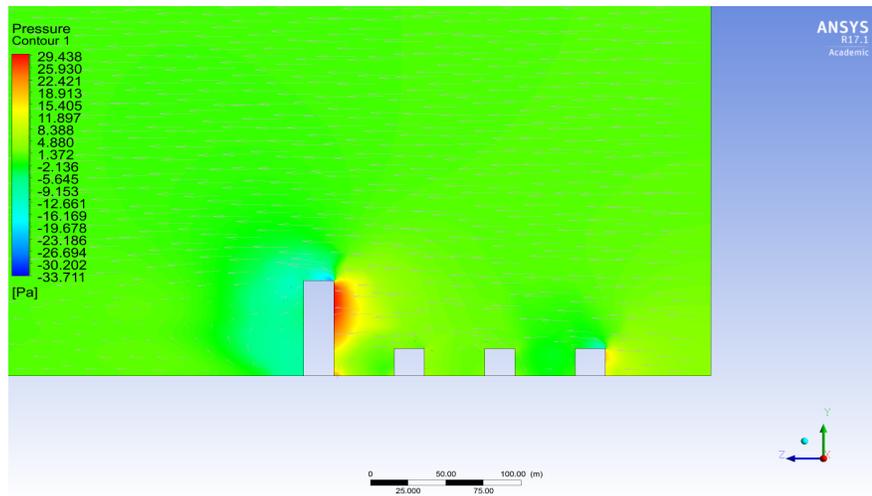


Figura 4.27: Contorno de presión del caso 8.

En la Figura 4.28 se observa claramente el comportamiento del flujo producto de la presencia de obstáculos, acelerándose en la parte superior frontal del edificio principal. Se aprecia zonas de baja velocidad, que corresponde a la recirculación, aguas abajo de los edificios. Finalmente, se observa como se reestablece el flujo luego de pasar por la zona urbana.

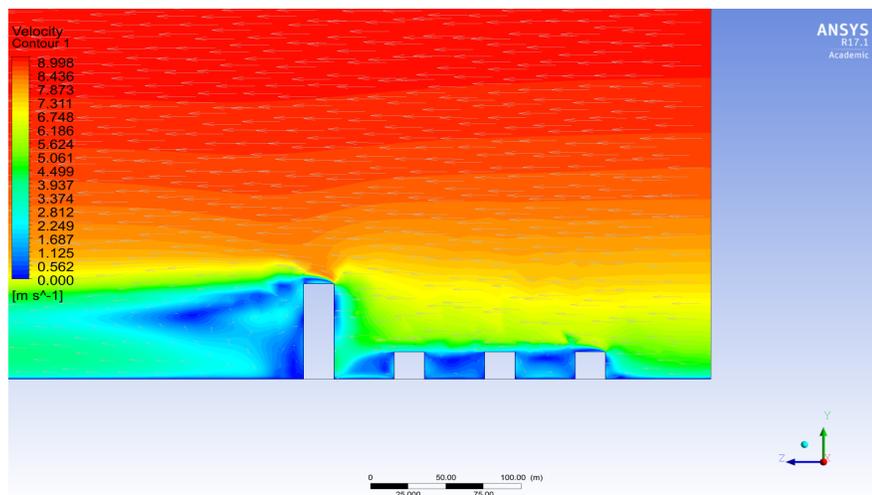


Figura 4.28: Contorno de velocidad del caso 8.

En la Figura 4.29 se aprecia el flujo acelerado por la presencia del edificio principal, generándose las líneas de corriente de color rojizo en los bordes de éste. También se observa notoriamente la burbuja de recirculación en la zona posterior del edificio, lo cual entorpece el reestablecimiento del flujo.

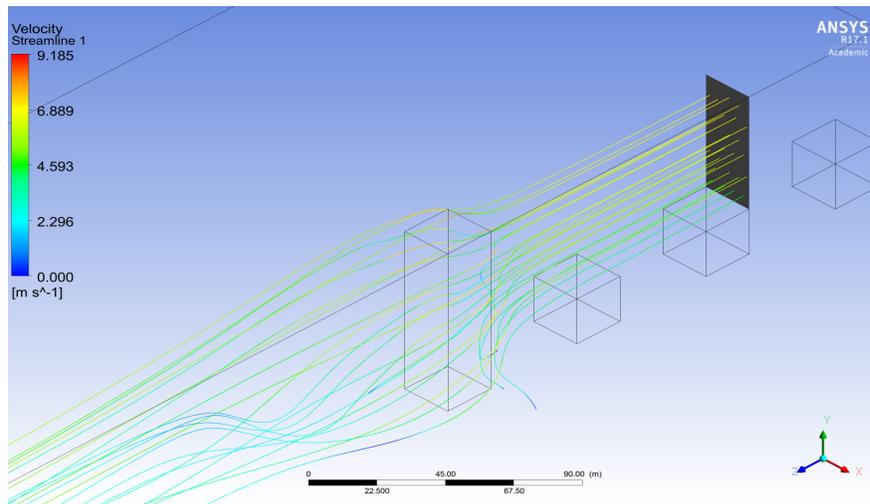


Figura 4.29: Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 8.

Caso 9: $a = 20\text{m}$, $b = 40\text{m}$, $c = 80\text{m}$

En la Figura 4.30 se observa el contorno de presión en el dominio, donde se aprecia el alza de ésta en la pared frontal del edificio de interés. Esto concuerda con lo esperado, debido a que el flujo impacta en la construcción desviándose a otros puntos. Lo mismo se observa en la pared frontal del primer edificio. Por otra parte, existen zonas de baja presión por sobre el edificio principal, que es donde se acelera el flujo.

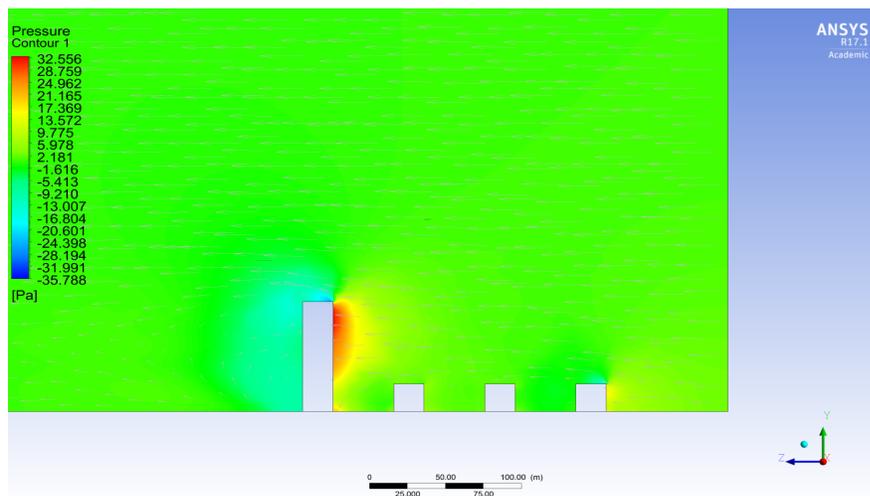


Figura 4.30: Contorno de presión del caso 9.

En la Figura 4.31 se observa claramente el comportamiento del flujo producto de la presencia de obstáculos, acelerándose en la parte superior frontal del edificio principal. Se aprecia zonas de baja velocidad, que corresponde a la recirculación, aguas abajo de los edificios. Finalmente, se observa como se reestablece el flujo luego de pasar por la zona urbana.

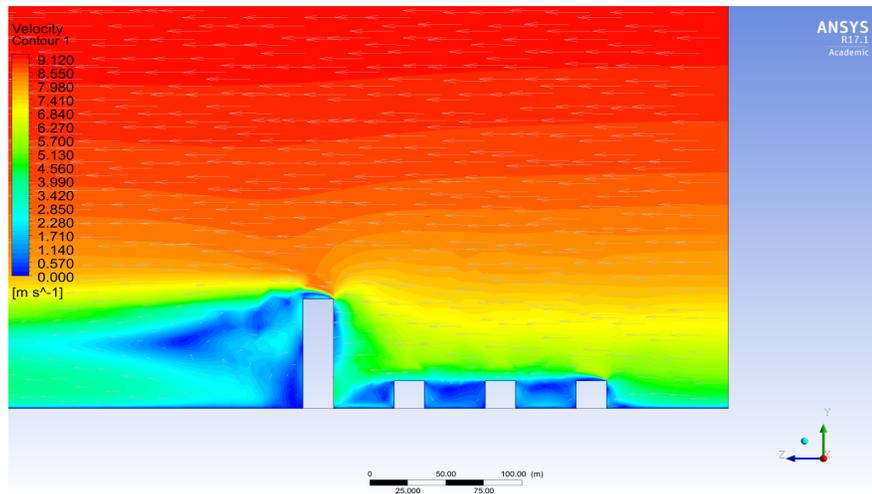


Figura 4.31: Contorno de velocidad del caso 9.

En la Figura 4.32 se aprecia el flujo acelerado por la presencia del edificio principal, generándose las líneas de corriente de color rojizo en los bordes de éste. También se observa notoriamente la burbuja de recirculación en la zona posterior del edificio, lo cual entorpece el reestablecimiento del flujo.

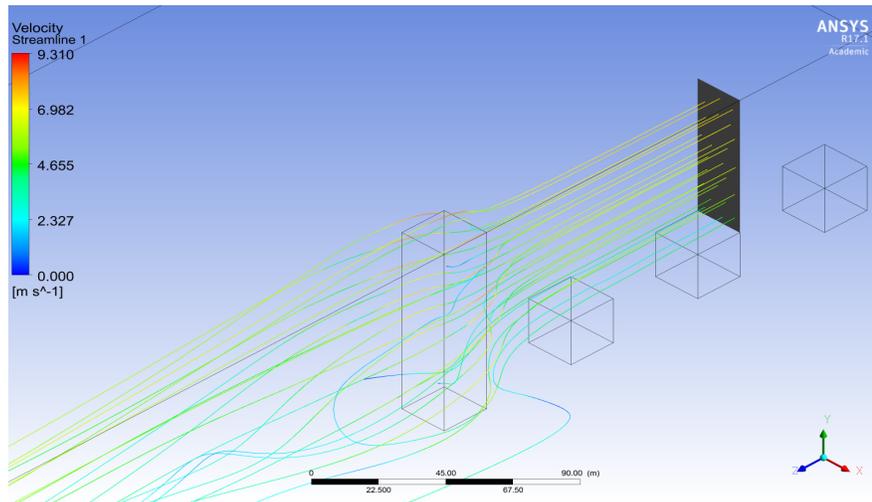


Figura 4.32: Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 9.

Caso 10: $a = 40\text{m}$, $b = 10\text{m}$, $c = 60\text{m}$

En la Figura 4.33 se observa el contorno de presión en el dominio, donde se aprecia el alza de ésta en la pared frontal del edificio de interés. Esto concuerda con lo esperado, debido a que el flujo impacta en la construcción desviándose a otros puntos. Lo mismo se observa en la pared frontal del primer edificio. Por otra parte, existen zonas de baja presión por sobre el edificio principal, que es donde se acelera el flujo.

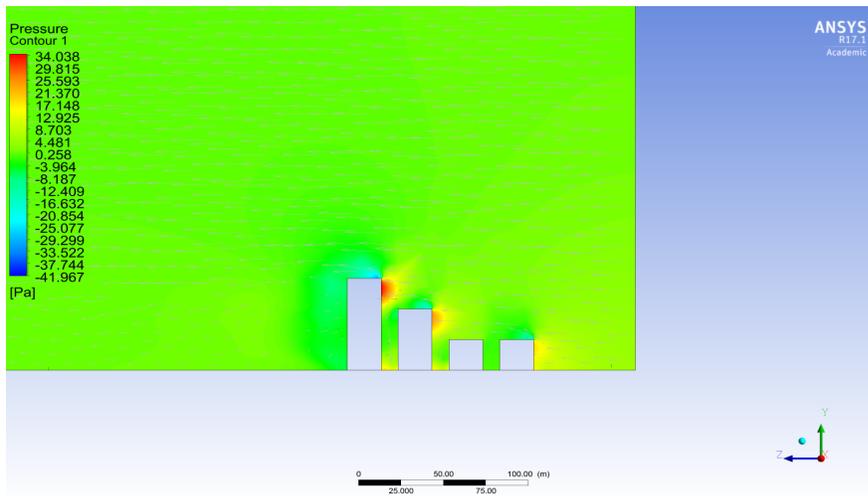


Figura 4.33: Contorno de presión del caso 10.

En la Figura 4.34 se observa claramente el comportamiento del flujo producto de la presencia de obstáculos, acelerándose en la parte superior frontal del edificio principal. Se aprecia zonas de baja velocidad, que corresponde a la recirculación, aguas abajo de los edificios. Finalmente, se observa como se reestablece el flujo luego de pasar por la zona urbana.

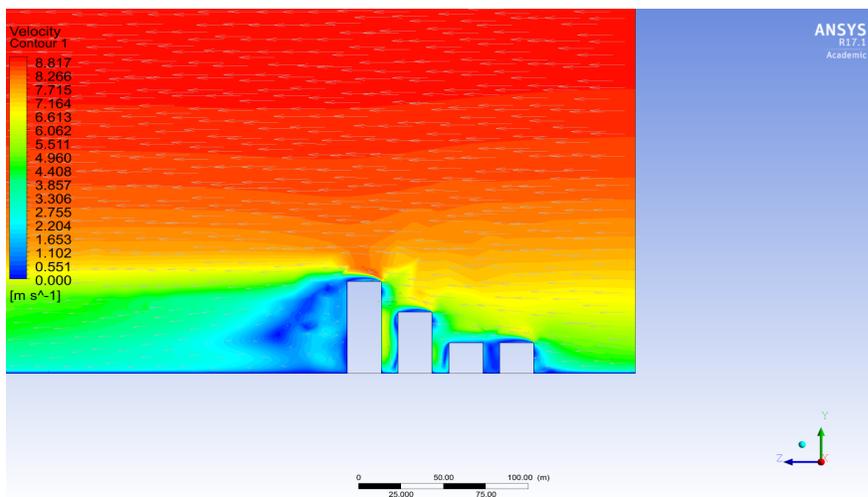


Figura 4.34: Contorno de velocidad del caso 10.

En la Figura 4.35 se aprecia el flujo acelerado por la presencia del edificio principal, generándose las líneas de corriente de color rojizo en los bordes de éste. También se observa notoriamente la burbuja de recirculación en la zona posterior del edificio, lo cual entorpece el reestablecimiento del flujo.

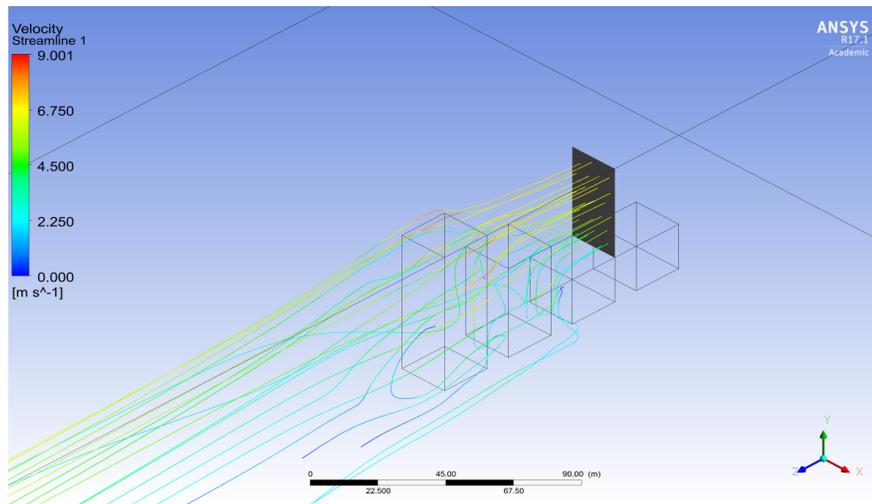


Figura 4.35: Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 10.

Caso 11: $a = 40\text{m}$, $b = 10\text{m}$, $c = 70\text{m}$

En la Figura 4.36 se observa el contorno de presión en el dominio, donde se aprecia el alza de ésta en la pared frontal del edificio de interés. Esto concuerda con lo esperado, debido a que el flujo impacta en la construcción desviándose a otros puntos. Lo mismo se observa en la pared frontal del primer edificio. Por otra parte, existen zonas de baja presión por sobre el edificio principal, que es donde se acelera el flujo.

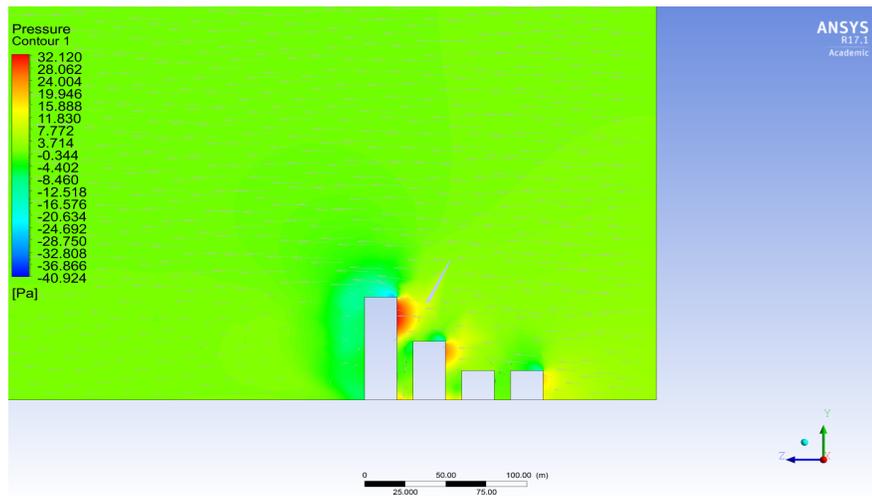


Figura 4.36: Contorno de presión del caso 11.

En la Figura 4.37 se observa claramente el comportamiento del flujo producto de la presencia de obstáculos, acelerándose en la parte superior frontal del edificio principal. Se aprecia zonas de baja velocidad, que corresponde a la recirculación, aguas abajo de los edificios. Finalmente, se observa como se reestablece el flujo luego de pasar por la zona urbana.

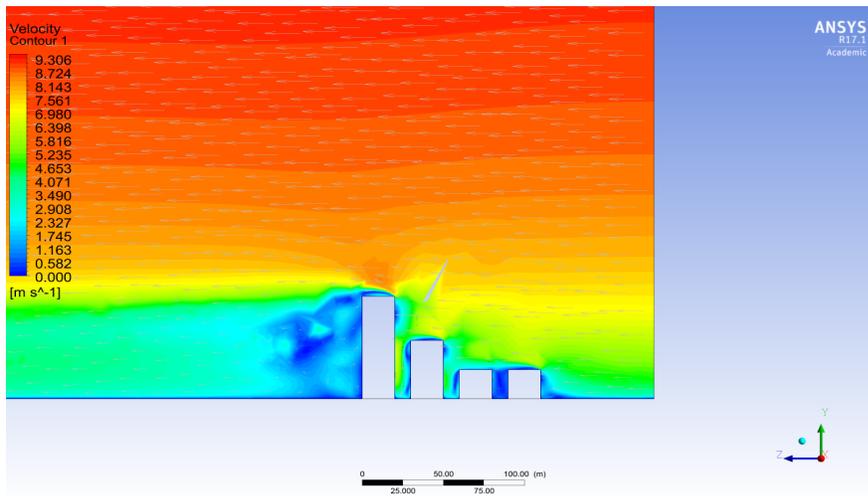


Figura 4.37: Contorno de velocidad del caso 11.

En la Figura 4.38 se aprecia el flujo acelerado por la presencia del edificio principal, generándose las líneas de corriente de color rojizo en los bordes de éste. También se observa notoriamente la burbuja de recirculación en la zona posterior del edificio, lo cual entorpece el reestablecimiento del flujo.

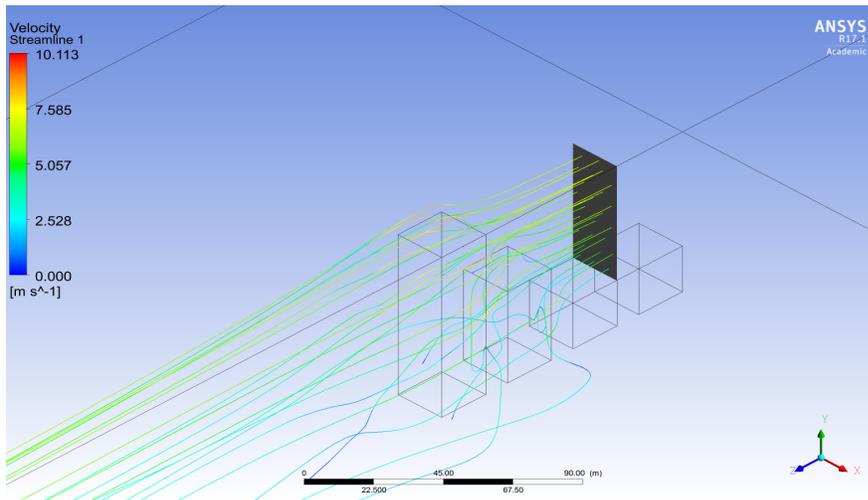


Figura 4.38: Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 11.

Caso 12: $a = 40\text{m}$, $b = 10\text{m}$, $c = 80\text{m}$

En la Figura 4.39 se observa el contorno de presión en el dominio, donde se aprecia el alza de ésta en la pared frontal del edificio de interés. Esto concuerda con lo esperado, debido a que el flujo impacta en la construcción desviándose a otros puntos. Lo mismo se observa en la pared frontal del primer edificio. Por otra parte, existen zonas de baja presión por sobre el edificio principal, que es donde se acelera el flujo.

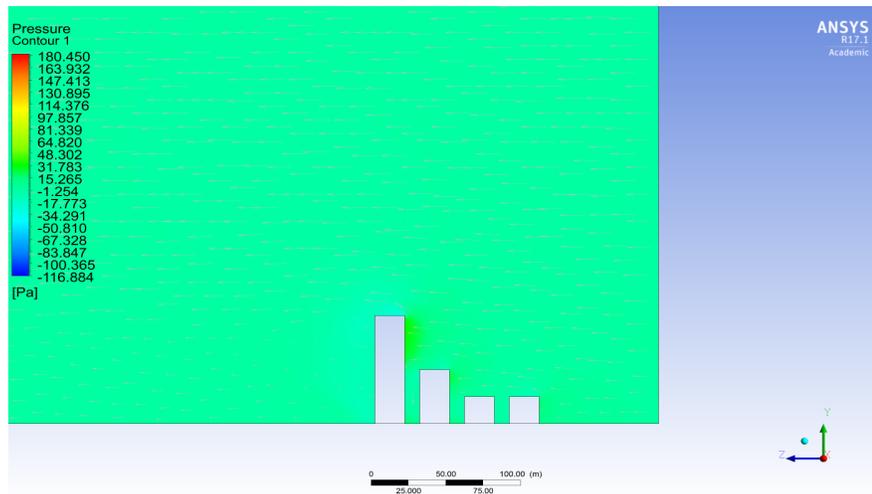


Figura 4.39: Contorno de presión del caso 12.

En la Figura 4.40 se observa claramente el comportamiento del flujo producto de la presencia de obstáculos, acelerándose en la parte superior frontal del edificio principal. Se aprecia zonas de baja velocidad, que corresponde a la recirculación, aguas abajo de los edificios. Finalmente, se observa como se reestablece el flujo luego de pasar por la zona urbana.

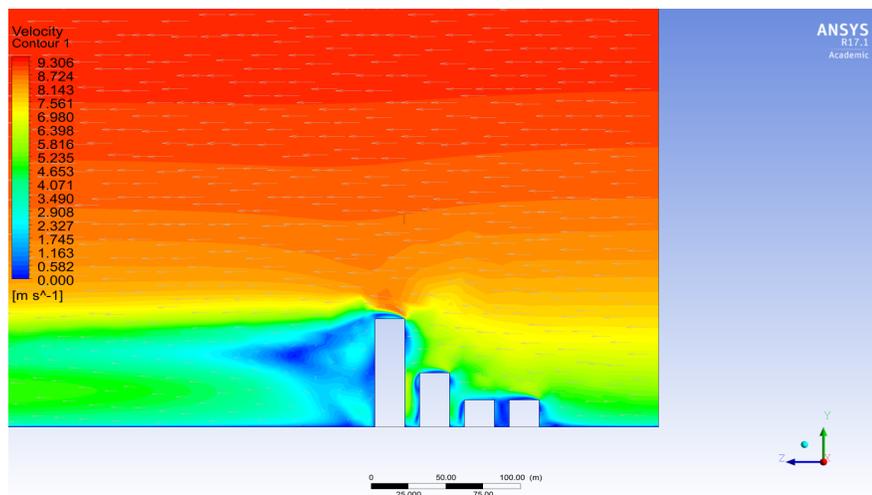


Figura 4.40: Contorno de velocidad del caso 12.

En la Figura 4.41 se aprecia el flujo acelerado por la presencia del edificio principal, generándose las líneas de corriente de color rojizo en los bordes de éste. También se observa notoriamente la burbuja de recirculación en la zona posterior del edificio, lo cual entorpece el reestablecimiento del flujo.

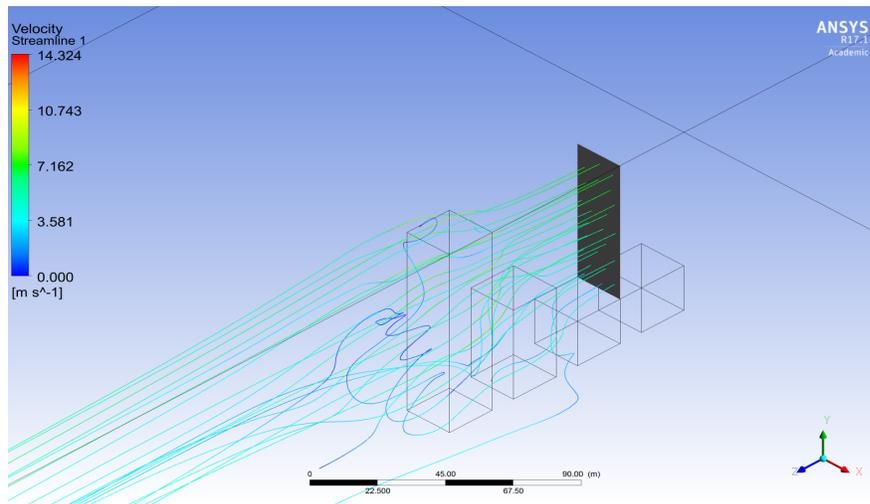


Figura 4.41: Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 12.

Caso 13: $a = 40\text{m}$, $b = 20\text{m}$, $c = 60\text{m}$

En la Figura 4.42 se observa el contorno de presión en el dominio, donde se aprecia el alza de ésta en la pared frontal del edificio de interés. Esto concuerda con lo esperado, debido a que el flujo impacta en la construcción desviándose a otros puntos. Lo mismo se observa en la pared frontal del primer edificio. Por otra parte, existen zonas de baja presión por sobre el edificio principal, que es donde se acelera el flujo.

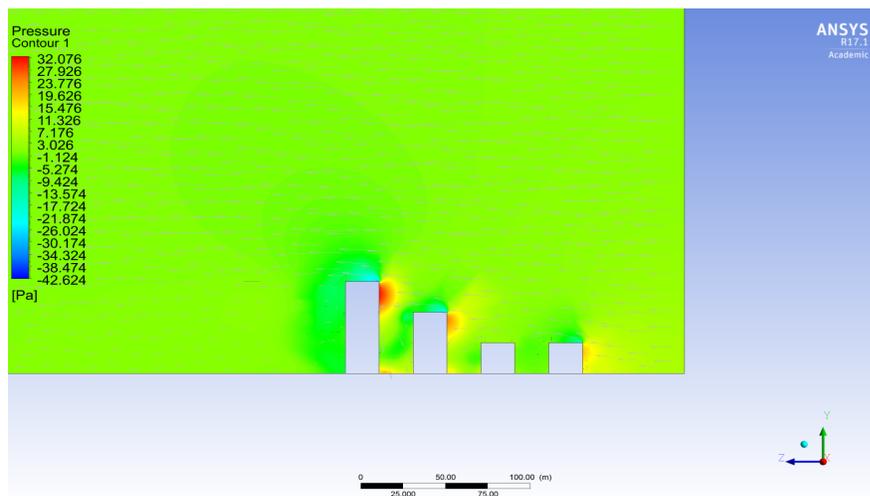


Figura 4.42: Contorno de presión del caso 13.

En la Figura 4.43 se observa claramente el comportamiento del flujo producto de la presencia de obstáculos, acelerándose en la parte superior frontal del edificio principal. Se aprecia zonas de baja velocidad, que corresponde a la recirculación, aguas abajo de los edificios. Finalmente, se observa como se reestablece el flujo luego de pasar por la zona urbana.

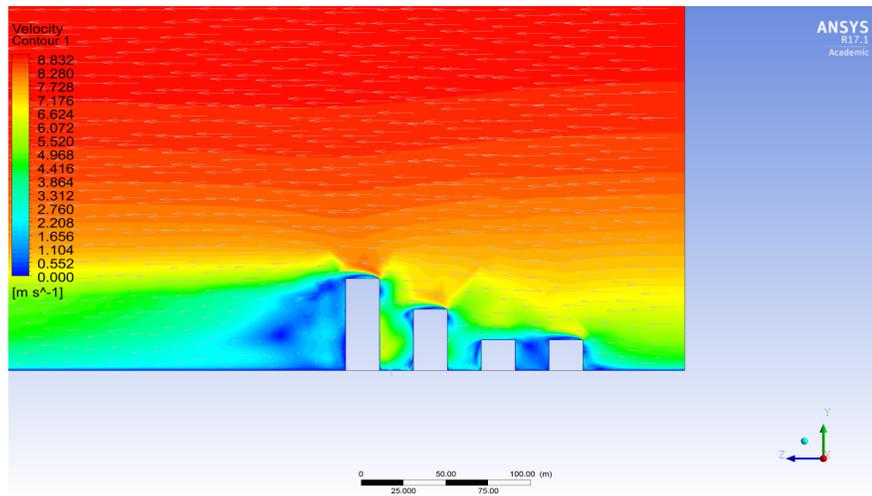


Figura 4.43: Contorno de velocidad del caso 13.

En la Figura 4.44 se aprecia el flujo acelerado por la presencia del edificio principal, generándose las líneas de corriente de color rojizo en los bordes de éste. También se observa notoriamente la burbuja de recirculación en la zona posterior del edificio, lo cual entorpece el reestablecimiento del flujo.

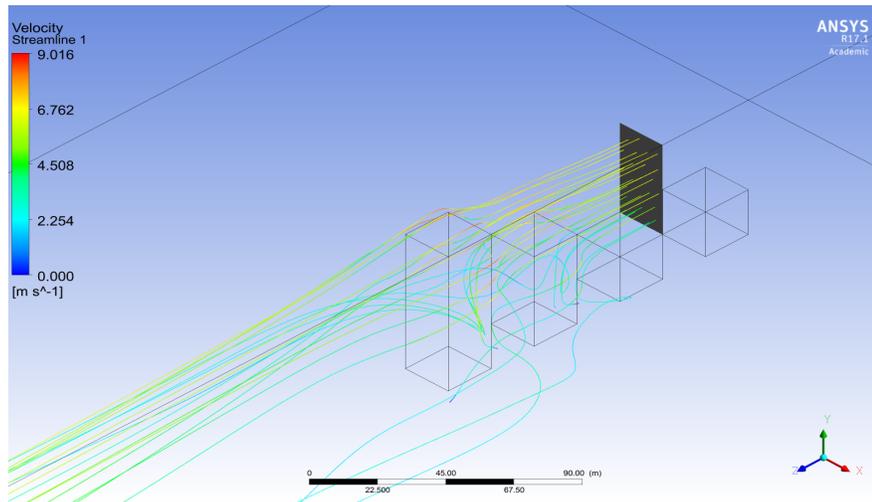


Figura 4.44: Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 13.

Caso 14: $a = 40\text{m}$, $b = 20\text{m}$, $c = 70\text{m}$

En la Figura 4.45 se observa el contorno de presión en el dominio, donde se aprecia el alza de ésta en la pared frontal del edificio de interés. Esto concuerda con lo esperado, debido a que el flujo impacta en la construcción desviándose a otros puntos. Lo mismo se observa en la pared frontal del primer edificio. Por otra parte, existen zonas de baja presión por sobre el edificio principal, que es donde se acelera el flujo.

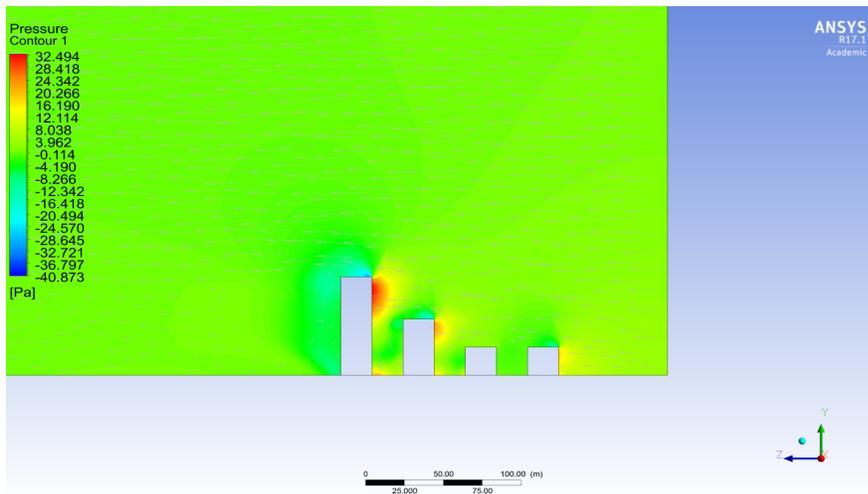


Figura 4.45: Contorno de presión del caso 14.

En la Figura 4.46 se observa claramente el comportamiento del flujo producto de la presencia de obstáculos, acelerándose en la parte superior frontal del edificio principal. Se aprecia zonas de baja velocidad, que corresponde a la recirculación, aguas abajo de los edificios. Finalmente, se observa como se reestablece el flujo luego de pasar por la zona urbana.

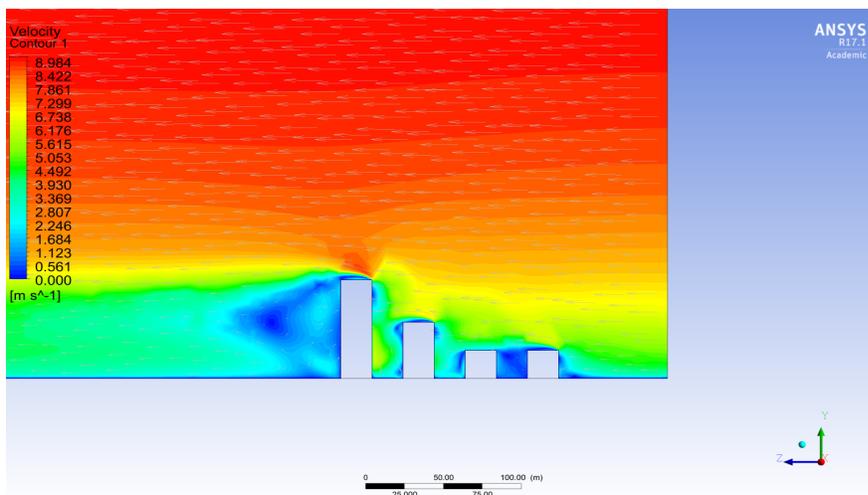


Figura 4.46: Contorno de velocidad del caso 14.

En la Figura 4.47 se aprecia el flujo acelerado por la presencia del edificio principal, generándose las líneas de corriente de color rojizo en los bordes de éste. También se observa notoriamente la burbuja de recirculación en la zona posterior del edificio, lo cual entorpece el reestablecimiento del flujo.

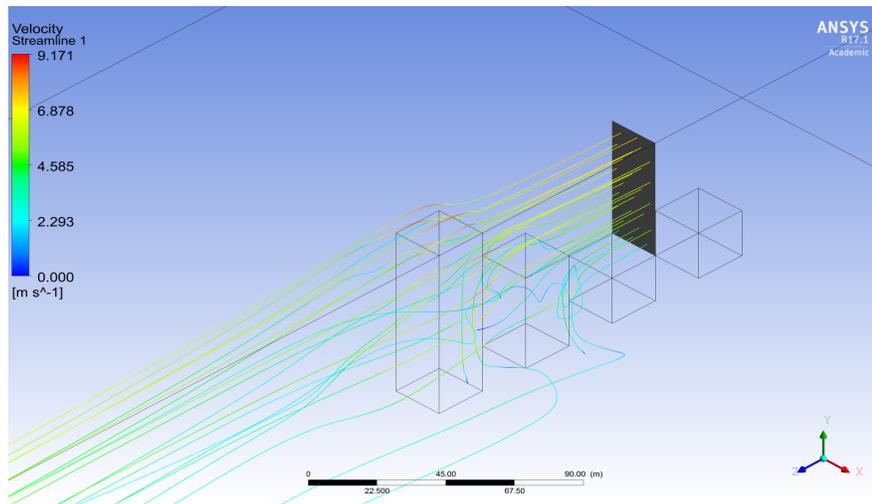


Figura 4.47: Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 14.

Caso 15: $a = 40\text{m}$, $b = 20\text{m}$, $c = 80\text{m}$

En la Figura 4.48 se observa el contorno de presión en el dominio, donde se aprecia el alza de ésta en la pared frontal del edificio de interés. Esto concuerda con lo esperado, debido a que el flujo impacta en la construcción desviándose a otros puntos. Lo mismo se observa en la pared frontal del primer edificio. Por otra parte, existen zonas de baja presión por sobre el edificio principal, que es donde se acelera el flujo.

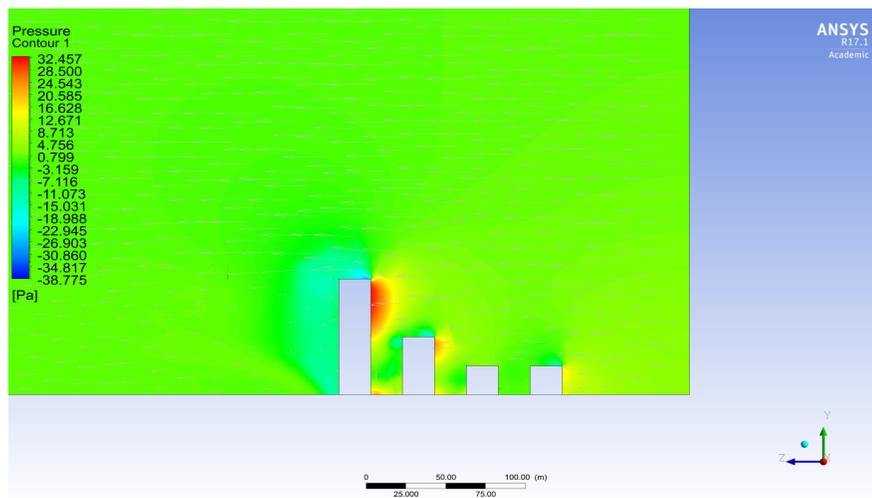


Figura 4.48: Contorno de presión del caso 15.

En la Figura 4.49 se observa claramente el comportamiento del flujo producto de la presencia de obstáculos, acelerándose en la parte superior frontal del edificio principal. Se aprecia zonas de baja velocidad, que corresponde a la recirculación, aguas abajo de los edificios. Finalmente, se observa como se reestablece el flujo luego de pasar por la zona urbana.

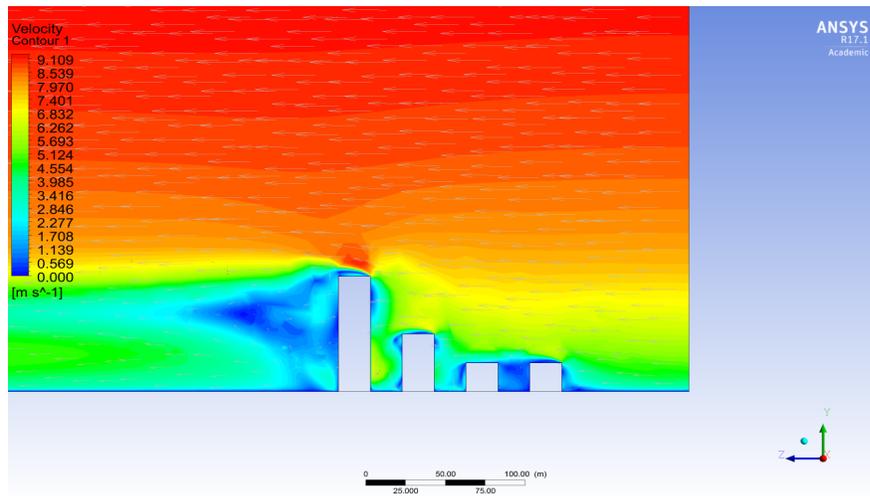


Figura 4.49: Contorno de velocidad del caso 15.

En la Figura 4.50 se aprecia el flujo acelerado por la presencia del edificio principal, generándose las líneas de corriente de color rojizo en los bordes de éste. También se observa notoriamente la burbuja de recirculación en la zona posterior del edificio, lo cual entorpece el reestablecimiento del flujo.

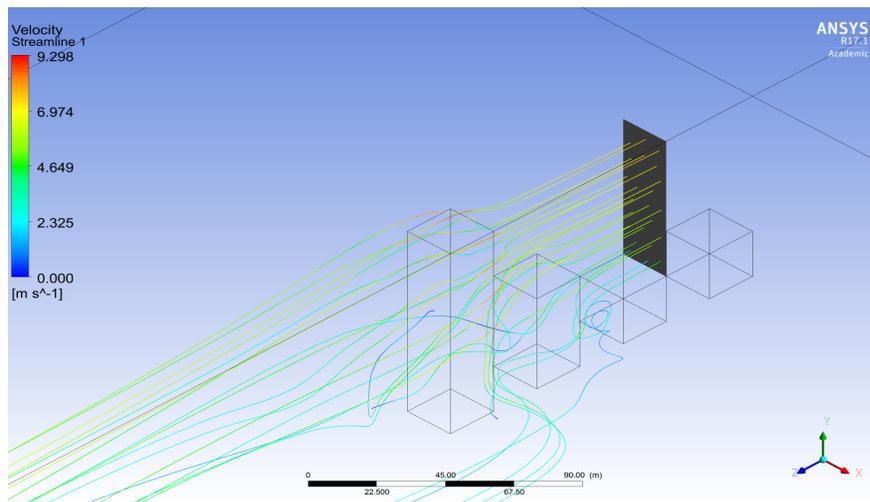


Figura 4.50: Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 15.

Caso 16: $a = 40\text{m}$, $b = 40\text{m}$, $c = 60\text{m}$

En la Figura 4.51 se observa el contorno de presión en el dominio, donde se aprecia el alza de ésta en la pared frontal del edificio de interés. Esto concuerda con lo esperado, debido a que el flujo impacta en la construcción desviándose a otros puntos. Lo mismo se observa en la pared frontal del primer edificio. Por otra parte, existen zonas de baja presión por sobre el edificio principal, que es donde se acelera el flujo.

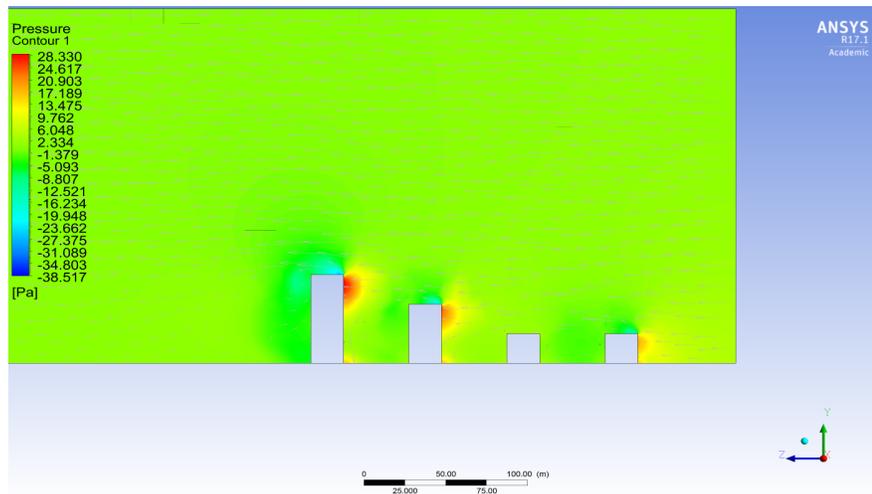


Figura 4.51: Contorno de presión del caso 16.

En la Figura 4.52 se observa claramente el comportamiento del flujo producto de la presencia de obstáculos, acelerándose en la parte superior frontal del edificio principal. Se aprecia zonas de baja velocidad, que corresponde a la recirculación, aguas abajo de los edificios. Finalmente, se observa como se reestablece el flujo luego de pasar por la zona urbana.

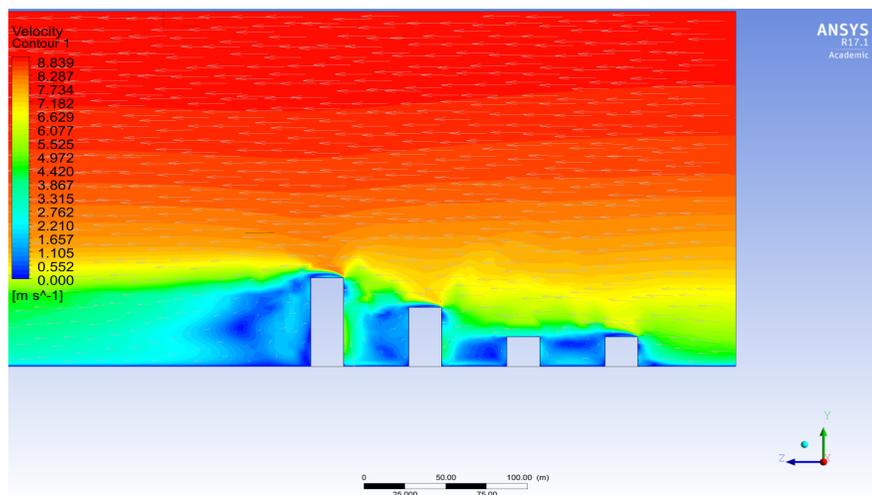


Figura 4.52: Contorno de velocidad del caso 16.

En la Figura 4.53 se aprecia el flujo acelerado por la presencia del edificio principal, generándose las líneas de corriente de color rojizo en los bordes de éste. También se observa notoriamente la burbuja de recirculación en la zona posterior del edificio, lo cual entorpece el reestablecimiento del flujo.

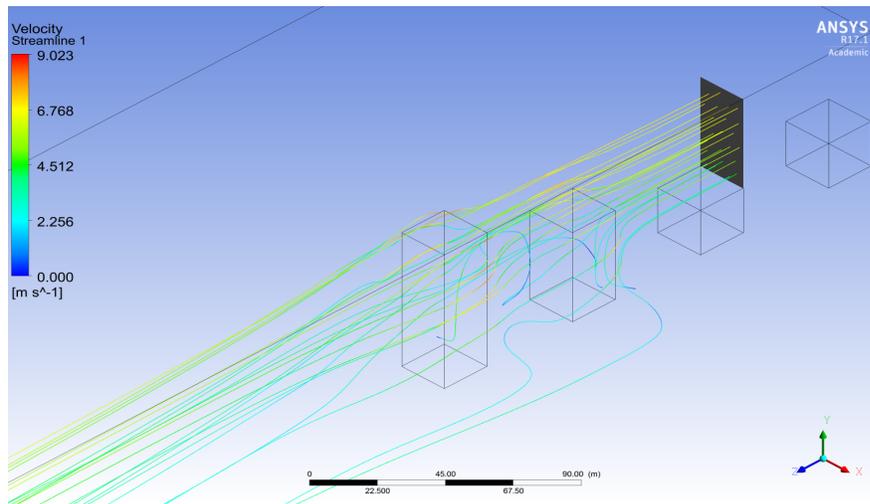


Figura 4.53: Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 16.

Caso 17: $a = 40\text{m}$, $b = 40\text{m}$, $c = 70\text{m}$

En la Figura 4.54 se observa el contorno de presión en el dominio, donde se aprecia el alza de ésta en la pared frontal del edificio de interés. Esto concuerda con lo esperado, debido a que el flujo impacta en la construcción desviándose a otros puntos. Lo mismo se observa en la pared frontal del primer edificio. Por otra parte, existen zonas de baja presión por sobre el edificio principal, que es donde se acelera el flujo.

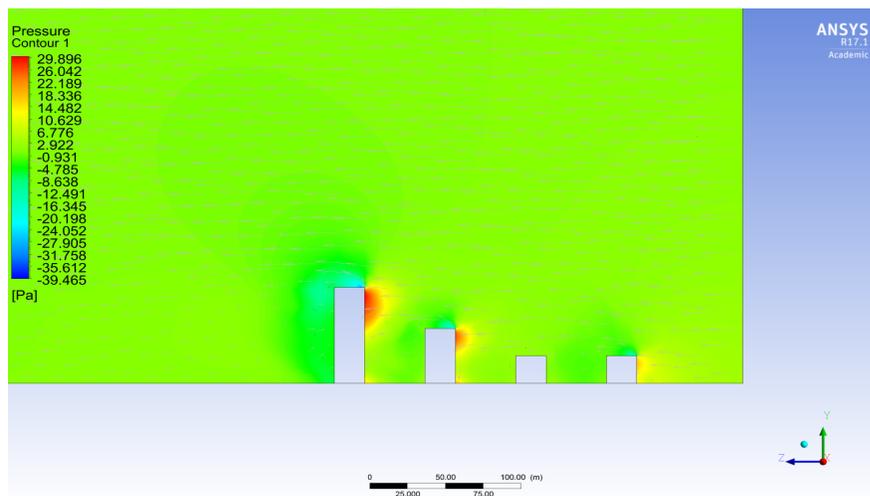


Figura 4.54: Contorno de presión del caso 17.

En la Figura 4.55 se observa claramente el comportamiento del flujo producto de la presencia de obstáculos, acelerándose en la parte superior frontal del edificio principal. Se aprecia zonas de baja velocidad, que corresponde a la recirculación, aguas abajo de los edificios. Finalmente, se observa como se reestablece el flujo luego de pasar por la zona urbana.

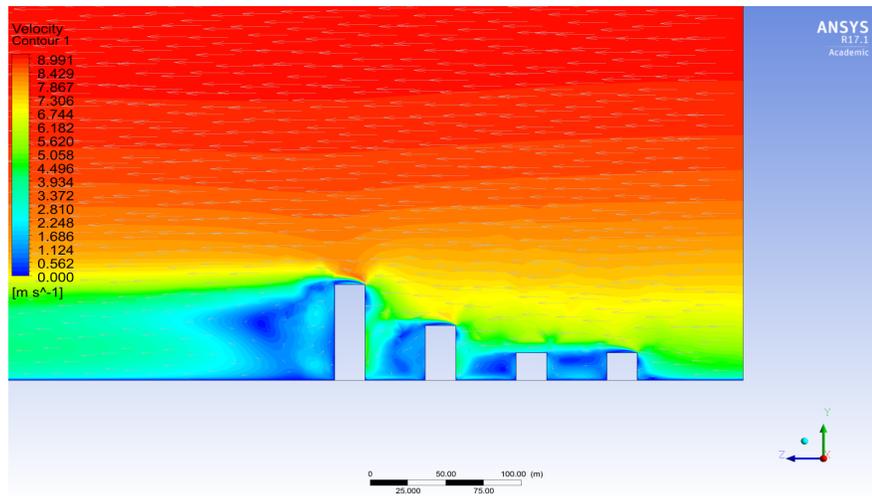


Figura 4.55: Contorno de velocidad del caso 17.

En la Figura 4.56 se aprecia el flujo acelerado por la presencia del edificio principal, generándose las líneas de corriente de color rojizo en los bordes de éste. También se observa notoriamente la burbuja de recirculación en la zona posterior del edificio, lo cual entorpece el reestablecimiento del flujo.

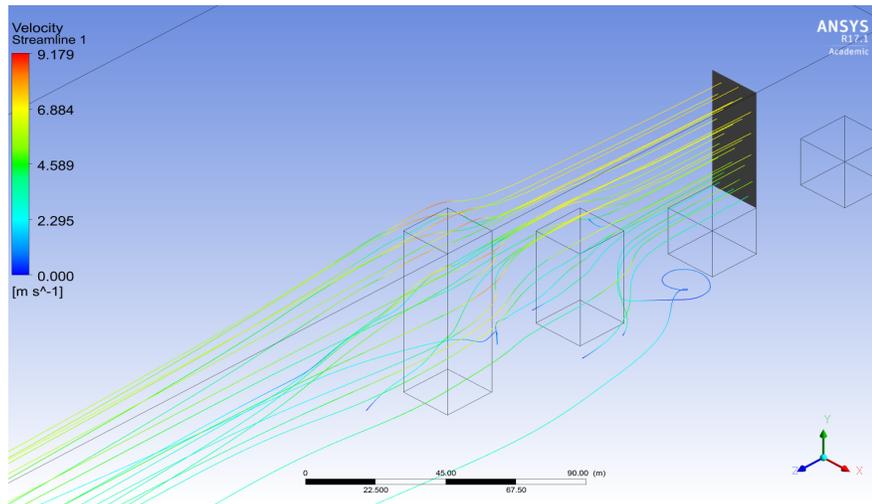


Figura 4.56: Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 17.

Caso 18: $a = 40\text{m}$, $b = 40\text{m}$, $c = 80\text{m}$

En la Figura 4.57 se observa el contorno de presión en el dominio, donde se aprecia el alza de ésta en la pared frontal del edificio de interés. Esto concuerda con lo esperado, debido a que el flujo impacta en la construcción desviándose a otros puntos. Lo mismo se observa en la pared frontal del primer edificio. Por otra parte, existen zonas de baja presión por sobre el edificio principal, que es donde se acelera el flujo.

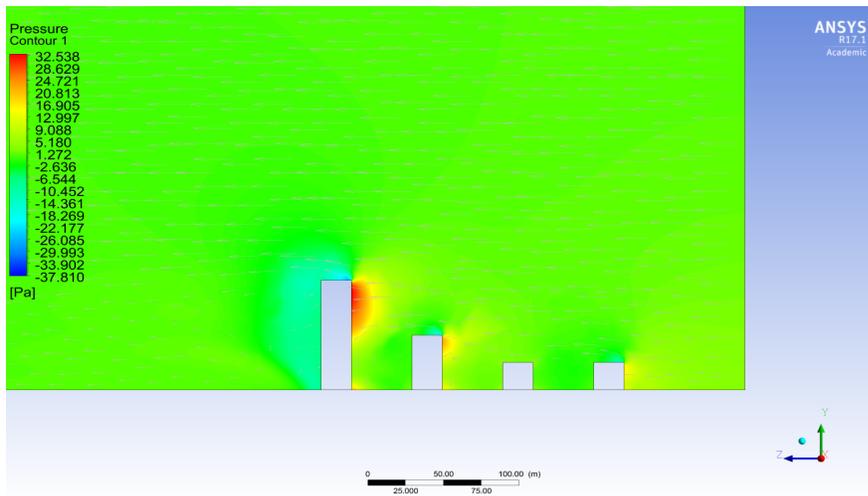


Figura 4.57: Contorno de presión del caso 18.

En la Figura 4.58 se observa claramente el comportamiento del flujo producto de la presencia de obstáculos, acelerándose en la parte superior frontal del edificio principal. Se aprecia zonas de baja velocidad, que corresponde a la recirculación, aguas abajo de los edificios. Finalmente, se observa como se reestablece el flujo luego de pasar por la zona urbana.

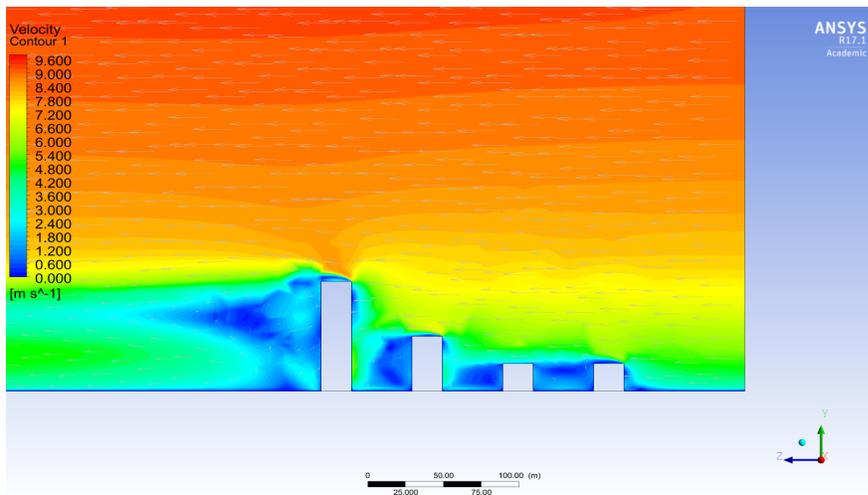


Figura 4.58: Contorno de velocidad del caso 18.

En la Figura 4.59 se aprecia el flujo acelerado por la presencia del edificio principal, generándose las líneas de corriente de color rojizo en los bordes de éste. También se observa notoriamente la burbuja de recirculación en la zona posterior del edificio, lo cual entorpece el reestablecimiento del flujo.

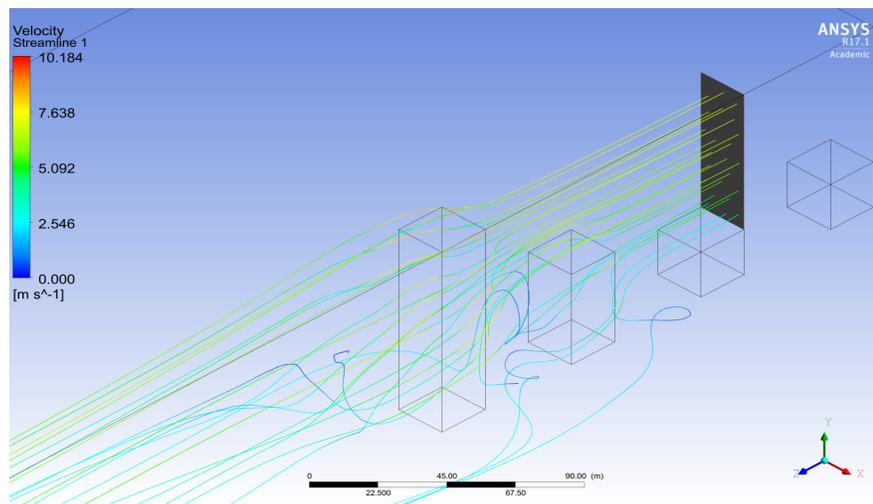


Figura 4.59: Línea de corriente desde el segundo edificio hacia el principal para el caso 18.

4.2. Resultados Numéricos

Tras obtener y exportar los datos de las simulaciones, se realiza el trabajo numérico a partir de ellos. En primer lugar, se calcula el coeficiente de concentración C_f a partir de la velocidad obtenida de la simulación y el perfil de velocidad en dominio vacío calculado manualmente. Por otro lado, se obtiene la tasa de generación de entropía a partir de las derivadas parciales de las componentes de la velocidad.

Estos resultados se visualizan en gráficos tridimensionales, que contienen puntos con tamaño proporcional a su valor tanto para el factor de concentración como para la tasa de generación de entropía sin las constantes. Cabe resaltar que los valores altos para el factor de concentración son del orden de 1.1, es decir, que la velocidad acelerada por los edificios es 1.1 veces lo que es la velocidad en el vacío. Para el caso de la generación de entropía, no es de ayuda entregar el orden de magnitud, ya que sólo interesa comparar visualmente.

Caso 1: $a = 20\text{m}$, $b = 10\text{m}$, $c = 60\text{m}$

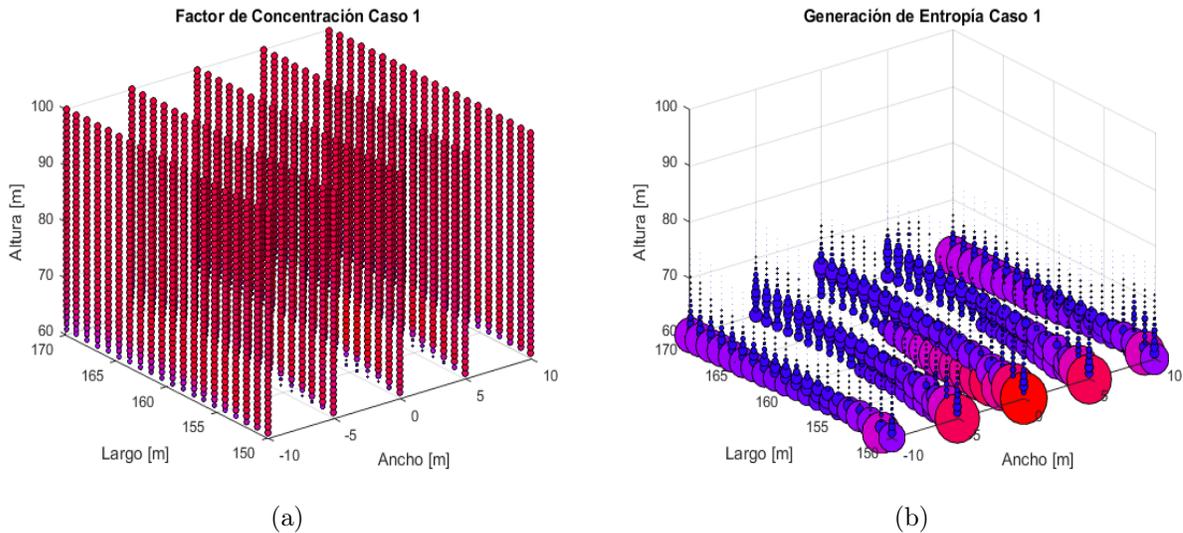


Figura 4.60: Gráficos 3D para el caso 1. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

Caso 2: $a = 20\text{m}$, $b = 10\text{m}$, $c = 70\text{m}$

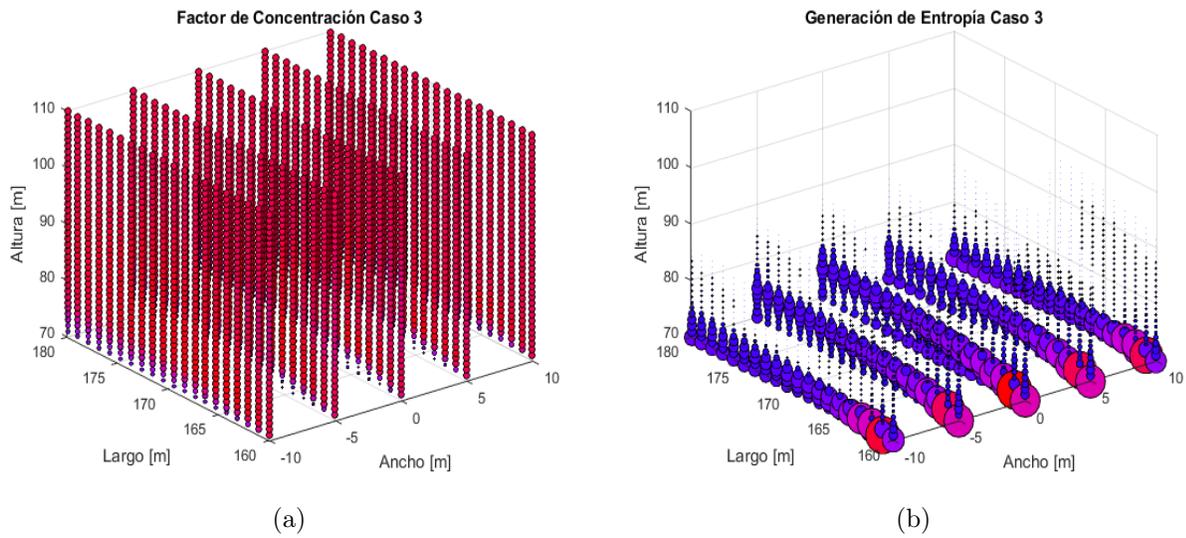


Figura 4.61: Gráficos 3D para el caso 2. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

Caso 3: $a = 20\text{m}$, $b = 10\text{m}$, $c = 80\text{m}$

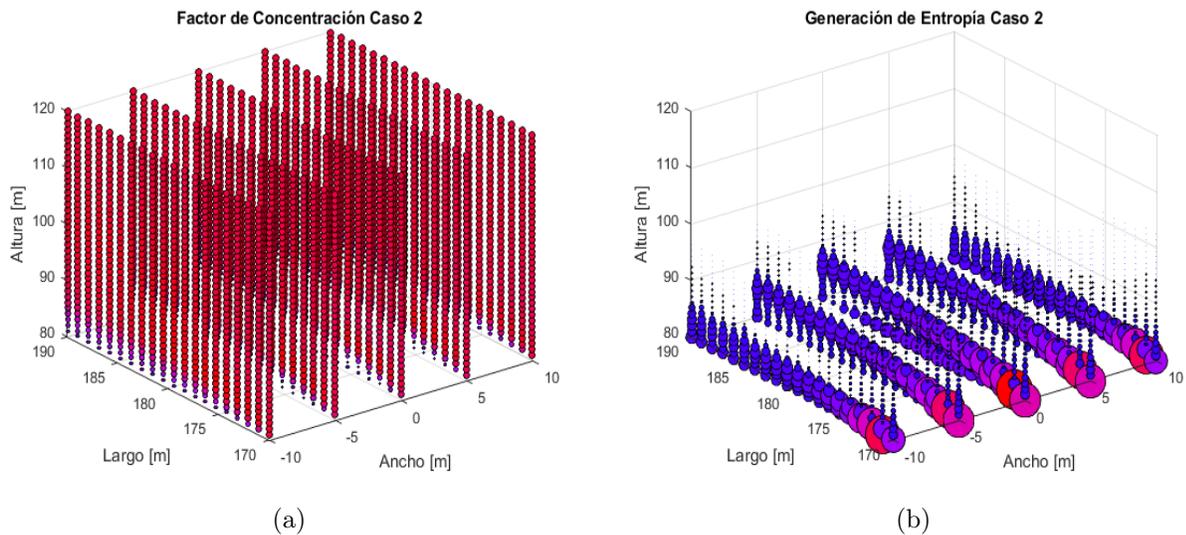


Figura 4.62: Gráficos 3D para el caso 3. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

Caso 4: $a = 20\text{m}$, $b = 20\text{m}$, $c = 60\text{m}$

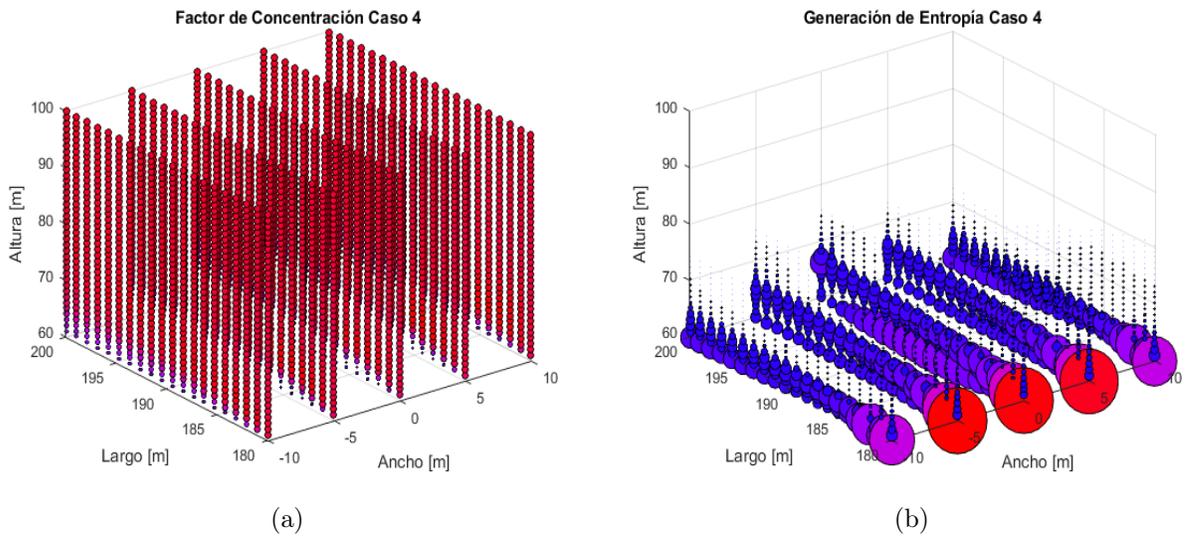


Figura 4.63: Gráficos 3D para el caso 4. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

Caso 5: $a = 20\text{m}$, $b = 20\text{m}$, $c = 70\text{m}$

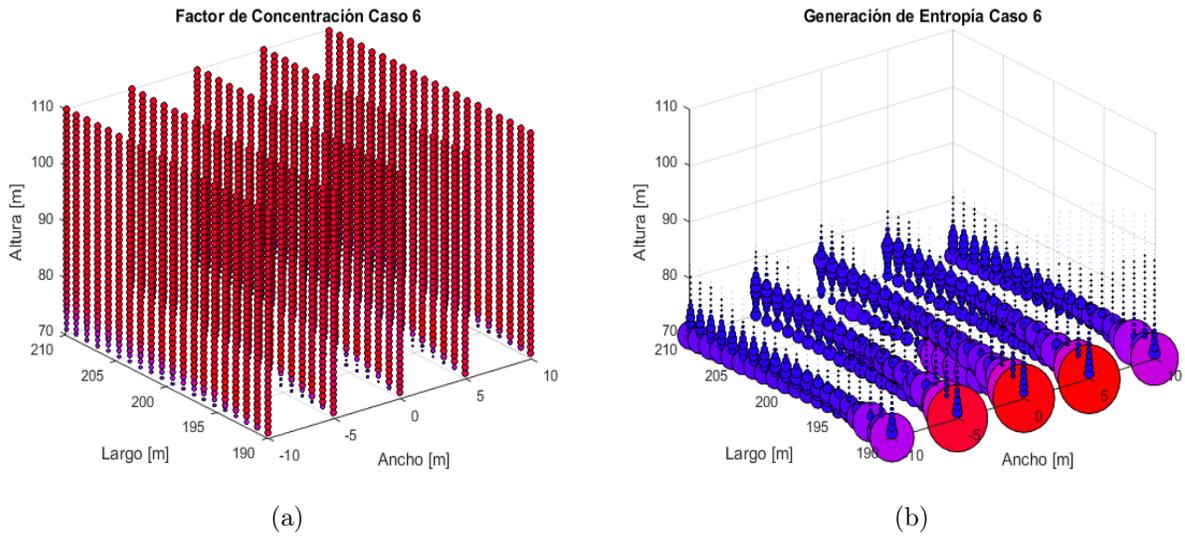


Figura 4.64: Gráficos 3D para el caso 5. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

Caso 6: $a = 20\text{m}$, $b = 20\text{m}$, $c = 80\text{m}$

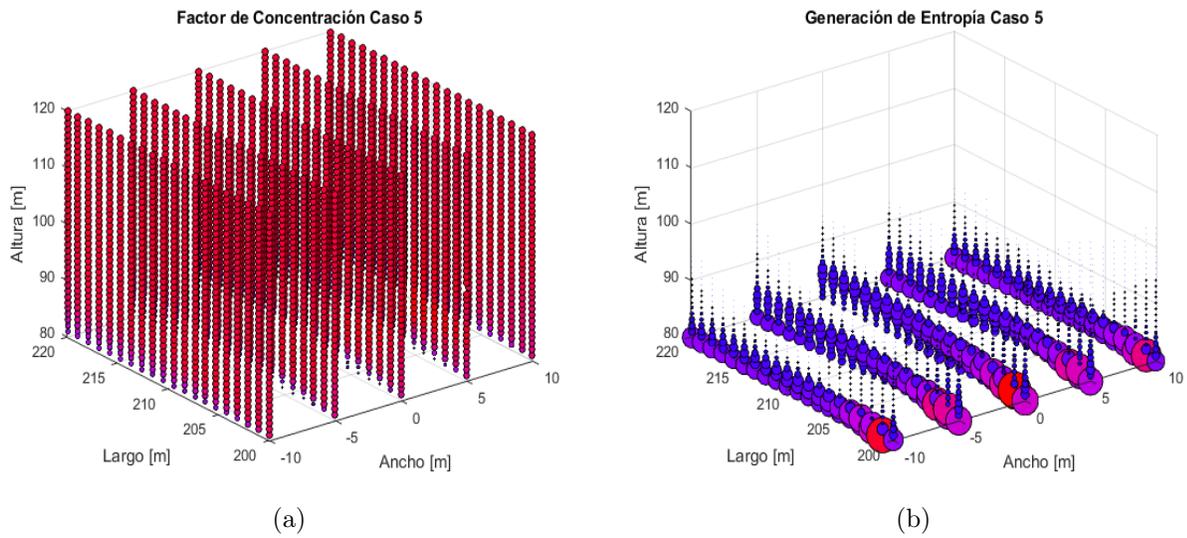


Figura 4.65: Gráficos 3D para el caso 6. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

Caso 7: $a = 20\text{m}$, $b = 40\text{m}$, $c = 60\text{m}$

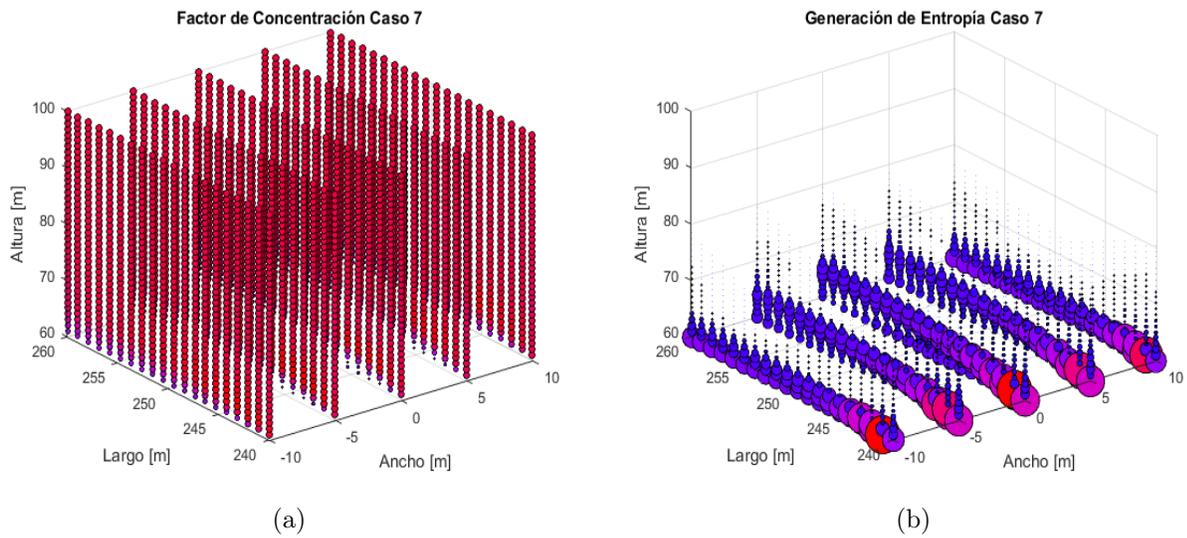


Figura 4.66: Gráficos 3D para el caso 7. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

Caso 8: $a = 20\text{m}$, $b = 40\text{m}$, $c = 70\text{m}$

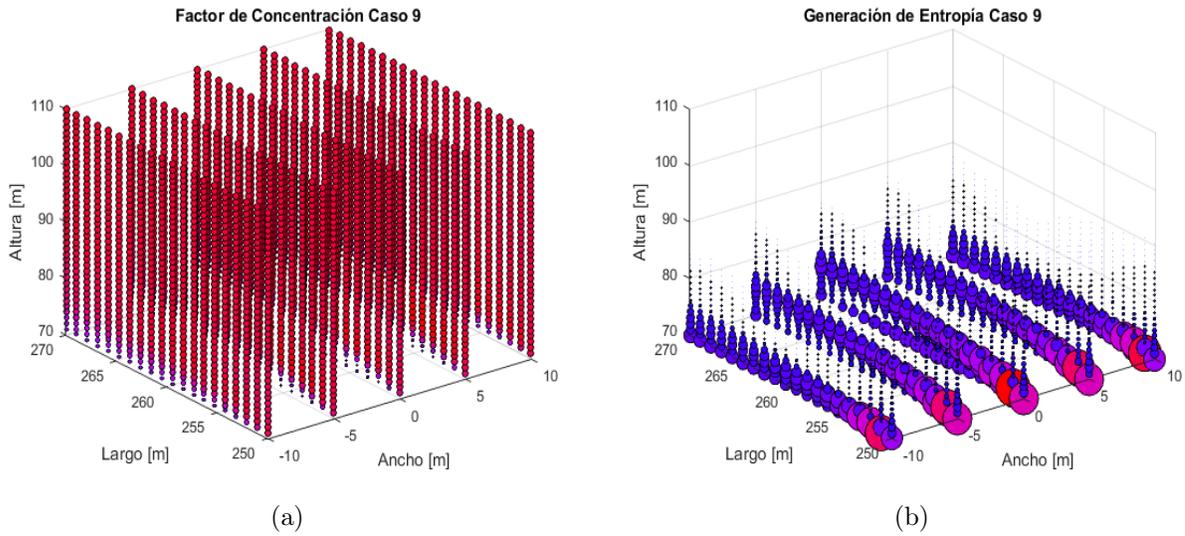


Figura 4.67: Gráficos 3D para el caso 8. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

Caso 9: $a = 20\text{m}$, $b = 40\text{m}$, $c = 80\text{m}$

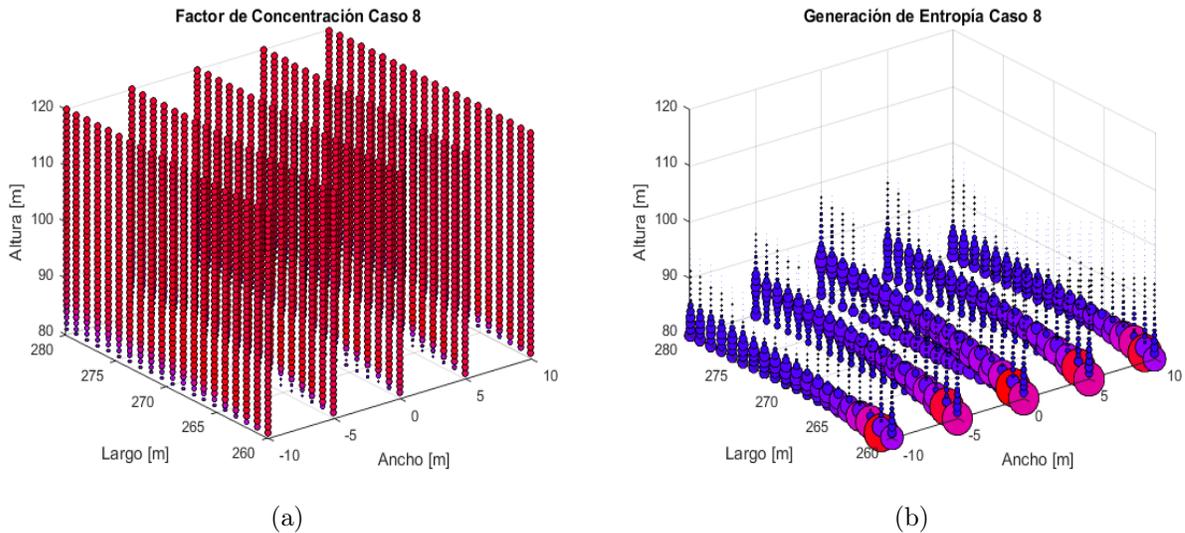


Figura 4.68: Gráficos 3D para el caso 9. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

Caso 10: $a = 40\text{m}$, $b = 10\text{m}$, $c = 60\text{m}$

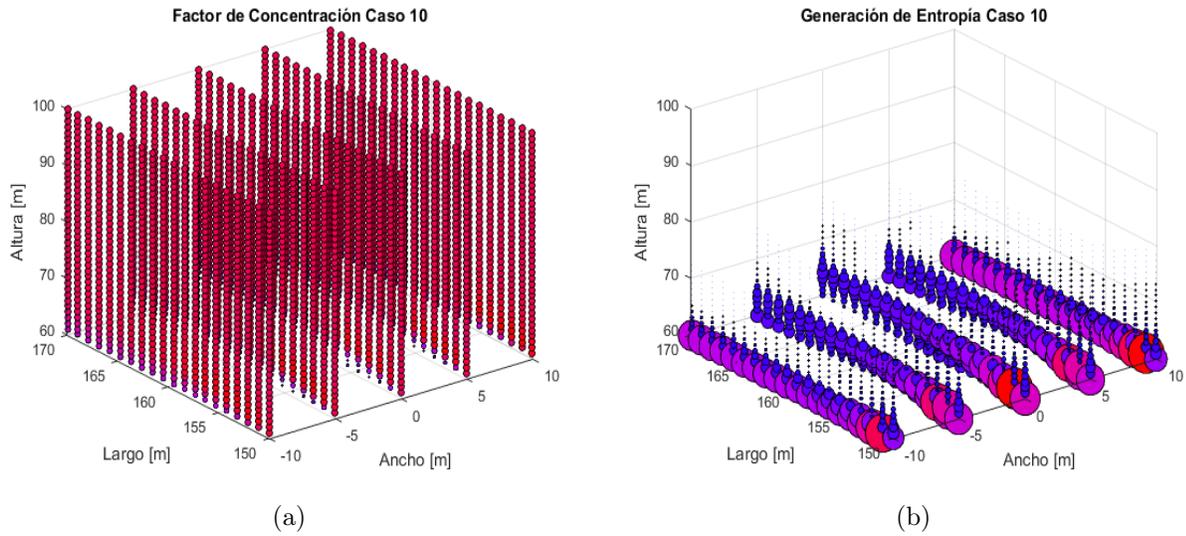


Figura 4.69: Gráficos 3D para el caso 10. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

Caso 11: $a = 40\text{m}$, $b = 10\text{m}$, $c = 70\text{m}$

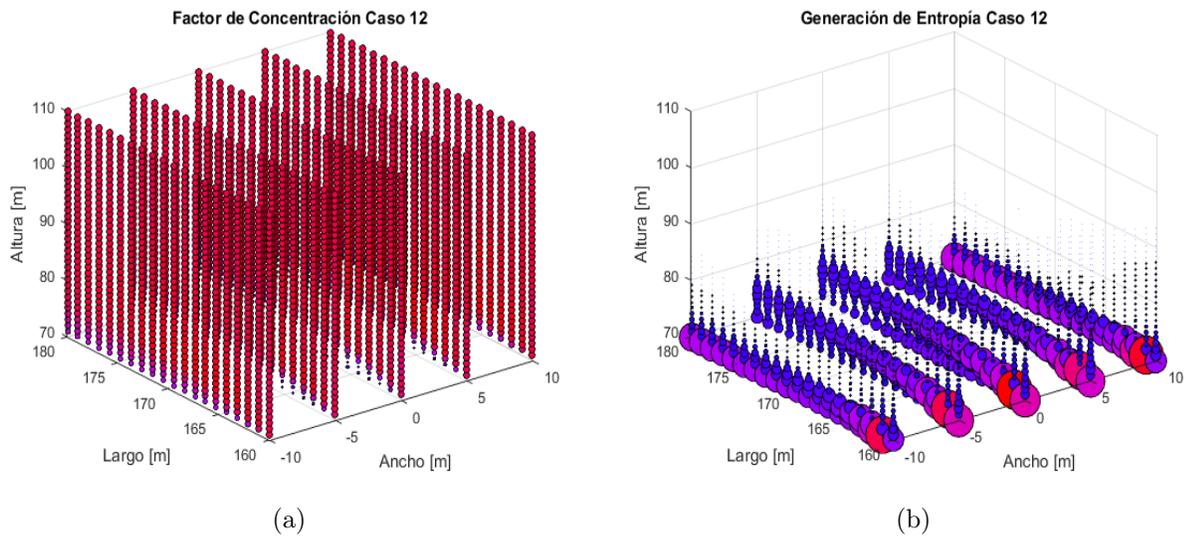


Figura 4.70: Gráficos 3D para el caso 11. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

Caso 12: $a = 40\text{m}$, $b = 10\text{m}$, $c = 80\text{m}$

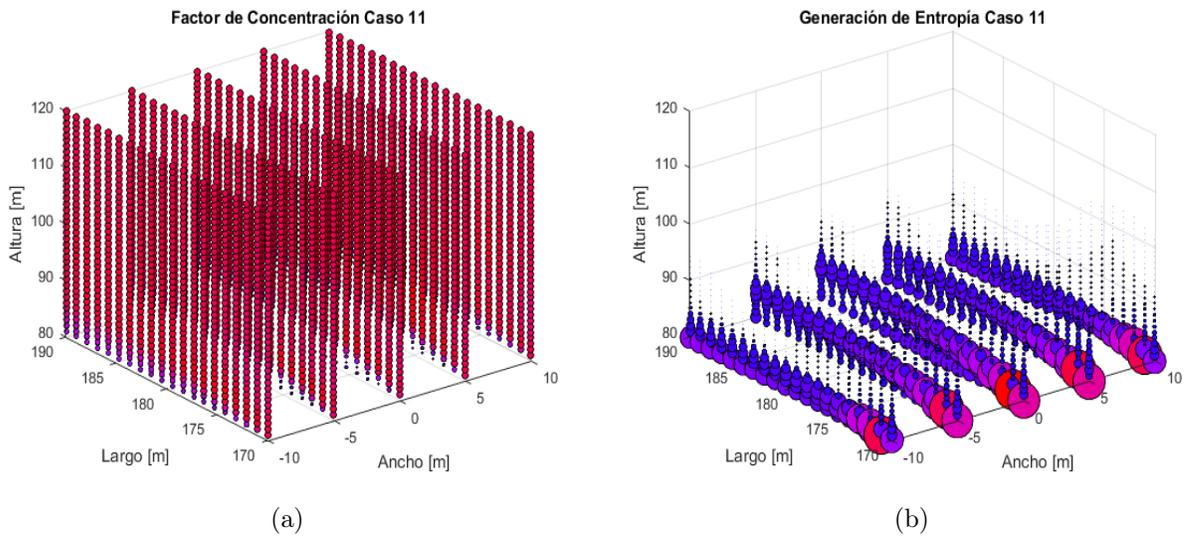


Figura 4.71: Gráficos 3D para el caso 12. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

Caso 13: $a = 40\text{m}$, $b = 20\text{m}$, $c = 60\text{m}$

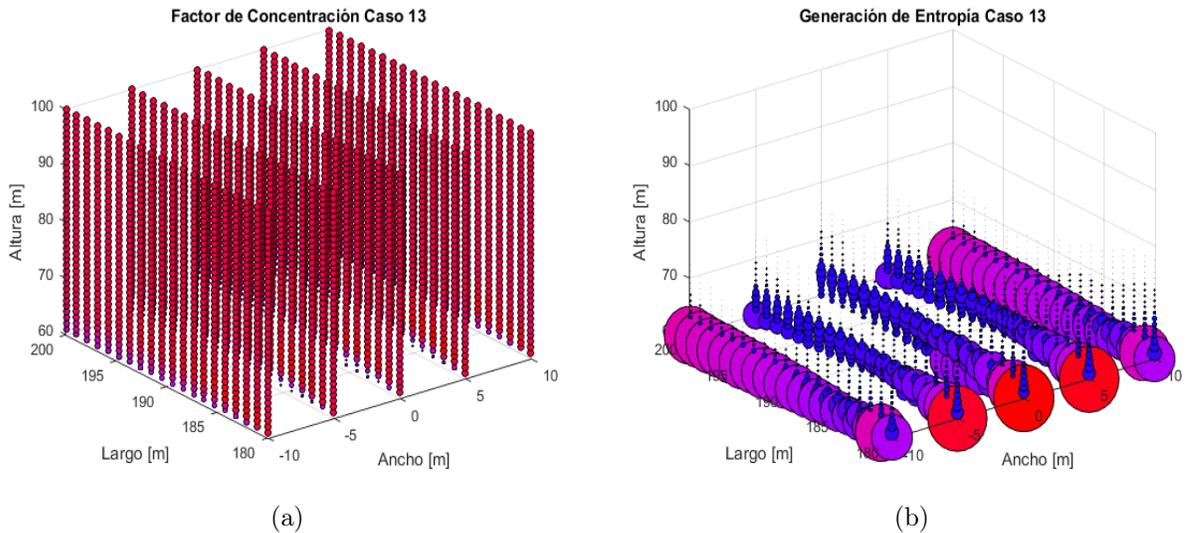


Figura 4.72: Gráficos 3D para el caso 13. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

Caso 14: $a = 40\text{m}$, $b = 20\text{m}$, $c = 70\text{m}$

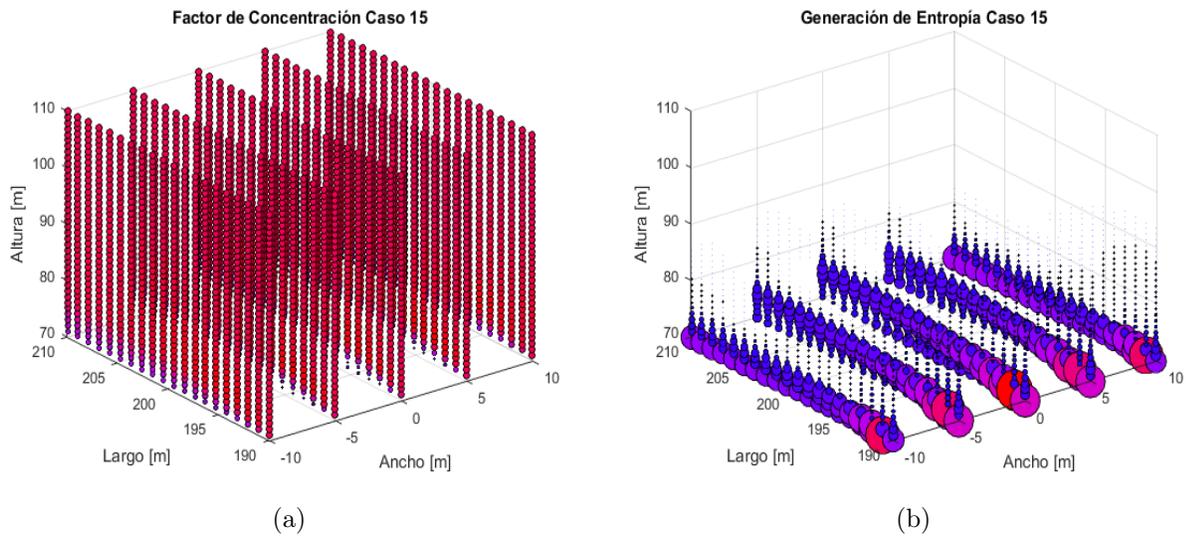


Figura 4.73: Gráficos 3D para el caso 14. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

Caso 15: $a = 40\text{m}$, $b = 20\text{m}$, $c = 80\text{m}$

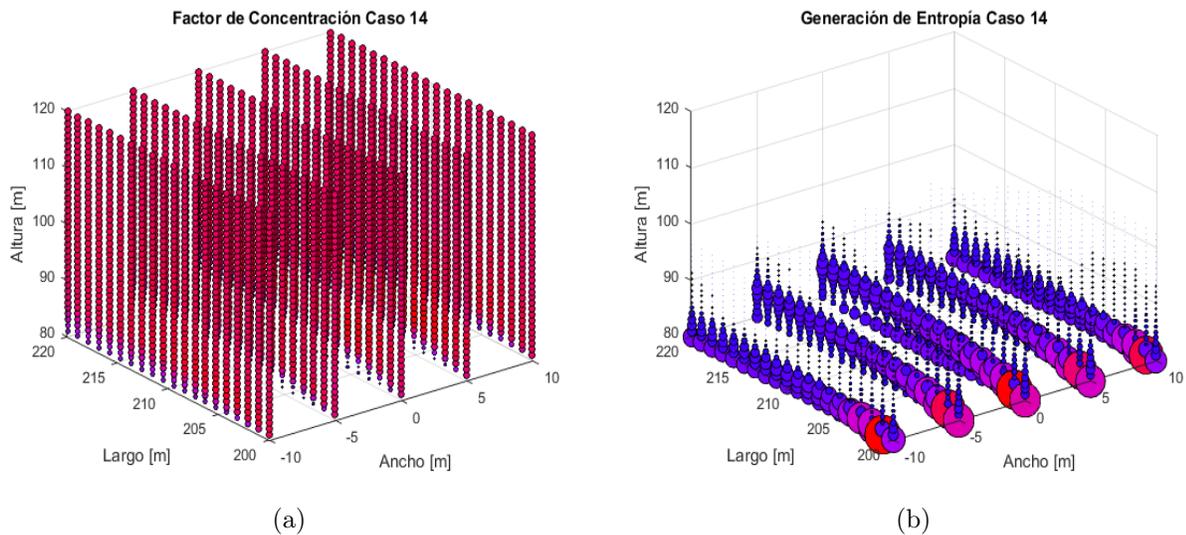


Figura 4.74: Gráficos 3D para el caso 15. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

Caso 16: $a = 40\text{m}$, $b = 40\text{m}$, $c = 60\text{m}$

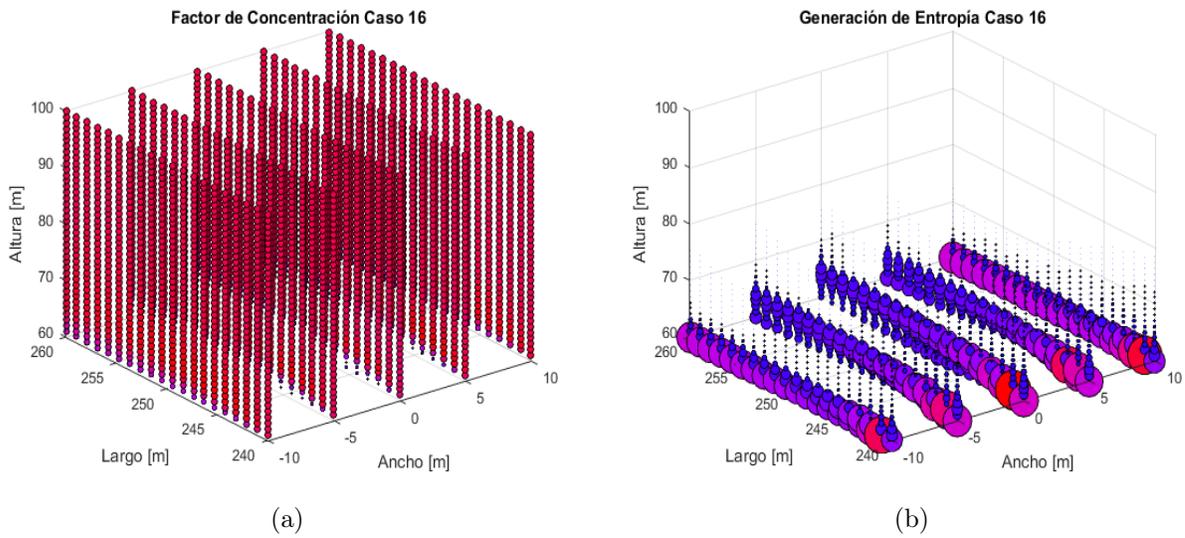


Figura 4.75: Gráficos 3D para el caso 16. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

Caso 17: $a = 40\text{m}$, $b = 40\text{m}$, $c = 70\text{m}$

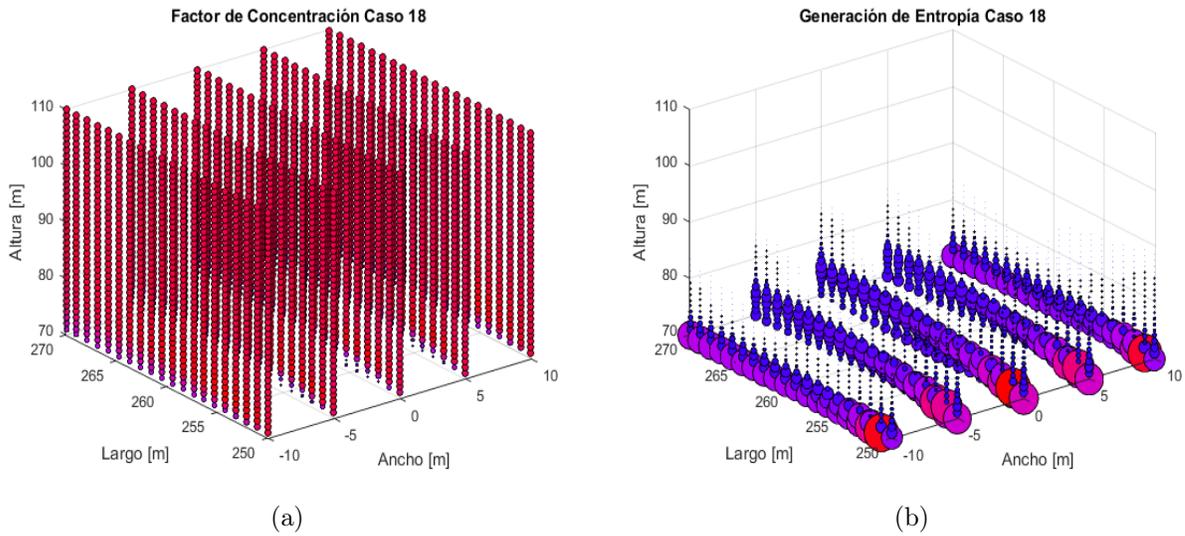


Figura 4.76: Gráficos 3D para el caso 17. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

Caso 18: $a = 40\text{m}$, $b = 40\text{m}$, $c = 80\text{m}$

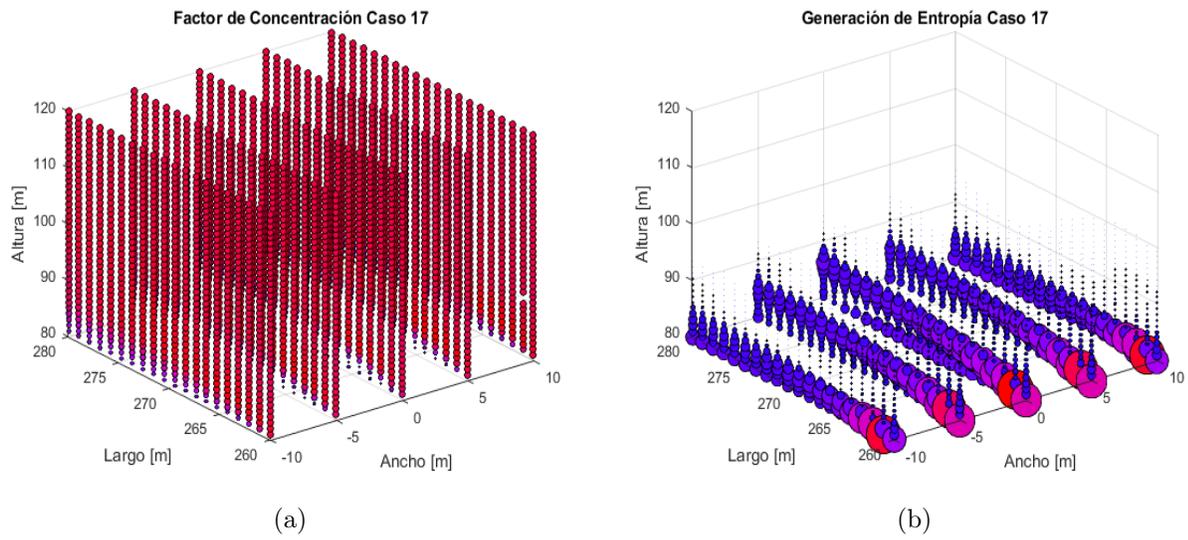
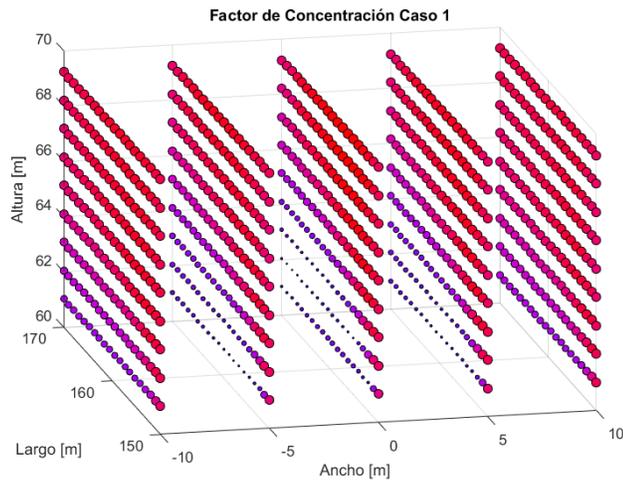


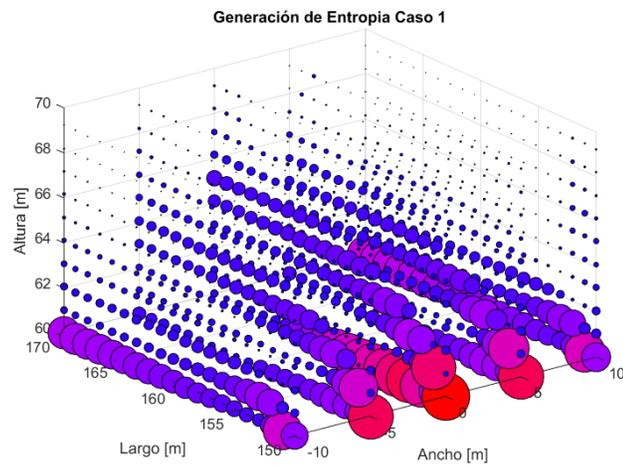
Figura 4.77: Gráficos 3D para el caso 18. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

4.2.1. Resultados por Plano

Tal como se menciona en la metodología, se generan los gráficos cortados a una altura de 10 metros sobre el techo, y posteriormente los gráficos 2D a distintas distancias desde la pared frontal del edificio. En las Figuras 4.82a y 4.82b se presentan el factor de concentración y la tasa de generación de entropía relativa desde el techo hasta una altura de 10 metros, respectivamente para el caso 1.



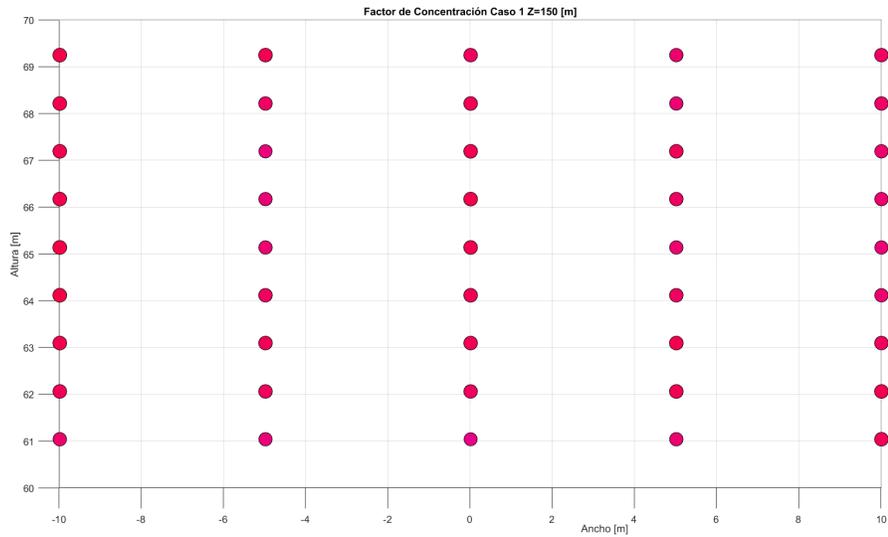
(a)



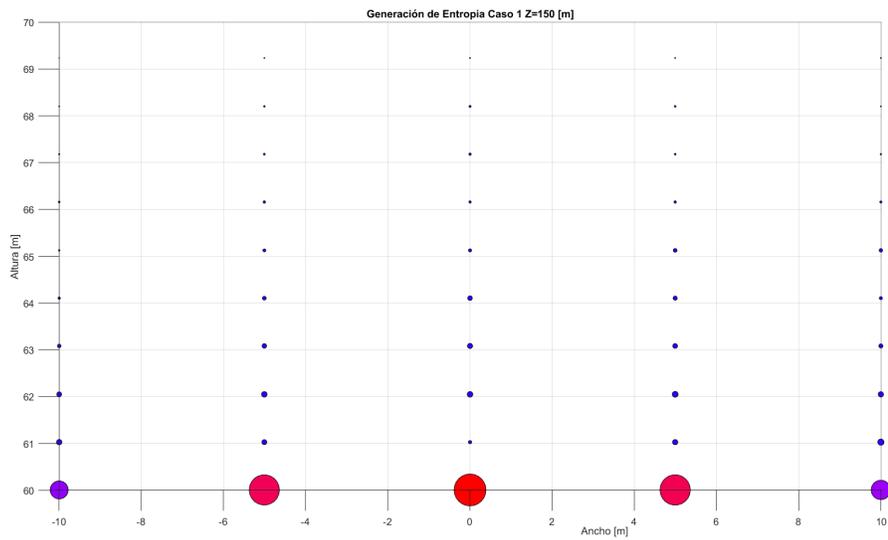
(b)

Figura 4.78: Gráficos 3D hasta una altura de 10 metros sobre el techo para el caso 1. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

De estos mismo gráficos se realizan cortes en los planos $z = 150, 156, 164$ y 170 [m] desde la entrada del dominio, donde la cara frontal del edificio se encuentra en $z = 150$ [m]. En las Figuras 4.79, 4.80, 4.81 y 4.82 se presentan los resultados obtenidos. Cabe destacar que sus valores relativos son con respecto a los máximos y mínimos de todo el volumen y no de la propia cara, por lo que son comparables entre sí.

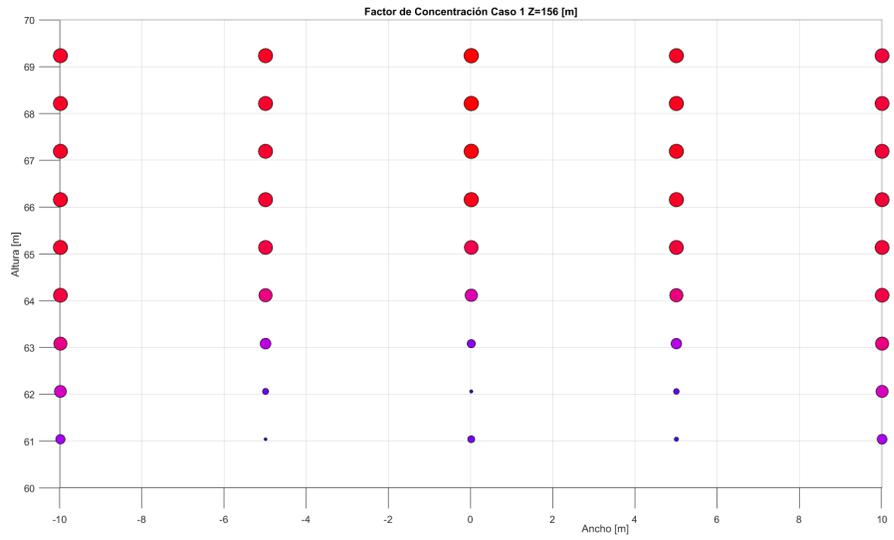


(a)

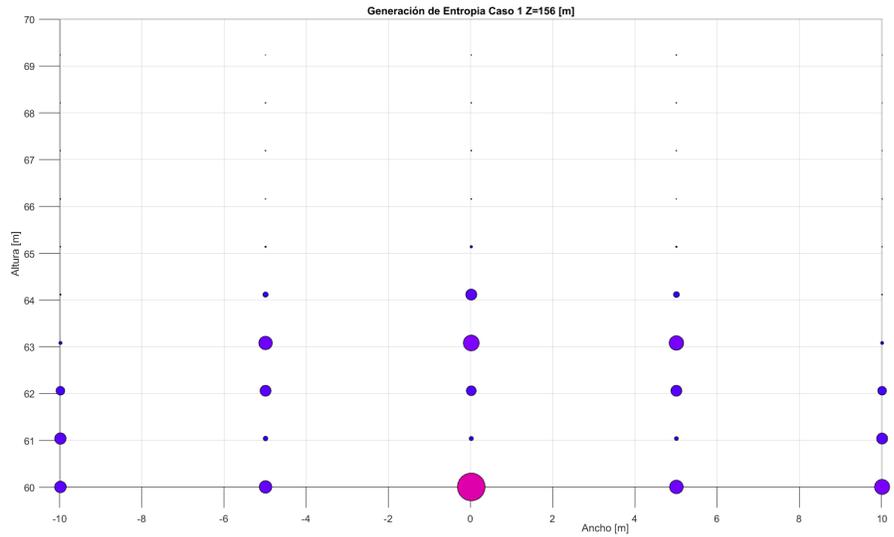


(b)

Figura 4.79: Gráfico 2D en $z = 150$ [m]. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

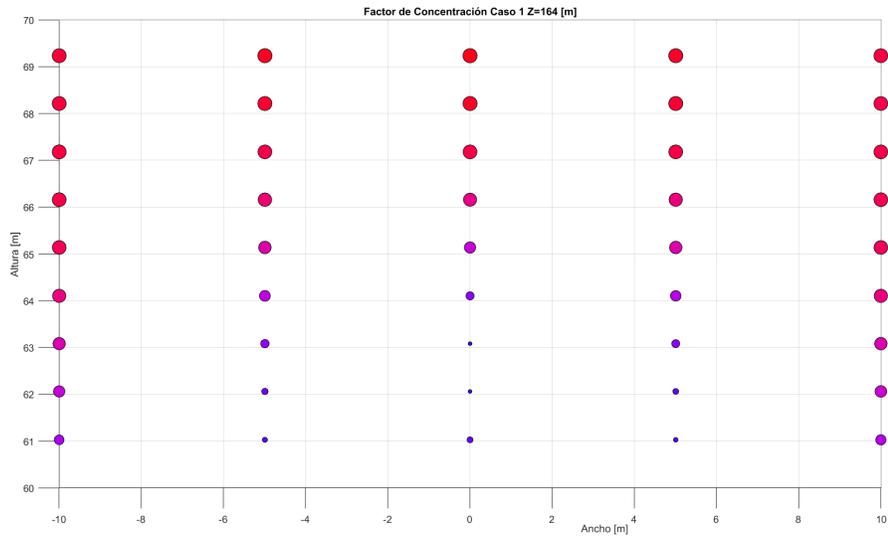


(a)

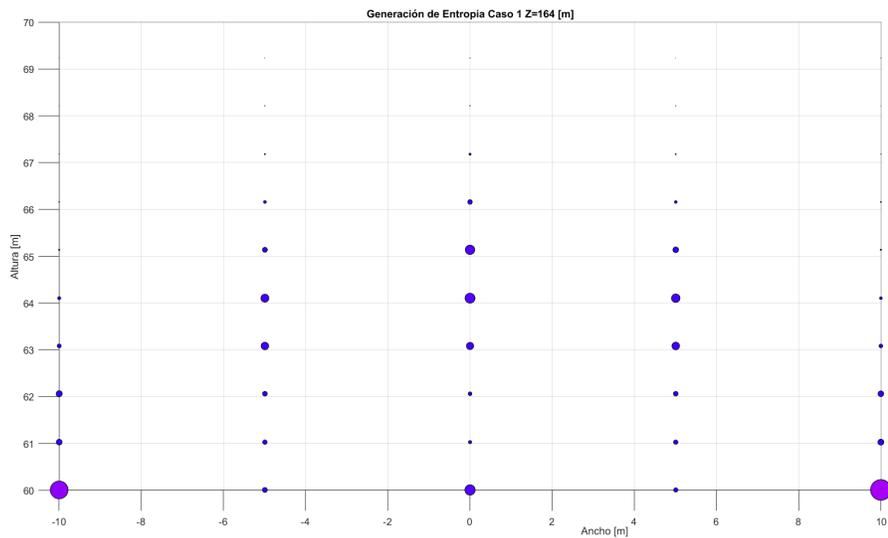


(b)

Figura 4.80: Gráfico 2D em $z = 156$ [m]. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

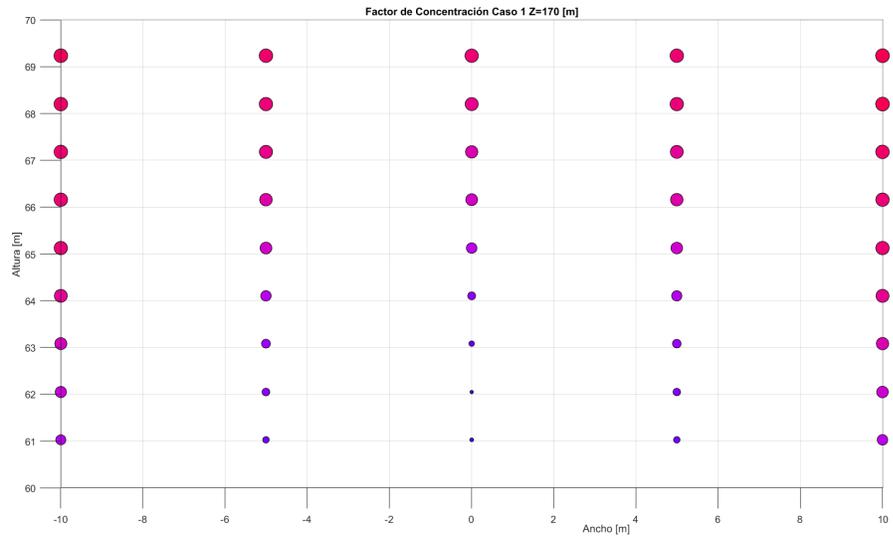


(a)

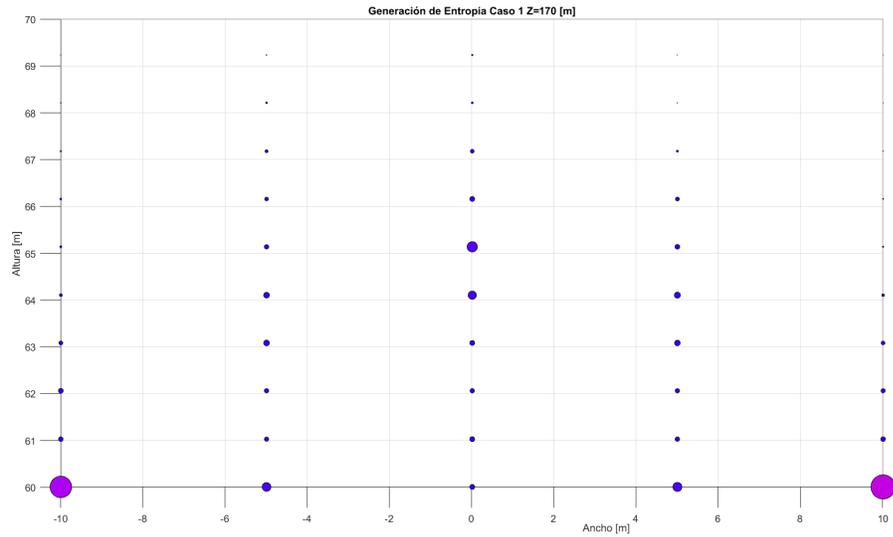


(b)

Figura 4.81: Gráfico 2D en $z = 164$ [m]. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.



(a)



(b)

Figura 4.82: Gráfico 2D em $z = 170$ [m]. (a) Factor de Concentración. (b) Tasa de Generación de Entropía.

Capítulo 5

Análisis de Resultados

En la presente sección se realiza un análisis de los resultados obtenidos según cómo son expuestos. Por una parte, se encuentran los resultados directos entregados por el software ANSYS Fluent y ANSYS CFD-Post, que entregan el comportamiento del flujo a través de contornos de velocidad y presión, y líneas de corriente. Por otro lado, se encuentran los datos numéricos, que corresponde a información procesada en el software Matlab.

A partir de los contornos de presión y velocidad, y las líneas de corriente, se observa que:

- El flujo cambia su trayectoria claramente y se acelera al encontrarse con edificios.
- En cuanto a la presión, se observa un aumento de la presión en la paredes golpeadas por el flujo, mientras que hay zonas de baja presión sobre los edificios.
- A medida que el edificio de interés es más alto o tienen menor cobertura de otros edificios, la zona de alta presión es más grande pues el área de impacto del flujo de aire es mayor. Además, como la velocidad aumenta con la altura debido al perfil logarítmico, la velocidad de impacto en la parte superior del edificio es mayor. Así, mientras más expuesto esté el edificio, el ángulo de deflexión del flujo es mayor. Esto implica que la altura a la que está el punto de estancamiento depende de cuán expuesto esté el edificio, siendo más alto mientras más cubierto esté.
- Al aumentar la distancia entre edificios (parámetro b), existe un mayor estancamiento del flujo en este espacio, creando vórtices de recirculación.
- Mientras más alto el edificio de interés, se crea una perturbación más grande el flujo aguas abajo. Esto puede influir en los edificios que se encuentren en esta zona, generando un menor potencial eólico en ellos.
- Las líneas de corriente muestran como se divide el flujo de aire al impactar sobre una obstáculo, yendo hacia el suelo, hacia los lados y hacia arriba.
- Un edificio, independiente de su altura o la distancia a la que se encuentren otros obstáculos, actúa como acelerador de flujo. Esto ocurre tanto en la parte superior como lateral del edificio, y se visualiza en las líneas de flujo de color rojizo.
- De los contornos de velocidad, se aprecia que luego del primer impacto con los edificios, éstos se comportan como si fueran un gran obstáculo, debido a que no se encuentran expuestos. Esto cambia al tener un edificio que sobresale de esta zona, que en este caso

es el edificio de interés.

- Existen dos casos principales, el de los edificios expuestos al flujo y el de los que se encuentran protegidos. Los primeros tienen fuertes gradientes de presión y altas concentraciones de flujo, mientras que los segundos se comportan como si fuesen parte del edificio que le antecede. Como excepción, se tiene que si la distancia entre edificios es más grande que su longitud, pese a ser de la misma altura los edificios pasan nuevamente a ser obstáculos individuales con sus propios efectos.

A partir de los gráficos tridimensionales de factor de concentración y generación de entropía, se observa que:

- El factor de concentración tiene puntos máximos que se distribuyen en la zona superior del edificio. Sin embargo, la zona más cerca a la pared superior del edificio es la que tiene menor factor de concentración. Esto se debe a la rugosidad propia de las paredes, lo cual impide que exista una velocidad en ellas.
- La diferencia numérica del factor de concentración es mínima, variando entre 1 y 1.1 por sobre el edificio. Por sobre los 5 metros se espera obtener al menos la velocidad del vacío.
- Los resultados numéricos para el factor de concentración indican que la mayor aceleración del flujo ocurre en la parte frontal del edificio, es decir los primeros 10 metros. En la parte posterior se observa una estabilización leve del flujo, por lo que no se aprovecharía todo el potencial disponible en esta zona.
- El factor de concentración hacia la parte posterior del techo del edificio es menor a una misma altura que en la parte frontal de éste, debido a que en esta zona el flujo tiende a reestablecerse localmente debido a la falta de obstáculos.
- La tasa de generación de entropía muestra un cambio mayor entre casos. Cabe destacar que más que representar valores exactos lo que hace es comparar distintos puntos del dominio. El tamaño de los círculos no representa un valor dado, sino que muestra cuán grande es el gradiente en los datos obtenidos para un dominio en particular. Los dominios con círculos más grandes dan cuenta de que existe una gran variación entre los distintos datos obtenidos para ese caso.
- En los gráficos de tasa de generación de entropía se aprecia el comportamiento relativamente simétrico del flujo de aire sobre el edificio, con respecto al eje de simetría en $X = 0$, donde X corresponde al ancho del dominio.
- La mayor tasa de generación de entropía se genera en el borde que enfrenta el flujo del edificio y en los bordes laterales, indicando un flujo de alta vorticidad en estas zonas. Esto se contradice con el resultado obtenido para el factor de concentración en cuanto al emplazamiento óptimo de turbinas eólicas, debido a que zonas de alto potencial eólico corresponden a zonas de elevada generación de entropía, volviendo el recurso disponible de poco provecho.
- Se observa que a medida que aumenta la altura desde el techo del edificio, la tasa de generación de entropía disminuye notoriamente, llegando a desaparecer. Esto indica que el flujo en esta zona se encuentra poco perturbado por la presencia del edificio y por tanto conserva su trayectoria libre.
- Cabe destacar que los gráficos del factor de concentración son muy similares entre sí, y esto se debe a que los valores obtenidos lo son. El cambio se produce en que, como

el ángulo de deflexión es mayor mientras más alto es el edificio, la separación que se produce es mayor y por tanto el factor de concentración tiende a ser menor en la parte posterior de los edificios que tienen mayor altura.

De los resultados para el caso 1:

- Se observa una clara tendencia del factor de concentración por sobre el techo del edificio, donde la cara “anchorepresenta la pared frontal del edificio. Cerca de la zona frontal se aprecia un mayor factor de concentración, el cual va decreciendo hacia la parte posterior a una misma altura. A una mayor altura, se aprecia mayor factor de concentración debido al roce que frena el flujo cerca de la pared.
- Al cortar en 70 [m] la altura del gráfico, se observa una fuerte disminución de la tasa de generación de entropía al aumentar la altura. Tal como se menciona anteriormente, la mayor tasa se genera en el borde frontal del edificio.

De los resultados para el caso 1 presentados de manera disgregada en planos, se observa que:

- El factor de concentración mayor a una misma altura se encuentra más cerca de la pared frontal, es decir, en $z=150$ [m].
- Al avanzar en el sentido de la corriente, es decir con z aumentando, el factor de concentración es menor a una misma altura. Esto debido a la separación del flujo de aire por el roce con el edificio.
- En cuanto a la generación de entropía, se aprecia una alta tasa en la base de la pared frontal, que es donde se produce el choque y cambio de dirección del flujo.
- A medida que aumenta z , la tasa de generación de entropía disminuye en la zona central del techo. Sin embargo, se mantiene en las paredes laterales del edificio debido al cambio de dirección del flujo en estas zonas.

Realizando un paralelo entre factor de concentración y tasa de generación de entropía, se aprecia que:

- La máxima tasa de generación de entropía que ocurre a menor altura se encuentra cerca de los puntos de máximo factor de concentración.
- La generación de entropía es relativamente baja en todos los puntos del techo por una altura superior a cinco metros. Sin embargo, hay puntos a menos distancia del techo del edificio con una baja generación pero a una distancia dada del borde frontal del edificio.
- El lugar recomendado para la instalación de turbinas eólicas es cerca de la pared frontal del edificio, por sobre la altura de 2 metros. Para otras zonas del edificio, se recomienda una altura de 5 metros, que es, de manera general, donde aumenta el factor de concentración y al mismo tiempo disminuye la tasa de generación de entropía.

Capítulo 6

Conclusión

La motivación principal de este trabajo de título es el estudio del emplazamiento de turbinas eólicas en zonas urbanas en función del potencial eólico y de la generación de entropía. Esto se realiza mediante la simulación de diferentes configuraciones de ciudad en el software comercial ANSYS Fluent 17.1. Los objetivos específicos planteados para este trabajo de título son:

- Generar un modelo simplificado de una ciudad para realizar una simulación en software CFD.
- Simular la capa límite atmosférica.
- Representar la distribución de potencial eólico de un lugar.
- Obtener la variación de entropía en distintas configuraciones de ciudad.
- Comparar resultados obtenidos con análisis de generación de entropía y sin él.

Realizando un paralelo, se concluye lo siguiente a partir de estos objetivos:

- Se logra generar diversos modelos de ciudad simplificados.
- Se obtiene la homogeneidad horizontal de capa límite atmosférica, llegando a ella mediante una serie de simulaciones que permiten estabilizar el flujo de acuerdo a las condiciones establecidas en el dominio y las condiciones de borde.
- Se representa la distribución de potencial eólico de un lugar, por medio de las simulaciones y de la herramienta ANSYS CFD-Post. Se logra obtener los campos de velocidades y sus derivadas parciales para entender cómo se comporta el flujo entorno a la zona urbana.
- Existe un gran potencial en los costados del edificio de interés, ya que hay alta concentración de flujo que no se considera para el estudio.
- Se observa que edificios adyacentes a zonas libres de obstáculos, como en estos casos el edificio que enfrenta el flujo libre, poseen una notoria concentración de flujo independiente de su altura. Como a mayor altura hay mayor potencial eólico, también lo tendrá si el edificio es más alto.

Durante el desarrollo de este trabajo de título se encuentra la limitación del modelo de

perfil logarítmico, que consiste en que no puede ser aplicado en dominios más altos a cierto rango. En este caso, debido a que se utiliza una rugosidad de 0.0306 en el suelo, la limitación de altura del dominio es de 420 metros. La limitación yace en que la raíz involucrada en el perfil de velocidad se vuelve negativa, impidiendo obtener datos para el área fuera de rango.

Se concluye que, como el modelamiento matemático de este problema de optimización se encuentra fuera de los alcances de esta memoria de título, se requiere de métodos más sofisticados o de mayor profundidad para analizar los resultados obtenidos.

Se da cuenta de la necesidad de recursos computacionales que se encuentren a la altura de los problemas que se requieren resolver. Así mismo, se debe buscar maneras de optimizar el problema, simplificando el diseño y la cantidad de elementos necesarios para encontrar soluciones confiables a bajo costo computacional y menor tiempo.

Como conclusión, se tiene que los puntos de alto factor de concentración no necesariamente coinciden con los puntos donde existe menor generación de entropía. Incluso, se tiene que la zona con mayor aceleración del flujo es muy cercana a la de mayor generación de entropía. La zona frontal del edificio tiene los mayores factores de concentración del flujo, sin embargo, debe asegurarse una distancia mínima de la pared superior del edificio para aprovechar este potencial.

El lugar recomendado para la instalación de turbinas es cerca de la pared frontal del edificio, por sobre una altura de 2 metros. De no ser posible, se recomienda una altura de 5 metros en cualquier zona, donde se observa que aumenta el factor de concentración y al mismo tiempo disminuye la tasa de generación de entropía.

Bibliografía

- [1] Global Wind Energy Council. Global Wind Report, Annual Market Update (12th annual report). Recuperado de: <http://files.gwec.net/files/GWR2016.pdf>, 2016. Fecha de revisión: 25-06-2017.
- [2] Y. Yang D. Leung. Wind energy development and its environmental impact: A review. (16(2012)):1031–1039, 2011.
- [3] E. Sreevalsan S. Rajapandian G.M. Joselin Herbert, S. Iniyan. A review of wind energy technologies. (11(2007)):1117–1145, 2005.
- [4] Enel. Central Eólica Canela. Recuperado de: <http://www.enelgeneracion.cl/es/conocenos/nuestroNegocio/centrales/Paginas/centraleolicacanela.aspx>, 2018. Fecha de revisión: 29-06-2017.
- [5] M. Niel J. Cace, K. Syngellakis. Urban wind turbines. guidelines for small wind turbines in the built enviroment. page 1106e1118, 2007.
- [6] S. Mertens. Wind energy in the built environment: Concentrator effects of buildings. 2006.
- [7] S. Dudek I. Abohela, N. Hamza. Effect of roof shape, wind direction, building height and urban configuration on the energy yield and positioning of roof mounted wind turbines. (50(2013)):1106e1118, 2012.
- [8] Guide to meteorological instruments and methods of observation. (No. 8):I.5–12, 2007.
- [9] B. Herrmann. Emplazamiento de turbinas eólicas urbanas y potencial energético disponible según la distribución de edificaciones. *Tesis de Magíster*, pages 1–139, 2014.
- [10] T. Coakley J. Bardina, P. Huang. Turbulence modeling validation, testing, and development. *NASA Technical Memorandum 110446*, 1997.
- [11] O.V. Abreu M. Lázaro y P. Espina J.A. Capote, D. Alvear. Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización espacial en la exactitud de las simulaciones computacionales de incendios. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 24(3):227–245, 2008.
- [12] *ANSYS Fluent Theory Guide*.

- [13] A. Bejan. *Convection Heat Transfer*. Wiley, Durham, North Carolina, 4th edition, 1984.
- [14] B. Carissimo J. Franke, A. Hellsten. *Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment*. COST Office, Hamburg, Germany, 4th edition, 2007.
- [15] S. Dudek I. Abohela, N. Hamza. Validating cfd simulation results: Wind flow around a surface mounted cube in a turbulent channel flow. 2012.