



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

**EMPLAZAMIENTO DE TURBINAS EÓLICAS URBANAS Y POTENCIAL
ENERGÉTICO DISPONIBLE SEGÚN LA DISTRIBUCIÓN DE EDIFICACIONES**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MENCIÓN MECÁNICA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

BENJAMÍN HERRMANN PRIESNITZ

**PROFESOR GUÍA:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RICHARD LEBOEUF
ALVARO VALENCIA MUSALEM**

**SANTIAGO DE CHILE
2014**

Tabla de Contenido

Resumen	x
Abstract	XI
Agradecimientos	XII
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Turbinas Eólicas	2
1.2.1. Turbinas Eólicas de Eje Horizontal	2
1.2.2. Turbinas Eólicas de Eje Vertical	3
1.2.3. Turbinas Eólicas Aumentadas por Edificios	4
1.3. Emplazamiento	6
1.4. Definición del Problema	6
1.5. Objetivo General	6
1.6. Objetivos Específicos	6
2. Capa Límite Atmosférica	8
2.1. Viento en Ambientes Rurales	8
2.2. Viento en Ambientes Urbanos	10
2.3. Independencia del Número de Reynolds	11
2.4. Concentración de Flujo en Edificios	11
3. Dinámica de Fluidos Computacional	13
3.1. Método de Volúmenes Finitos	13

3.2.	Homogeneidad Horizontal de la Capa Límite Atmosférica	14
3.2.1.	Modelo de Turbulencia	14
3.2.2.	Dimensiones del Dominio	15
3.2.3.	Condiciones de Borde	16
3.3.	Consideraciones Para Flujos en Ambientes Urbanos	19
3.3.1.	Representación Geométrica de Obstáculos	19
3.3.2.	Mallado	19
3.3.3.	Esquemas de Discretización	20
3.3.4.	Criterio de Convergencia	20
4.	Metodología	21
4.1.	Definición del Problema	21
4.2.	Descripción de Entorno Urbano	22
4.3.	Dinámica de Fluidos Computacional	23
4.3.1.	Dominio Computacional	24
4.3.2.	Método de Solución	25
4.3.3.	Condiciones de Borde	25
4.3.4.	Mallado y Análisis de Sensibilidad	27
4.3.5.	Homogeneidad Horizontal de la Capa Límite Atmosférica	27
4.3.6.	Validación	28
4.3.7.	Exporte de Resultados	28
4.4.	Modelamiento Matemático	28
4.4.1.	Análisis del Comportamiento del Factor de Concentración	29
4.4.2.	Factor de Concentración Máximo y sus Coordenadas	30
4.4.3.	Potencial Energético	30
4.5.	Análisis de Resultados	32
5.	Resultados	34
5.1.	Resultados del CFD	34
5.1.1.	Mallado y Análisis de Sensibilidad	34
5.1.2.	Homogeneidad Horizontal de la Capa Límite Atmosférica	37

5.1.3.	Validación	37
5.1.4.	Detalle de Resultados por Caso	40
5.1.5.	Análisis de Resultados	82
5.2.	Comportamiento del Factor de Concentración	83
5.2.1.	Detalle de Resultados por Caso	83
5.2.2.	Factor de Concentración Máximo: Resultados Globales	103
5.2.3.	Análisis de Resultados	105
5.3.	Emplazamiento	107
5.3.1.	Modelamiento Matemático	107
5.3.2.	Resultados Globales	110
5.3.3.	Análisis de Resultados	113
5.4.	Potencial Energético	114
5.4.1.	Modelamiento Matemático	115
5.4.2.	Resultados Globales	117
5.4.3.	Análisis de Resultados	121
6.	Conclusiones	123
	Referencias	125

Índice de Figuras

1.1. Capacidad eólica global acumulada por año	1
1.2. Turbinas eólicas de eje horizontal	3
1.3. Turbinas eólicas de eje vertical	4
1.4. Turbinas eólicas aumentadas por edificios	5
2.1. Viento en ambientes rurales	9
2.2. Viento en ambientes urbanos	10
2.3. Aceleración del flujo sobre un edificio	12
3.1. Condición de borde de entrada	17
4.1. Parámetros de descripción del entorno urbano	22
4.2. Extensiones del dominio computacional	24
4.3. Sistema de coordenadas utilizado en los modelos matemáticos	29
5.1. Análisis de sensibilidad de malla	35
5.2. Eficiencia del recurso computacional	35
5.3. Malla generada para el caso 1	36
5.4. Homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica	37
5.5. Estructuras características del flujo sobre un cubo	38
5.6. Coeficiente de presión sobre caras de cubo	40
5.7. Contornos de magnitud de velocidad, caso 1	41
5.8. Contornos de presión relativa, caso 1	42
5.9. Líneas de corriente, caso 1	42
5.10. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 1	43

5.11. Contornos de magnitud de velocidad, caso 2	44
5.12. Contornos de presión relativa, caso 2	44
5.13. Líneas de corriente, caso 2	45
5.14. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 2	45
5.15. Contornos de magnitud de velocidad, caso 3	46
5.16. Contornos de presión relativa, caso 3	46
5.17. Líneas de corriente, caso 3	47
5.18. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 3	47
5.19. Contornos de magnitud de velocidad, caso 4	48
5.20. Contornos de presión relativa, caso 4	48
5.21. Líneas de corriente, caso 4	49
5.22. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 4	49
5.23. Contornos de magnitud de velocidad, caso 13	50
5.24. Contornos de presión relativa, caso 13	50
5.25. Líneas de corriente, caso 13	51
5.26. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 13	51
5.27. Contornos de magnitud de velocidad, caso 14	52
5.28. Contornos de presión relativa, caso 14	52
5.29. Líneas de corriente, caso 14	53
5.30. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 14	53
5.31. Contornos de magnitud de velocidad, caso 15	54
5.32. Contornos de presión relativa, caso 15	54
5.33. Líneas de corriente, caso 15	55
5.34. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 15	55
5.35. Contornos de magnitud de velocidad, caso 16	56
5.36. Contornos de presión relativa, caso 16	56
5.37. Líneas de corriente, caso 16	57
5.38. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 16	57
5.39. Contornos de magnitud de velocidad, caso 17	58
5.40. Contornos de presión relativa, caso 17	58

5.41. Líneas de corriente, caso 17	59
5.42. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 17	59
5.43. Contornos de magnitud de velocidad, caso 18	60
5.44. Contornos de presión relativa, caso 18	60
5.45. Líneas de corriente, caso 18	61
5.46. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 18	61
5.47. Contornos de magnitud de velocidad, caso 19	62
5.48. Contornos de presión relativa, caso 19	62
5.49. Líneas de corriente, caso 19	63
5.50. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 19	63
5.51. Contornos de magnitud de velocidad, caso 26	64
5.52. Contornos de presión relativa, caso 26	64
5.53. Líneas de corriente, caso 26	65
5.54. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 26	65
5.55. Contornos de magnitud de velocidad, caso 27	66
5.56. Contornos de presión relativa, caso 27	66
5.57. Líneas de corriente, caso 27	67
5.58. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 27	67
5.59. Contornos de magnitud de velocidad, caso 28	68
5.60. Contornos de presión relativa, caso 28	68
5.61. Líneas de corriente, caso 28	69
5.62. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 28	69
5.63. Contornos de magnitud de velocidad, caso 29	70
5.64. Contornos de presión relativa, caso 29	70
5.65. Líneas de corriente, caso 29	71
5.66. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 29	71
5.67. Contornos de magnitud de velocidad, caso 30	72
5.68. Contornos de presión relativa, caso 30	72
5.69. Líneas de corriente, caso 30	73
5.70. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 30	73

5.71. Contornos de magnitud de velocidad, caso 35	74
5.72. Contornos de presión relativa, caso 35	74
5.73. Líneas de corriente, caso 35	75
5.74. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 35	75
5.75. Contornos de magnitud de velocidad, caso 36	76
5.76. Contornos de presión relativa, caso 36	76
5.77. Líneas de corriente, caso 36	77
5.78. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 36	77
5.79. Contornos de magnitud de velocidad, caso 37	78
5.80. Contornos de presión relativa, caso 37	78
5.81. Líneas de corriente, caso 37	79
5.82. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 37	79
5.83. Contornos de magnitud de velocidad, caso 40	80
5.84. Contornos de presión relativa, caso 40	80
5.85. Líneas de corriente, caso 36	81
5.86. Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 40	81
5.87. Contornos de factor de concentración por planos, caso 1	84
5.88. Contornos de factor de concentración por planos, caso 2	85
5.89. Contornos de factor de concentración por planos, caso 3	86
5.90. Contornos de factor de concentración por planos, caso 4	87
5.91. Contornos de factor de concentración por planos, caso 13	88
5.92. Contornos de factor de concentración por planos, caso 14	89
5.93. Contornos de factor de concentración por planos, caso 15	90
5.94. Contornos de factor de concentración por planos, caso 16	91
5.95. Contornos de factor de concentración por planos, caso 17	92
5.96. Contornos de factor de concentración por planos, caso 18	93
5.97. Contornos de factor de concentración por planos, caso 19	94
5.98. Contornos de factor de concentración por planos, caso 26	95
5.99. Contornos de factor de concentración por planos, caso 27	96
5.100 Contornos de factor de concentración por planos, caso 28	97

5.101	Contornos de factor de concentración por planos, caso 29	98
5.102	Contornos de factor de concentración por planos, caso 30	99
5.103	Contornos de factor de concentración por planos, caso 35	100
5.104	Contornos de factor de concentración por planos, caso 36	101
5.105	Contornos de factor de concentración por planos, caso 37	102
5.106	Contornos de factor de concentración por planos, caso 40	103
5.107	Factor de concentración máximo en función de c para $b = 0.5$	104
5.108	Factor de concentración máximo en función de c para $b = 2$	104
5.109	Factor de concentración máximo en función de a para $b = 0.5$	105
5.110	Factor de concentración máximo en función de a para $b = 2$	105
5.111	Calidad de modelos versus el número de coeficientes ajustados	108
5.112	Diagrama de emplazamiento: X_c para $y = 0$	110
5.113	Diagrama de emplazamiento: X_c para $y = 0.5$	111
5.114	Diagrama de emplazamiento: Z_c para $y = 0$	112
5.115	Diagrama de emplazamiento: Z_c para $y = 0.5$	113
5.116	Calidad del modelo versus el número de coeficientes ajustados	116
5.117	Error de PE_{Model} sobre PE_{Data}	117
5.118	Decaimiento espacial del potencial energético para distintos valores de K	118
5.119	Factor de decaimiento espacial en función de c para $b = 0.5$	118
5.120	Factor de decaimiento espacial en función de c para $b = 2$	119
5.121	Factor de decaimiento espacial en función de a para $b = 0.5$	119
5.122	Factor de decaimiento espacial en función de a para $b = 2$	120

Índice de Tablas

2.1. Valores típicos del largo de rugosidad z_0	9
2.2. Valores típicos de los parámetros de la ley logarítmica para una ciudad	10
3.1. Constantes del modelo k - ε estándar	15
4.1. Parámetros adimensionales de descripción del entorno urbano	23
4.2. Condiciones de borde	27
5.1. Métricas de la malla	36
5.2. Largos específicos en las estructuras del flujo	38
5.3. Calidad del ajuste para diferentes funciones	107
5.4. Coeficientes ajustados para X_{cModel}	109
5.5. Coeficientes ajustados para Z_{cModel}	109
5.6. Coeficientes ajustados para $C_{fMaxModel}$	109
5.7. Coeficientes ajustados para K en PE_{Model}	116
5.8. Valores extremos de PE_{Model}	120

Resumen

Este estudio presenta simulaciones numéricas del flujo de aire sobre edificios para diferentes configuraciones del entorno urbano. Al pasar sobre un obstáculo, el flujo de aire se acelera, este fenómeno puede ser aprovechado para la instalación de turbinas eólicas de pequeña escala. El principal objetivo de esta investigación es estudiar el recurso eólico cerca de edificios, en función de la configuración del entorno urbano, para así definir emplazamientos que sean favorables y estimar el potencial energético asociado. Esto se hace utilizando el método de volúmenes finitos mediante el software comercial *ANSYS Fluent 14.5* y un posterior modelamiento matemático de las soluciones usando *Wolfram Mathematica 8.0*. A partir los resultados, se encuentra que la potencia disponible usando edificios como concentradores del recurso puede ser hasta 29% mayor que en el flujo libre. Se observa que la configuración urbana, el posicionamiento y el dimensionado de la turbina eólica son factores de gran importancia a la hora de ejecutar un proyecto. Estos resultados son explicados a través de los fenómenos físicos involucrados. Para futuros trabajos se propone incorporar el efecto de la aceleración vertical del aire, considerar más parámetros para describir el entorno urbano y retroalimentar los modelos matemáticos mediante mediciones de viento in-situ.

Abstract

Numerical simulations of the wind flow over buildings for different urban configurations have been carried out. As air passes over an obstacle, it accelerates. This effect presents an opportunity for the installation of small-scale wind turbines. The main goal of this research is to determine the influence of the urban configuration on the wind resource near buildings to evaluate suitable turbine locations and to assess their potential energy yield. This is accomplished by means of the finite volume method using the commercial software *ANSYS Fluent 14.5* followed by mathematical modeling of the results with *Wolfram Mathematica 8.0*. These results suggest that, by using buildings as flow concentrators, an increase of up to 29% in the energy yield can be achieved compared to the free stream. It is observed that in an urban configuration, wind turbine position and size play a major role in a project's feasibility. Results are explained due to variations in the dimensions of the separation bubble over the buildings' rooftops. Recommendations are made for future investigations that incorporate the effect of vertical air acceleration, use more parameters to describe the urban environment, and provide validation for the mathematical models with in-situ wind measurements.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mi familia por el cariño, el apoyo incondicional y las increíbles experiencias a lo largo de mi vida.

También me gustaría agradecer a Williams Calderón, mi profesor, mentor y quizás algún día colega por toda su ayuda y motivación en el desarrollo de este trabajo. Gracias también son extendidas al profesor Richard LeBoeuf por sus valiosas contribuciones y al profesor Alvaro Valencia por aceptar ser miembro de la comisión evaluadora.

Quisiera agradecerle a mi polola por alegrarme todos los días durante estos dos años que llevamos juntos.

Un abrazo para mis amigos de toda la vida por hacerse presentes en este trabajo al estar siempre disponibles para distraerme.

Un especial reconocimiento a los mecánicos, amigos con los que compartí momentos clave para mi formación y otros no tanto (generalmente los más memorables). Gracias por los apuntes cuando los necesité y por los asados que no eran necesarios, pero que de todas maneras mejoraron mi experiencia universitaria. No me cabe duda alguna de que esta es una generación con fuertes proyecciones tanto profesionales como personales.

Por último, me gustaría agradecerle a todos los que han sido parte mi vida durante estos últimos siete años, en especial a la Escuela de Ingeniería por los desafíos presentados y a mi mismo por saber superarlos.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

El cambio climático ha empujado a la ciencia y la ingeniería hacia la búsqueda de soluciones para reemplazar las tecnologías de generación de energía eléctrica en base a combustibles fósiles. Como consecuencia, han habido notables avances en el desarrollo e investigación de tecnologías que contribuyen a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Durante los últimos años, la eólica ha sido una de las fuentes de energía renovable con mayor crecimiento a nivel mundial. El GWEC (*Global Wind Energy Council*) es una asociación internacional encargada de entregar información acerca de la industria eólica a nivel global. Según esta organización, la capacidad instalada acumulada a nivel global alcanza los 282GW a fines del año 2012 (ver 1.1). GWEC entrega cada año un reporte del mercado eólico global, en su última actualización se afirma que para finales del año 2012 la energía eólica se hace presente en 79 países, teniendo 24 de estos una capacidad instalada mayor a 1,000MW [1].

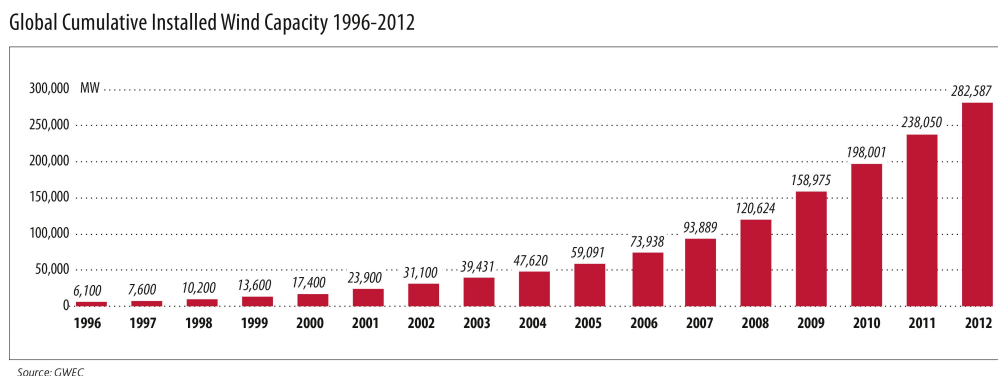


Figura 1.1: Capacidad de energía eólica instalada acumulada a nivel global desde el año 1996 hasta el 2012.

Fuente: GWEC [1]

Una consecuencia del rápido crecimiento de la industria eólica es que se comienzan a investigar en mayor medida el impacto ambiental y las externalidades negativas asociadas a los grandes parques

eólicos. Mientras convierten la energía cinética del viento en electricidad, las turbinas eólicas modifican los intercambios y la transferencia de energía, momentum, masa y humedad entre la superficie del suelo y la atmósfera. Estos cambios, si son lo suficientemente grandes espacialmente, pueden afectar de manera importante el clima local y aumentar la temperatura del suelo [2]. Además, existe una tendencia a nivel mundial a avanzar hacia edificios o pequeñas comunidades autosustentables. El concepto consiste en generar la energía donde se va a consumir para evitar pérdidas asociadas a la transmisión y disminuir el impacto ambiental mediante el uso de diversas tecnologías limpias de pequeña escala que funcionen de manera complementaria.

Esta corriente de sustentabilidad urbana y la relevancia del explosivo crecimiento de la industria eólica (dejando de lado los parques de gran escala por su impacto ambiental), resultan en la idea del uso de turbinas eólicas de pequeña escala en ambientes urbanos. Este tema es el eje central de este trabajo.

1.2. Turbinas Eólicas

Una turbina eólica se define como un elemento que transforma la energía cinética del viento en energía mecánica, la que a su vez puede ser transformada en energía eléctrica o realizar un trabajo útil. Esta energía mecánica se ha utilizado a través de la historia para molienda o levantamiento de agua, pero, a partir del siglo XX se empezaron a usar para generar potencia eléctrica. Actualmente, las turbinas eólicas se pueden clasificar en dos tipos: de eje horizontal (HAWTs, por sus siglas en inglés: *Horizontal Axis Wind Turbines*) y de eje vertical (VAWTs, por sus siglas en inglés: *Vertical Axis Wind Turbines*).

1.2.1. Turbinas Eólicas de Eje Horizontal

Las turbinas de eje horizontal son las más comunes y constituyen la mayor parte de la capacidad instalada actual. Son aquellas que tienen su rotor paralelo al suelo (ver Fig. 1.2). Entre sus características, se tiene que son estables en su giro, pueden llegar a velocidades de punta de álabe muy altas y están más estudiadas, por lo que hay mayor certeza al diseñar. Sus desventajas son que deben estar dispuestas según la dirección predominante del viento o contar con un mecanismo de orientación que permita seguir dicha dirección. Además, el generador eléctrico debe ser puesto en altura para estar en línea con el giro sin tener reducciones mecánicas (grandes fuentes de pérdida). Esto último dificulta y encarece la mantención [3].

La tendencia para este tipo de tecnología ha sido construirlas del mayor tamaño posible y disponerlas en parques eólicos de cada vez mayor envergadura. Actualmente, las turbinas de mayor potencia tienen una capacidad de 7.5MW y las de mayor tamaño tienen un diámetro de rotor que supera los 150m [1].



Figura 1.2: Turbinas eólicas de eje horizontal en Parque Eólico El Arrayán, Chile. Fabricante: Siemens

1.2.2. Turbinas Eólicas de Eje Vertical

Las turbinas de eje vertical son aquellas que tienen su rotor perpendicular al suelo y giran verticalmente. Al contrario de las HAWT, son mucho menos comunes y probadas. Poseen varias desventajas que han desacelerado su desarrollo: tienen problemas para comenzar su rotación (*self-starting*) sin ayuda externa [4], además las cargas dinámicas que se generan sobre los perfiles alares y el eje son significativas, por lo que la falla por fatiga es un problema frecuente [5].

Sin embargo, estas turbinas poseen ciertas características que las de eje horizontal no pueden cumplir. Primero, son omnidireccionales; es decir, pueden girar sin importar desde que dirección venga el viento, sin necesidad de complejos mecanismos de orientación [6]. Esto las hace extremadamente útiles para generar potencia en sitios donde la dirección del viento no es constante o de alta turbulencia [4]. Además son menos ruidosas que las de eje horizontal, lo que favorece su instalación en zonas urbanas [7].

Estas turbinas se pueden clasificar según dos categorías: las de tipo Savonius (ver Fig. 1.3a), y las de tipo Darrieus (ver Fig. 1.3b). Las de tipo Savonius se basan en arrastre (*Drag*) y, en general, tienen bajo coeficiente de potencia, pues su velocidad tangencial no puede ser más rápida que la velocidad del viento; son útiles para aplicaciones de baja potencia. Las de tipo Darrieus se basan en sustentación (*Lift*), por lo que se puede obtener una velocidad tangencial de la turbina mayor que la velocidad del viento, y llegar a potencias y eficiencias mucho mayores.

Las ventajas de estas tecnologías apuntan a un desarrollo pensado en equipos de pequeña escala, es decir con una potencia menor a 50kW, suficiente para 5–10 viviendas dependiendo del nivel de consumo eléctrico. Actualmente estas turbinas se fabrican para la generación de energía eléctrica en comunidades aisladas desconectadas de la red, o para ambientes urbanos donde se puede aprovechar un potencial que esta fuera de los alcances de las grandes turbinas convencionales [7].

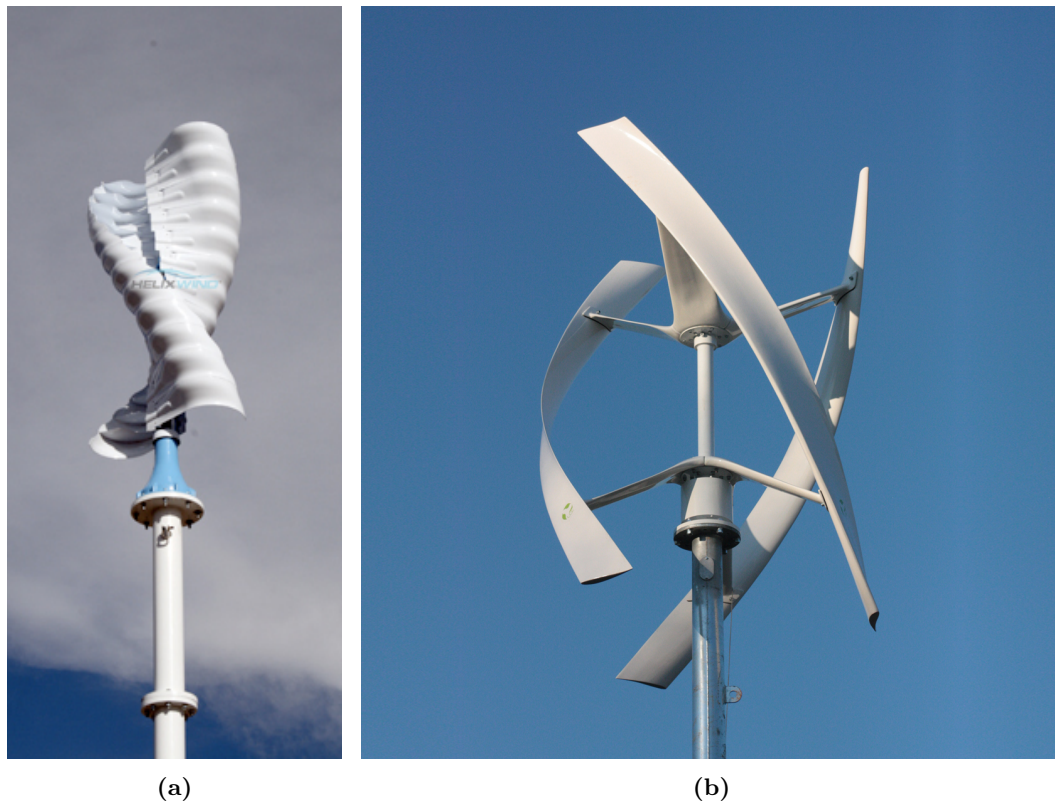


Figura 1.3: Turbinas eólicas de eje vertical: (a) Turbina tipo Savonius, fabricante: HelixWind. (b) Turbina tipo Darrieus, fabricante: Urban Green Energy.

1.2.3. Turbinas Eólicas Aumentadas por Edificios

En un ambiente rural la velocidad promedio del viento es considerablemente mayor a la que se puede encontrar en ambientes urbanos. Sin embargo, cerca de edificaciones se pueden encontrar zonas con velocidades sorprendentemente altas. Esto ocurre debido a la aceleración del flujo al pasar alrededor del obstáculo. Dichas zonas con un aumento del potencial energético son particularmente interesantes para la instalación de turbinas eólicas. De esta idea nace el concepto de turbinas eólicas aumentadas por edificios (BAWTs, por sus siglas en inglés: *Building Augmented Wind Turbines*) [8].

Existen tres configuraciones básicas de BAWTs (ver Fig. 1.4) que se pueden distinguir según el principio aerodinámico con que operan:

- Turbina eólica en el tejado o costado del edificio (ver Fig. 1.4a).
- Turbina eólica entre edificios con forma aerodinámica (ver Fig. 1.4b).
- Turbina eólica en un ducto a través del edificio (ver Fig. 1.4c).

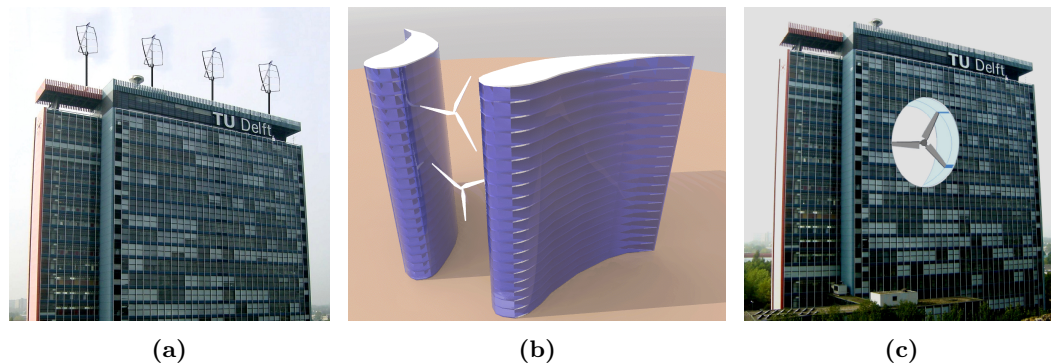


Figura 1.4: Impresiones artísticas de los tres principios de aumento de potencia eólica por edificios: (a) Sobre edificio. (b) Entre edificios con forma aerodinámica. (c) A través de un edificio.

Las turbinas eólicas que explotan los aumentos en la velocidad del viento alrededor de estructuras, deben ser diseñadas para diferentes tipos de flujo y bajas emisiones de ruido. Las bajas emisiones de ruido se encuentran acopladas a menores velocidades de punta de álabe, lo que resulta en un flujo más viscoso y por lo tanto un coeficiente de arrastre mayor de las palas. Velocidades de punta de álabe bajas junto con dimensiones pequeñas de los perfiles alares puede ser muy demandante al momento de diseñar y debe ser considerado cuidadosamente. Tomando en cuenta posibles modificaciones a los edificios para obtener buenas propiedades del flujo de viento, la opción más atractiva es la de situar las turbinas cerca (sobre o al costado) de edificios. En este caso no se requieren cambios a la estructura y la efecto de la concentración del flujo es muy positivo. La segunda opción más prometedora es la de poner un aerogenerador en un ducto a través de un edificio debido a que el efecto del aumento de potencia es muy alto, pero la estructura necesitaría adaptaciones. La ubicación entre edificios con forma aerodinámica es la menos prometedora ya que los edificios requerirían modificaciones drásticas [8]

En el presente se explora la opción de situar aerogeneradores cerca (sobre o al costado) de edificios, debido a que las turbinas apropiadas están siendo diseñadas pero los edificios ya existen. Las otras dos formas de aumento de potencia son de interés pero para un horizonte temporal mucho mayor, ya que requieren diseños tanto de turbinas específicas como de los edificios.

1.3. Emplazamiento

La energía eólica tiene la capacidad de integrarse a un entorno urbano. Para lograr esto, los proyectos deben lidiar con la incertidumbre que trae consigo la complejidad del recurso eólico en un ambiente urbano. La configuración de obstáculos modifica el flujo de viento, provocando que este se acelere en algunas zonas del espacio y que se desacelere en otras. Considerando las fuertes variaciones que pueden existir en la magnitud del recurso eólico a solo pasos de distancia, se hace relevante el tema del emplazamiento de los equipos. Si bien el concepto de turbinas aumentadas por edificios asegura resultados positivos para el caso de edificios aislados, no es así de simple para una zona urbana donde el flujo se ve modificado por cada obstáculo. En este escenario el emplazamiento pasa a ser un factor clave en el aprovechamiento del potencial energético, ya que una configuración favorable puede significar mejoras de hasta un 20 % (con respecto al recurso en una zona rural), mientras que en para un configuración urbana desfavorable la productividad energética puedes ser prácticamente nula [9]. Esto fácilmente puede definir la viabilidad de un proyecto.

1.4. Definición del Problema

El problema a resolver en esta tesis es el ajuste de un modelo matemático para la concentración de flujo sobre edificios en función de la configuración urbana, basado en resultados de dinámica de fluidos computacional. Esto consiste en simular mediante el método de volúmenes finitos el flujo de viento sobre una ciudad, luego se estudia el aumento de la velocidad cerca de un edificio variando la configuración de los obstáculos aguas arriba del mismo. Posteriormente se ajusta un modelo matemático que relacione los resultados de las simulaciones con los parámetros para cada caso, de manera que se puedan definir emplazamientos favorables para turbinas eólicas y el potencial energético asociado como función del entorno urbano.

1.5. Objetivo General

El principal objetivo de esta investigación es estudiar el recurso eólico cerca de edificios, en función de la configuración del entorno urbano, para definir que emplazamientos son favorables y cual es su potencial energético.

1.6. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de este trabajo de investigación son:

- Estudiar el comportamiento y los fenómenos físicos asociados a la fluidodinámica de un flujo de aire sobre un entorno urbano.
- Investigar la dependencia entre la concentración de flujo sobre un edificio y la configuración de obstáculos aguas arriba de este.
- Construir modelos matemáticos que relacionen el entorno urbano de un edificio con la aceleración horizontal del viento sobre este, para definir un emplazamiento para turbinas eólicas y estimar el potencial energético asociado a dicha ubicación.

En los capítulos restantes de este estudio se responde a los objetivos aquí presentados.

Capítulo 2

Capa Límite Atmosférica

La capa límite atmosférica, también conocida como capa límite planetaria, corresponde a la parte más baja de la atmósfera y su comportamiento se ve influenciado directamente por su contacto con la superficie terrestre. Esta juega un rol importante en la interacción entre el suelo planetario y el resto de la atmósfera, ya que es responsable de la transferencia de calor e intercambios de masa, humedad, momentum y turbulencia. La existencia de una capa límite requiere que los flujos de gran escala tengan variaciones verticales pronunciadas, para que la velocidad cambie desde esta de flujos fuertes hasta prácticamente cero en la superficie debido a la fricción. Estas variaciones están concentradas cerca del suelo, los esfuerzos de corte en el viento son generalmente fuertes y el flujo es turbulento [10].

Cuando se tienen vientos fuertes, el movimiento de la masa de aire predomina en una dirección, las corrientes convectivas y la transferencia de calor son despreciables. Bajo esta condición en que la velocidad del aire u varía con la altura en turbulencia mecánica pura, se dice que la atmósfera posee estabilidad neutral [11]. En este escenario, la velocidad del aire decrece con la altura disminuyendo a cero a nivel del suelo.

2.1. Viento en Ambientes Rurales

El último 10% de la capa límite planetaria es conocido como capa superficial donde el conocimiento de los perfiles de las magnitudes físicas ha tenido importantes aplicaciones en agronomía, oceanografía, hidrología e ingeniería.

En 1930 Theodore von Kármán [12] establece que la velocidad promedio de un flujo turbulento en cierto punto es proporcional al logaritmo de la distancia desde el punto a la pared.

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

En la ecuación 2.1 $u(z)$ denota la velocidad horizontal promedio a la altura z , u_* es la velocidad de fricción, κ es la constante de von Kármán tomada como $\kappa = 0.42$, z es la altura sobre la pared y z_0

es el denominado largo de rugosidad de la superficie. La velocidad de fricción u_* se relaciona con el esfuerzo de corte en el suelo τ_w y la densidad del fluido ρ mediante la ecuación 2.2.

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

Esta forma de $u(z)$ es lo que se conoce como ley de pared logarítmica y es técnicamente aplicable solo a las partes del flujo que se encuentran cercanas a la pared. Esta teoría semi-empírica ha sido ampliamente usada para la estimación del perfil de velocidad promedio en la capa superficial de la capa límite atmosférica, y es válida hasta por lo menos 150m de altura con vientos fuertes [10]. Esta ley logarítmica se puede aplicar para estimar el viento en terrenos extensos con rugosidad aproximadamente constante, como en ambientes rurales donde existen pocos obstáculos y las superficies tienden a ser uniformes.

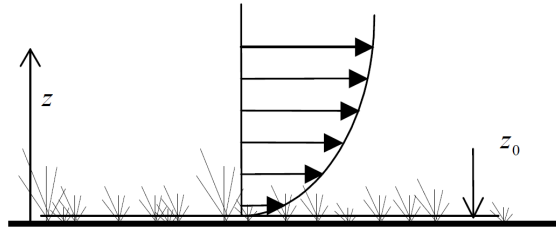


Figura 2.1: Esquema del perfil de la velocidad horizontal promedio como función de la altura z en la capa límite atmosférica desarrollada sobre un pastizal con largo de rugosidad z_0 [8].

El parámetro z_0 representa el tamaño de los torbellinos en la superficie. Claramente, mientras más rugoso sea el suelo, más grandes serán los torbellinos, por lo tanto, z_0 es una medida de la rugosidad de la superficie. Se han hecho intentos de relacionar este parámetro directamente con la altura de los obstáculos que proporcionan la rugosidad, pero este depende también de la forma y de la separación entre dichos obstáculos. La Tabla 2.1 entrega una lista de valores típicos del largo de rugosidad z_0 sobre elementos rugosos en terrenos uniformes [10].

Tabla 2.1: Valores típicos del largo de rugosidad z_0 .

Tipo de Superficie	Largo de Rugosidad (m)
Agua o hielo	10^{-4}
Pasto corto	10^{-2}
Pasto largo, suelo rocoso	0.05
Pastizal	0.20
Suburbios	0.6
Bosques, ciudades	1 – 5

2.2. Viento en Ambientes Urbanos

Al modelar la capa límite atmosférica sobre una ciudad, la ley logarítmica de la pared debe ser modificada para tomar en cuenta la alta rugosidad de los elementos urbanos. Si se hace un ajuste del perfil de velocidad u muy por encima de la altura promedio de los obstáculos \bar{H} , aparece una superficie virtual a la cual se observa una velocidad $u = 0$. Esta superficie se ubica a una distancia $z = d + z_0$ del suelo, donde d es llamado largo de desplazamiento (ver Figura 2.2).

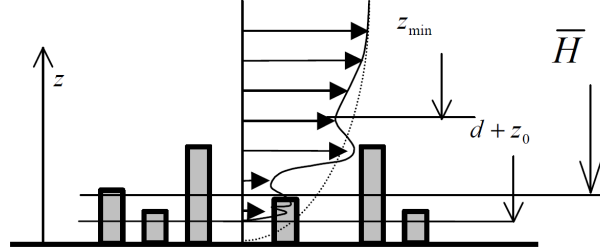


Figura 2.2: Esquema del perfil de la velocidad horizontal promedio en la capa límite atmosférica desarrollada sobre una ciudad (línea sólida). La velocidad horizontal promedio para una rugosidad de pastizal mostrada en la Figura 2.1 se superpone para comparar (línea punteada) [8].

Cerca de los elementos urbanos esta ley logarítmica desplazada deja de ser válida. Se define el nivel $z = z_{min}$ como la altura mínima por sobre el terreno para que el perfil sea una buena aproximación. Por lo tanto se tiene que:

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

La ecuación 2.3 sirve para estimar la velocidad del viento muy por sobre los elementos urbanos, pero cerca de estos el comportamiento es más complejo y requiere un enfoque diferente. En la Tabla 2.2 se muestran valores típicos de los parámetros de la ley logarítmica en una ciudad [8].

Tabla 2.2: Valores típicos de los parámetros de la ley logarítmica para una ciudad.

Parámetro	Valor típico para una ciudad (m)
\bar{H}	25
d	23
z_0	0.8
z_{min}	35

La ecuación 2.3 y los parámetros de referencia de la Tabla 2.2 deben ser utilizados con extremo cuidado. Se basan en ecuaciones semi-empíricas muy simples como para poder modelar la complejidad de los fenómenos físicos de un flujo en un ambiente urbano. Por lo tanto su uso es bastante restringido.

2.3. Independencia del Número de Reynolds

El número de Reynolds es un número adimensional que mide la razón entre las fuerzas inerciales y viscosas en un flujo. Se define de la siguiente manera:

$$Re = \frac{\rho u_{\infty} D}{\mu} \quad (2.4)$$

En la ecuación 2.4, ρ es la densidad del fluido, u_{∞} es la velocidad del flujo libre, D es la dimensión característica de un cuerpo inmerso en el fluido y μ es la viscosidad dinámica del fluido. Un número de Reynolds muy bajo muestra que las fuerzas viscosas dominan por sobre las fuerzas inerciales, y por el contrario, un número de Reynolds muy alto muestra que las fuerzas inerciales dominan por sobre las viscosas.

En 1956 A. Townsend [13] sugiere que un flujo turbulento, en el cual los efectos térmicos y de Coriolis no son importantes, las estructuras encontradas son similares para números de Reynolds suficientemente altos. Al dominar las fuerzas inerciales, la viscosidad tiene muy poco efecto sobre el comportamiento global del movimiento del fluido. Las excepciones son las siguientes:

- Estructuras turbulentas pequeñas involucradas en la disipación de energía.
- Regiones del flujo muy cercanas a las paredes donde la condición de no deslizamiento resulta en números de Reynolds localmente pequeños.

Esta hipótesis de la independencia del número de Reynolds fue llamada "*similaridad del número de Reynolds*". Posteriormente, en 1977, I. Castro y A. Robins [14] llevan a cabo una investigación experimental del flujo turbulento sobre un cubo montado en una pared. Sus resultados encontraron que no ocurren cambios en las estructuras del flujo para números de Reynolds superiores a 30,000.

En un ambiente urbano, una turbina eólica opera con velocidades del viento u_{∞} entre 1–20m/s. La densidad del aire es $\rho = 1.225\text{kg}/\text{m}^3$ y su viscosidad dinámica es $\mu = 1.789 \times 10^{-5}\text{Pa s}$. Luego, el número de Reynolds sobre estructuras de una ciudad, cuyas dimensiones características D varían entre los 5–100m, toma valores en el rango 3.4×10^5 – 1.4×10^8 , muy por sobre la condición de similaridad.

2.4. Concentración de Flujo en Edificios

El flujo de viento cerca de un edificio se ve modificado localmente, se desvía para esquivar el obstáculo, se crea una célula de vórtice cerrado en el lado aguas arriba, existe separación de la capa límite en bordes afilados, como consecuencia se forman burbujas de recirculación sobre y a

los costados del edificio, y una estela aguas abajo [15]. Por encima de estas estructuras, el fluido se acelera (ver Figura 2.3).

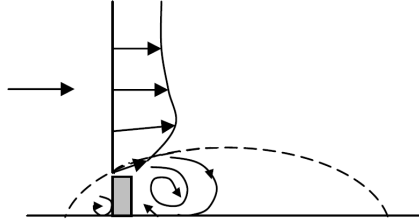


Figura 2.3: Esquema de la aceleración del fluido al pasar sobre las estructuras creadas por la interacción entre el flujo y el edificio [15].

El obstáculo actúa como concentrador de flujo provocando un cambio en la velocidad del flujo libre que es independiente del número de Reynolds [8, 14]. Este aumento en la velocidad se puede cuantificar mediante la definición de un factor de concentración C_f que compara la velocidad local a cierta altura con la del flujo libre a la misma altura de referencia.

$$C_f = \frac{u}{u_\infty} \quad (2.5)$$

En la ecuación 2.5, u es la velocidad local modificada por el edificio y u_∞ corresponde a la velocidad lejos del obstáculo a la altura de referencia. Esta última se puede estimar usando la ecuación 2.1, ya que representa el comportamiento de la capa límite atmosférica sin perturbaciones.

Capítulo 3

Dinámica de Fluidos Computacional

El desarrollo de la dinámica de fluidos computacional moderna (CFD por sus siglas en inglés: *Computational Fluid Dynamics*) comienza con los primeros computadores digitales durante la década de 1950. A partir de entonces, se convierte en un nuevo enfoque esencial para la resolución y análisis de problemas de dinámica de fluidos. De esta manera, llega a ser igual de importante que la teoría pura y el experimento puro. Luego, los futuros avances de la dinámica de fluidos descansan en el balance entre estos tres enfoques [16, 17].

3.1. Método de Volúmenes Finitos

El método de volúmenes finitos busca resolver los fenómenos físicos que gobiernan la dinámica de fluidos. Esto quiere decir que se deben resolver las ecuaciones correspondientes a el transporte de masa, de momentum en todas direcciones, de energía, de variables asociadas a la turbulencia, de concentración de especies y de cualquier magnitud física involucrada en el problema puntual. Para hacer esto, se toma un dominio de cálculo y se divide en múltiples volúmenes de control no traslapantes, tal que cada volumen rodea a un punto de la malla. Luego, se deben resolver las ecuaciones de transporte para cada uno de estos volúmenes de control.

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC} (\rho\phi) dV + \iint_{SC} (\rho\vec{u}) \cdot d\vec{S} = \iint_{SC} (\Gamma_\phi \vec{\nabla}\phi) \cdot d\vec{S} + \iiint_{VC} S_\phi dV \quad (3.1)$$

La ecuación 3.1 corresponde a la ecuación integral de transporte en forma conservativa aplicada a un volumen de control fijo en el espacio. Esta describe todos los mecanismos de transporte de una propiedad física ϕ en un fluido densidad ρ . Al lado izquierdo de la ecuación, el primer término representa las variaciones temporales de ϕ dentro del volumen de control (VC), el segundo término corresponde a la advección a través de las superficies del volumen de control (SC). Del lado derecho, el primer término describe la difusión a través de las superficies de control, donde Γ_ϕ es la difusividad de la propiedad ϕ en el fluido. El último es el término fuente, y corresponde a la integral del campo escalar S_ϕ en el volumen de control.

El método contempla la discretización de la ecuación 3.1 generando un sistema de ecuaciones para cada volumen de control dentro del dominio. Con condiciones de borde apropiadas, y condiciones iniciales en el caso transiente, se cierran estos sistemas y se puede resolver para cada punto de la malla e interpolar para el resto del dominio [16, 17].

3.2. Homogeneidad Horizontal de la Capa Límite Atmosférica

Para simular computacionalmente flujos en ambientes urbanos de manera correcta, una de las consideraciones importantes es que se debe tomar en cuenta es la homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica (HHABL, por sus siglas en inglés: *Horizontal Homogeneity of the Atmospheric Boundary Layer*). Esto quiere decir que, en un dominio vacío, los perfiles de velocidad y de las variables asociadas al transporte de la turbulencia no deben sufrir cambios en la dirección del flujo. Para lograr que no existan gradientes horizontales en el flujo, se debe usar un modelo de turbulencia apropiado, considerar las dimensiones mínimas requeridas por el dominio e imponer las condiciones de borde apropiadas.

3.2.1. Modelo de Turbulencia

El modelo de turbulencia k - ε estándar y sus variantes han sido los modelos más ampliamente usados en ingeniería del viento computacional (CWE, por sus siglas en inglés: *Computational Wind Engineering*) [18]. Las ecuaciones tridimensionales de transporte para la turbulencia según el modelo k - ε estándar en notación indicial son:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.3)$$

En las ecuaciones 3.2 y 3.3, ρ es la densidad del fluido, k y ε son la energía cinética turbulenta y su tasa de disipación respectivamente, y P_k es la producción de energía cinética turbulenta que se define como:

$$P_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3.4)$$

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (3.5)$$

En la ecuación 3.4, u_j y u'_j son la velocidad media y sus fluctuaciones en la dirección x_j , $j = (1, 2, 3)$ respectivamente. La ecuación 3.5 es la hipótesis de Boussinesq para modelar los esfuerzos de Reynolds $-\rho \overline{u'_i u'_j}$. La viscosidad turbulenta en el modelo k - ε estándar viene dada por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

Las ecuaciones 3.2, 3.3 y 3.6 contienen cinco constantes ajustables C_μ , σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$ y $C_{2\varepsilon}$. Valores para estas constantes han sido obtenidos por ajustes de resultados experimentales para un amplio espectro de flujos turbulentos, incluyendo capas límites, capas de mezcla y jets turbulentos [17, 18]. En la Tabla 3.1, en una columna, se muestran los valores para estas constantes que han sido adoptados como valores por defecto en softwares de CFD como *ANSYS Fluent* [19]. Estos son los más ampliamente aceptados por su utilidad para modelar un gran rango de flujos turbulentos. En otra columna, se muestran valores para estas constantes ajustados por Yang *et al.* [18], específicamente para modelar adecuadamente una capa límite atmosférica con homogeneidad horizontal. Se ha demostrado que estos últimos modelan de mejor manera el comportamiento del flujo sobre un ambiente urbano.

Tabla 3.1: Constantes del modelo de turbulencia k - ε estándar

Constante del Modelo	Valor por Defecto	Valor para HHABL [18]
C_μ	0.09	0.028
σ_k	1.0	1.67
σ_ε	1.3	2.51
$C_{1\varepsilon}$	1.44	1.5
$C_{2\varepsilon}$	1.92	1.92

3.2.2. Dimensiones del Dominio

Para simular numéricamente el flujo de aire sobre un ambiente urbano, es importante que las dimensiones del dominio computacional sean tales que las condiciones de borde no interfieran con las estructuras del flujo y que se logre la homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica. Se utilizan dominios con forma de cuboide, cuyo tamaño va a depender del área que se quiera representar (edificios, estructuras o topografía) y de las extensiones del dominio en sentido vertical, lateral y en la dirección del flujo [20].

Extensión Vertical del Dominio

El dominio debe ser lo suficientemente alto para prevenir una aceleración artificial del flujo sobre los edificios, ya que la mayoría de las condiciones de borde aplicadas a la parte superior del dominio no permiten la salida del flujo. Se sugiere una extensión vertical del dominio dependiente del bloqueo,

donde el bloqueo se define como la razón entre la proyección de los obstáculos en la dirección del flujo y la sección del dominio transversal al flujo. Para un bloqueo pequeño se sugiere una extensión $4H$ y $10H$ si el porcentaje de bloqueo es alto, donde H es la altura del edificio más alto. Generalmente se recomiendan para CFD bloqueos menores al 3% [20].

Extensión Lateral del Dominio

Luego de haber determinado la altura del dominio, las extensiones laterales pueden ser escogidas para cumplir con el porcentaje de bloqueo máximo requerido. Esta distancia determina la separación entre las paredes del dominio paralelas a la dirección predominante del flujo y el área urbana que se desea modelar [20].

Extensión del Dominio en la Dirección del Flujo

La extensión longitudinal del dominio debe dividirse en las regiones de aproximación del flujo (aguas arriba) y de estela (aguas abajo). La primera va a depender de si se conoce o no la forma de los perfiles desarrollados de la capa límite atmosférica. Si los perfiles de aproximación no son conocidos, debe dejarse una separación $8H$ entre la entrada del dominio y el área urbana. Si se tienen los perfiles, basta con una distancia $2H$ si el porcentaje de bloque es bajo. La extensión aguas abajo recomendada es $15H$ para que se restablezca el flujo luego de la estela, esto porque generalmente se usa una condición de borde en la salida de flujo desarrollado [20].

3.2.3. Condiciones de Borde

Las condiciones de borde representan la influencia de los alrededores que han sido cortados por el dominio computacional. Como estas determinan en gran parte la solución dentro del dominio, su selección es fundamental. Frecuentemente estas condiciones de borde no se conocen del todo. Si ese es el caso, los límites del dominio deben estar lo suficientemente lejos de la región de interés como para no contaminar la solución con una aproximación de la condición de borde [20].

Condición de Borde de Entrada

La condición de borde a la entrada del dominio es sumamente importante, ya que se deben imponer los perfiles de velocidad $u(z)$, energía cinética turbulenta $k(z)$ y tasa de disipación turbulenta $\varepsilon(z)$ tal que se cumpla la HHABL. Estos perfiles deberían permanecer invariantes a través de un dominio libre de obstáculos. La velocidad horizontal viene dada por el perfil de la capa límite atmosférica en un ambiente rural (ecuación 2.1) desplazada hacia abajo para que el valor $z = 0$ coincida con el

suelo del dominio.

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (3.7)$$

Para los perfiles $k(z)$ y $\varepsilon(z)$ se proponen las siguientes formas [18, 21, 22]:

$$k(z) = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \sqrt{C_1 \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) + C_2} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{u_*^3}{\kappa(z + z_0)} \sqrt{C_1 \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) + C_2} \quad (3.9)$$

En las ecuaciones 3.8 y 3.9, C_1 y C_2 son constantes que se deben ajustar junto con las demás constantes del modelo de turbulencia k - ε estándar. Para los valores propuestos por Yang *et al.* (ver Tabla 3.1) se ajustan estas constantes de la siguiente manera:

$$C_1 = -0.17$$

$$C_2 = 1.62$$

Estos valores entregan condiciones de borde apropiadas para la entrada del dominio de modo que se cumpla con la HHABL [18, 21, 22]. En la Figura 3.1 se muestran los perfiles generados con $u_* = 0.4$, valor utilizado en las simulaciones realizadas en este estudio.

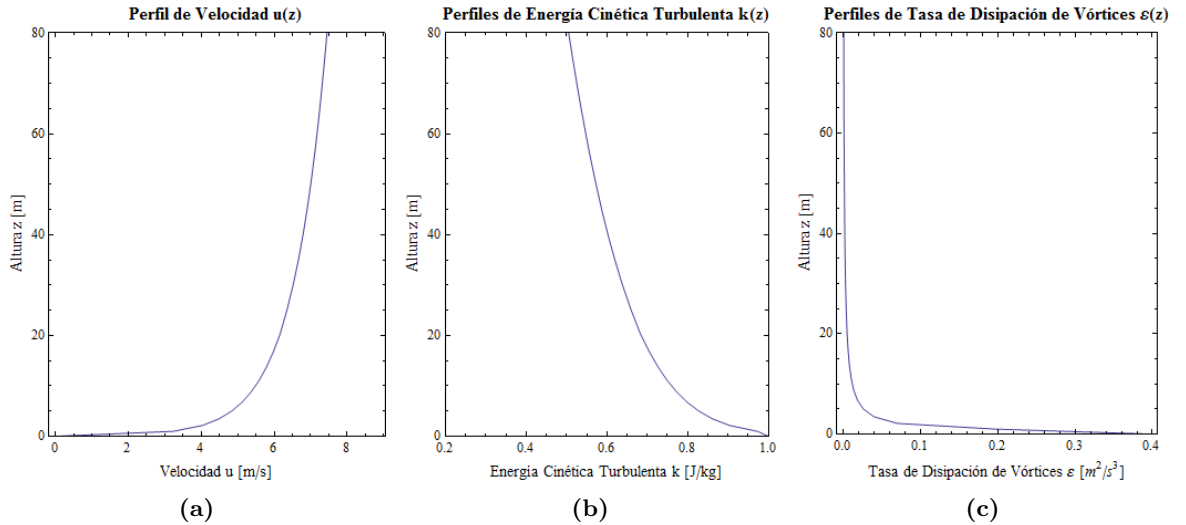


Figura 3.1: Perfiles de: (a) Velocidad horizontal $u(z)$. (b) Energía cinética turbulenta $k(z)$. (c) Tasa de disipación de vórtices $\varepsilon(z)$.

Condición de Borde de Suelo y Paredes

El suelo del dominio y las paredes de los edificios y estructuras por lo general llevan una condición de borde de pared sin deslizamiento [20]. Esto quiere decir que el flujo no puede pasar a través de estas superficies y todas las componentes de la velocidad son cero en contacto con las mismas. Para lograr precisión en los resultados cerca del suelo debe haber un trato especial para modelar adecuadamente los efectos de la rugosidad cerca de las paredes. Esto se resume en cuatro requisitos que deben ser cumplidos simultáneamente [23].

1. La resolución de la malla en la dirección vertical cerca del suelo del dominio computacional debe ser lo suficientemente alta.
2. Homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica en las regiones aguas arriba y aguas abajo de la zona de interés.
3. Una distancia z_p desde el centro de la primera celda hasta la pared (suelo del dominio) que sea mayor que la altura de rugosidad k_s ($z_p > k_s$).
4. Conocer la relación entre la altura de rugosidad k_s y el correspondiente largo de rugosidad z_0 .

Cabe destacar que el primer requisito y el tercero se contraponen, por lo que se debe utilizar el menor tamaño de malla posible que cumpla con $z_p > k_s$. El segundo requisito se logra con dimensiones suficientes del dominio, condiciones de borde apropiadas y un correcto modelamiento de la turbulencia.

$$k_s = \frac{9.793z_0}{C_s} \quad (3.10)$$

En la ecuación 3.10 se muestra la relación entre k_s y z_0 correspondiente al cuarto requisito para el caso específico del software comercial *ANSYS Fluent*. En esta, C_s es la constante de rugosidad cuyo valor se debe seleccionar entre 0 y 1, por lo que escoger $C_s = 1$ facilita el cumplimiento del tercer requisito [20, 23].

Condición de Borde Superior

Para el cielo del dominio computacional es posible obtener HHABL utilizando una condición de pared con resbalamiento libre. Dicha condición permite que el flujo se deslice paralelo a la superficie pero no que pase a través de esta. La parte superior del dominio debe estar fuera de la capa límite para poder usar esta condición como buena aproximación [20].

Condición de Bordes Laterales

Sobre los límites laterales del dominio se debe imponer una condición de simetría. Esta condición fuerza una dirección paralela del flujo al requerir que desaparezcan las componentes normales en la superficie. Por esta razón, los bordes deben estar lo suficientemente lejos de los obstáculos como para no inducir una aceleración artificial en la región de interés [20].

Condición de Borde de Salida

En el extremo aguas abajo del dominio computacional, se debe imponer una condición de salida de flujo. Esta implica que las derivadas de todas las variables en la dirección del flujo son forzadas a desaparecer, lo que corresponde a un flujo totalmente desarrollado. Si la salida del dominio no se encuentra lo suficientemente lejos del área urbana, las recirculaciones en la estela podrían provocar que entre masa a través de esta superficie, lo que puede resultar en problemas de convergencia [20].

3.3. Consideraciones Para Flujos en Ambientes Urbanos

En esta sección se presentan otras consideraciones necesarias para llevar a cabo de manera correcta simulaciones computacionales de flujos en ambientes urbanos. Estas consideraciones apuntan a un aumento de la calidad de los resultados en la predicción de magnitudes físicas en entornos urbanos.

3.3.1. Representación Geométrica de Obstáculos

Normalmente la distribución de edificaciones tiene un gran impacto en los patrones en el flujo de viento. Factores secundarios incluyen la vegetación, orografía y características de las superficies (caminos, pasto, arena). El nivel de detalle requerido por edificios individuales depende de su distancia al área de interés. Edificios mas lejanos son generalmente representados como simples bloques. La zona central de interés debe ser representada con el mayor nivel de detalle que sea posible. Esto, naturalmente, aumenta el número de elementos en la malla que son necesarios para resolver los detalles. Por lo tanto el recurso computacional limita la escala de rasgos que se pueden reproducir [20].

3.3.2. Mallado

La malla debe ser diseñada de manera que no introduzca grandes errores a la solución. Esto significa resolución suficientemente fina para capturar los rasgos importantes de los fenómenos físicos como capas de corte y vórtices. Se prefiere una malla equidistante, por lo tanto el estiramiento o compresión de elementos debe ser pequeño para mantener un error de truncamiento pequeño. Se

sugiere un valor máximo de 1.3 para la razón de expansión o tasa de crecimiento entre dos celdas consecutivas. Con respecto a la forma de las celdas, se prefieren hexaedros a tetraedros, ya que se sabe que los primeros inducen un menor error de truncamiento y muestran una mejor convergencia iterativa.

Es imposible hacer recomendaciones sobre la resolución de la malla de manera anticipada debido a que esta es altamente problema-dependiente. Sin embargo, se sugiere tener por lo menos 10 celdas por raíz cúbica del volumen del edificio para la zona de interés [20].

3.3.3. Esquemas de Discretización

Para poder resolver las ecuaciones de la dinámica de fluidos en un computador, estas deben ser discretizadas y transformadas a un sistema algebraico de ecuaciones. La aproximación numérica más importante es la que se usa para los términos advectivos no lineales. Estos términos son responsables del transporte causado por el movimiento del flujo. Para la advección, no se deben usar esquemas de discretización de primer orden para obtener una solución final. Se pueden usar, y se recomienda hacerlo, para las primeras iteraciones. Se sugiere que en lo posible, todas las discretizaciones sean de segundo orden [20].

3.3.4. Criterio de Convergencia

La mayoría de los programas computacionales usan métodos iterativos para resolver el sistema algebraico de ecuaciones. Partiendo de un valor inicial, las variables del flujo son recalculadas en cada iteración hasta que las ecuaciones son resueltas con un error especificado por el usuario. El criterio de término esta generalmente basado en los residuos de las ecuaciones correspondientes. Estos residuos debiesen tender a cero. Comúnmente se escalan los residuos luego de la primera iteración, mostrando cuanto ha decaído el error inicial. En aplicaciones industriales, típicamente el criterio de término 0.001 es utilizado, el cual es generalmente demasiado alto para tener una solución convergida. Se sugiere una reducción en los residuos de al menos cuatro órdenes de magnitud. Adicionalmente al monitoreo de los residuos, las variables objetivo deben ser observadas. Si estos valores son constantes u oscilan en torno a un valor constante, entonces se puede considerar que existe convergencia en la solución [20].

Capítulo 4

Metodología

En este capítulo se detalla la metodología de este trabajo de investigación. Esto incluye plantear el problema, definir los parámetros de descripción del ambiente urbano, explicitar las características de las simulaciones de dinámica de fluidos computacional y el procedimiento para el modelamiento matemático. Además, se explican los métodos de validación y de análisis de resultados.

4.1. Definición del Problema

En este trabajo de tesis se busca realizar simulaciones computacionales de la fluidodinámica del viento sobre un ambiente urbano, con el fin de determinar la dependencia de la concentración de flujo en edificios en función de la configuración del entorno. Posteriormente se busca ajustar estos resultados a un modelo matemático que permita aproximar la complejidad del fenómeno.

Se utilizará el método de volúmenes finitos con el software comercial *ANSYS Fluent 14.5* para simular el flujo de viento sobre una alineación de edificios variando tres parámetros que describirán la configuración urbana. Se realizarán un total de 40 casos de simulaciones resolviendo las ecuaciones correspondientes a un flujo incompresible tridimensional, en estado estacionario y sin transferencia de calor. La turbulencia se resolverá mediante el modelo $k-\varepsilon$ estándar con las modificaciones especificadas en el capítulo 3 para obtener homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica. Para cada caso se exportará en un volumen sobre el edificio de interés el campo del factor de concentración de flujo $C_f(x, y, z)$. Estos datos se ajustarán con varios modelos matemáticos que permitirán determinar, en función de los tres parámetros de configuración urbana, el valor y la posición del máximo asumido por C_f y el potencial energético para una turbina eólica en dicha posición, dadas sus dimensiones.

Al obtener estos modelos matemáticos se puede analizar el comportamiento de la ubicación de la máxima concentración de flujo y las variaciones en el potencial energético al cambiar la configuración urbana. Basado en este análisis se puede discutir los fenómenos físicos causantes del comportamiento observado, concluir en base a los resultados y plantear nuevas hipótesis a ser probadas en trabajos de investigación futuros.

4.2. Descripción de Entorno Urbano

Para describir un entorno urbano, existen múltiples parámetros que afectan el flujo, desde la rugosidad media de los elementos urbanos, la separación entre edificios y sus dimensiones, el ordenamiento de las estructuras, forma de los tejados, vegetación, orografía y muchos más. En esta investigación se busca estudiar la concentración de flujo en un edificio específico en función de la configuración de los obstáculos aguas arriba. Para acotar el problema, se describe un ambiente urbano utilizando tres parámetros bajo la hipótesis de que son los más relevantes al momento de modificar el flujo.

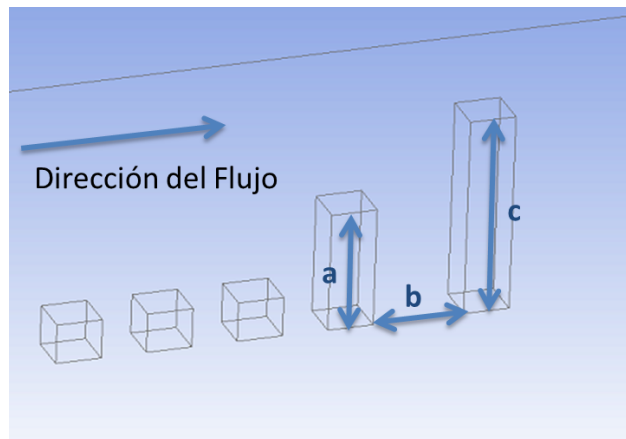


Figura 4.1: Tres parámetros de descripción del entorno urbano: Altura del edificio de interés c , altura del edificio inmediatamente aguas arriba a y la separación entre ambos b

En la Figura 4.1 se muestra la alineación de edificios que representará un entorno urbano. El edificio de interés es el último aguas abajo, este tiene una altura c y el primer edificio aguas arriba de este es de altura a , siendo b la separación entre ambos. Estos parámetros tomarán los siguientes valores (basados en observaciones de ciudades reales) en los distintos experimentos:

$$a = 20, 40, 60, 80m$$

$$b = 10, 20, 30, 40m$$

$$c = 40, 60, 80, 100m$$

Las diferentes simulaciones a realizar son 40 casos correspondientes a todas las combinaciones entre estos valores de a, b, c sujeto a la condición $c > a$. Todos los edificios se representarán como paralelepípedos ortogonales de base cuadrada de arista $20m$. La distancia entre todos los edificios también será de $20m$ con la excepción de la separación b mostrada en la Figura 4.1. Los primeros tres edificios son de $20m$ de alto, y cumplen con el objetivo de proporcionar una rugosidad promedio de los elementos urbanos al flujo de aproximación a la zona de interés. Si bien este efecto se podría lograr modelando la rugosidad mediante la ley de pared, esto implicaría una altura mínima de la primera celda inaceptablemente grande. Para poder resolver el flujo mediante CFD, se necesita una

resolución de malla lo más fina posible, especialmente cerca de las paredes donde los gradientes son más fuertes. Por esta razón, como sugiere la literatura [9,20,23], se opta por representar la rugosidad de manera explícita en lugar de modelarla con la ley de pared.

Posteriormente a realizar las simulaciones, se adimensionalizarán todas las distancias dividiéndolas por $20m$, medida que corresponde al ancho del edificio de interés. En la Tabla 4.1 se muestran los parámetros de descripción del entorno urbano en forma adimensional para todos los casos a simular.

Tabla 4.1: Parámetros adimensionales de descripción del entorno urbano para cada caso a simular.

Caso	a	b	c	Caso	a	b	c
1	1	0.5	2	21	2	1	4
2	1	0.5	3	22	2	1	5
3	1	0.5	4	23	2	1.5	3
4	1	0.5	5	24	2	1.5	4
5	1	1	2	25	2	1.5	5
6	1	1	3	26	2	2	3
7	1	1	4	27	2	2	4
8	1	1	5	28	2	2	5
9	1	1.5	2	29	3	0.5	4
10	1	1.5	3	30	3	0.5	5
11	1	1.5	4	31	3	1	4
12	1	1.5	5	32	3	1	5
13	1	2	2	33	3	1.5	4
14	1	2	3	34	3	1.5	5
15	1	2	4	35	3	2	4
16	1	2	5	36	3	2	5
17	2	0.5	3	37	4	0.5	5
18	2	0.5	4	38	4	1	5
19	2	0.5	5	39	4	1.5	5
20	2	1	3	40	4	2	5

4.3. Dinámica de Fluidos Computacional

En esta sección se detalla la metodología asociada a la dinámica de fluidos computacional que se efectuará utilizando el software comercial *ANSYS Fluent 14.5*. Esto abarca el dimensionamiento del dominio computacional, la selección de los métodos de solución (ecuaciones gobernantes, algoritmo, discretizaciones y modelo de turbulencia) y las condiciones de borde que serán impuestas. Además, se explica el procedimiento para escoger la resolución de la malla, la verificación de la capa límite atmosférica con homogeneidad horizontal, y la validación de los resultados obtenidos. Posteriormente, se presenta la exportación de los resultados.

4.3.1. Dominio Computacional

Se definirán las extensiones del dominio computacional siguiendo las indicaciones presentadas en el capítulo 3. Para que el flujo de aproximación a la zona de interés sea exactamente igual en todos los 40 casos que se simularán, las extensiones del dominio desde el área urbana serán las mismas para todos los experimentos. Estas extensiones se determinarán para el caso más extremo. En otras palabras, se parametrizarán las extensiones del dominio con una distancia $H = 100m$ que corresponde al máximo valor que asumirá la variable c (altura del edificio de interés) en todos los experimentos, ver Figura 4.2.

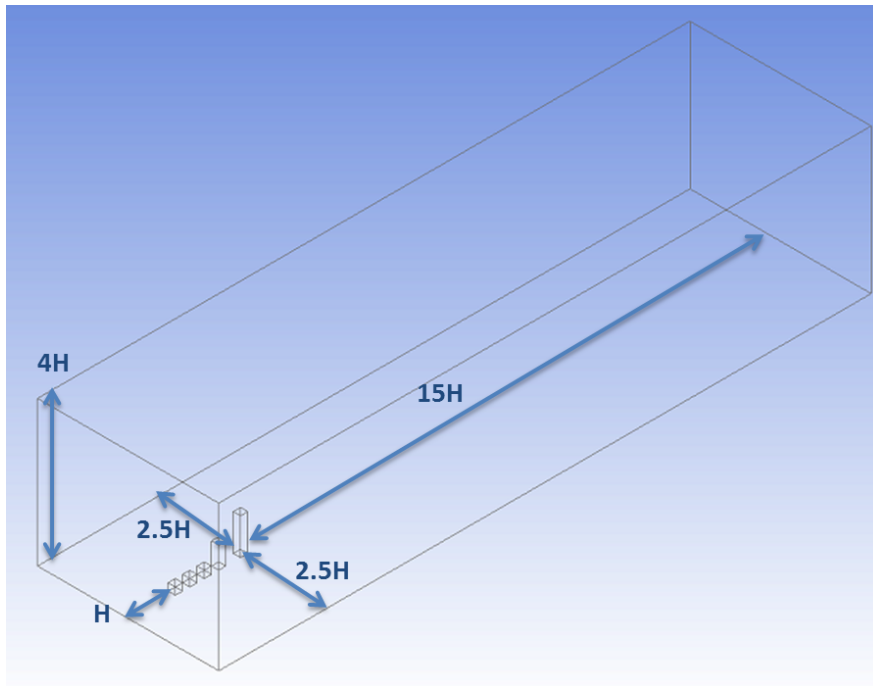


Figura 4.2: Representación de las extensiones del dominio computacional, donde $H = 100m$ corresponde al máximo valor asumido por el parámetro c en todos experimentos

La extensión vertical será $4H$, debido a que, como la representación urbana es una alineación de edificios, el porcentaje de bloqueo será bajo. Las extensiones laterales serán de $2.5H$. Recordando que el bloqueo se define como la razón entre la proyección de los obstáculos en la dirección del flujo y la sección del dominio transversal al flujo, se calcula un porcentaje de bloqueo de 0.96% que es menor al 3% correspondiente al mínimo recomendado.

Como los perfiles de la entrada corresponden al flujo desarrollado, basta con una extensión aguas arriba de los obstáculos de H . Aguas abajo se dejará una distancia $15H$ para permitir que se restablezca el perfil desarrollado luego de la estela.

4.3.2. Método de Solución

Mediante la utilización del software comercial *ANSYS Fluent 14.5*, se implementa el método de volúmenes finitos. La física del problema se aproxima como un flujo turbulento incompresible, en estado estacionario, en ausencia de fuerzas externas, y sin transferencia de calor.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.1)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4.2)$$

Las ecuaciones 4.1 y 4.2 gobiernan este problema, ambas se presentan en notación indicial para facilitar su escritura. La primera es la ecuación de conservación masa o de continuidad. La segunda es la conservación de momentum en la dirección x_i , $i = (1, 2, 3)$, donde τ_{ij} es el tensor de esfuerzos que viene dado por:

$$\tau_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] - \overline{\rho u'_i u'_j} \quad (4.3)$$

En la ecuación 4.3, el primer término corresponde al esfuerzo viscoso y el segundo al esfuerzo turbulento, donde u'_i es la fluctuación de la velocidad con respecto a la media.

Para modelar la turbulencia se utilizará el modelo $k-\varepsilon$ estándar con la hipótesis de Bousinesq para el esfuerzo turbulento, y los valores encontrados por Yang *et al.* para el ajuste de las constantes del modelo, ver ecuaciones 3.2–3.6 y la Tabla 3.1.

Para resolver el acoplamiento entre presión y velocidad se usará el algoritmo SIMPLE. Todas las variables de las ecuaciones gobernantes serán discretizadas espacialmente mediante un esquema upwind de segundo orden.

El criterio de convergencia que se utilizará es obtener residuos menores a 1×10^{-5} para todas las variables del flujo. Adicionalmente, se realizará un monitoreo de la velocidad sobre el edificio de interés.

4.3.3. Condiciones de Borde

Se definirán las condiciones de borde siguiendo las indicaciones presentadas en el capítulo 3. En la entrada se entregarán perfiles desarrollados para la velocidad u , la energía cinética turbulenta k y su disipación ε .

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (4.4)$$

$$k(z) = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \sqrt{-0.17 \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) + 1.62} \quad (4.5)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{u_*^3}{\kappa(z + z_0)} \sqrt{-0.17 \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) + 1.62} \quad (4.6)$$

En las ecuaciones 4.4, 4.5 y 4.6 se repiten los perfiles de la entrada, donde z_0 será escogido para el largo de rugosidad que se quiera modelar en el suelo. Para la velocidad de fricción se escogerá un valor $u_* = 0.4$. De esta manera, el perfil de velocidad en la entrada del dominio representará una velocidad media de $8.1m/s$, lo que significa un número de Reynolds de 1.1×10^7 basado en el ancho de los edificios de $20m$.

La condición de borde aguas abajo será de salida de flujo. Esta impone una derivada normal a la superficie nula, lo cual se cumple si los perfiles de u , k y ε están desarrollados. En ambos costados la condición impuesta será de simetría, y en el cielo del dominio será una pared con deslizamiento libre. En el suelo y en las paredes de los obstáculos habrá una condición de pared sin deslizamiento y con rugosidad.

Para modelar la rugosidad del suelo del dominio y las paredes de los edificios, se deben escoger los parámetros asociados a la ley de pared. Se escogerán diferentes valores para el largo de rugosidad z_0 para ambos tipos de superficies. El objetivo de esto es modelar una mayor rugosidad lejos de la zona de interés, dado que, en el ambiente urbano, la rugosidad es calculada explícitamente y solo se debe modelar detalles de menor escala de los edificios. Por esto, para el suelo del dominio se escogerá $z_0 = 3 \times 10^{-2}m$ y para las paredes de los edificios $z_0 = 3 \times 10^{-4}m$.

$$k_s = \frac{9.793z_0}{C_s} \quad (4.7)$$

En la ecuación 4.7 se recuerda la relación entre el largo de rugosidad z_0 y la altura de rugosidad k_s presentada en el capítulo 3. Se escogerá un valor para la constante de rugosidad $C_s = 1$, de esta manera se minimiza k_s y se puede tener una menor altura para el primer nodo de la malla y_p , posibilitando una mayor resolución. Luego, se calcula k_s para las paredes sin deslizamiento. En el suelo del dominio se obtiene $k_s = 2.94 \times 10^{-1}m$ y en las paredes de los edificios se calcula $k_s = 2.94 \times 10^{-3}m$.

A modo de resumen, se presenta la Tabla 4.2 donde se muestran todas las condiciones de borde de las simulaciones.

Tabla 4.2: Resumen de condiciones de borde para las simulaciones computacionales.

Superficie	Condición de Borde
Entrada	Perfiles desarrollados $u(z), k(z), \varepsilon(z)$
Salida	Flujo desarrollado
Cielo	Pared, deslizamiento libre
Costados	Simetría
Suelo	Pared, sin deslizamiento $C_s = 1, k_s = 2.94 \times 10^{-1}m$
Edificios	Pared, sin deslizamiento $C_s = 1, k_s = 2.94 \times 10^{-3}m$

4.3.4. Mallado y Análisis de Sensibilidad

Siguiendo las indicaciones presentadas en el capítulo 3 se utilizará una malla con elementos hexaédricos. Las únicas restricciones al tamaño de las celdas se impondrán en las paredes sin deslizamiento. Para poder aplicar la ley de pared en el suelo del dominio y en los edificios, se debe cumplir que la altura del primer nodo y_p debe ser mayor a la altura de rugosidad k_s de la superficie respectiva. Luego, la altura de la primera celda sobre el suelo del dominio debe ser mayor a $0.59m$, y sobre las paredes de los edificios la distancia debe ser mayor a $0.59cm$.

Con estas restricciones en mente, se escogen tamaños para las primeras celdas que proporcionen la mayor resolución posible en la zona de interés, dado el recurso computacional disponible. Se impondrá un tamaño de elementos de $2m$ en el suelo del dominio y de $0.5m$ en las paredes de los edificios.

La guía de usuario de *ANSYS Fluent* [24] sugiere que algunas métricas cumplan ciertos requisitos para asegurar la calidad de la malla. Se recomienda que el máximo para la métrica *skewness* sea menor a 0.8 y que la calidad ortogonal tenga un mínimo mayor 0.2.

Siguiendo con las restricciones descritas, se realizará un estudio de sensibilidad del mallado. Para esto se llevarán a cabo simulaciones del caso 1 con diferentes resoluciones mediante la variación de la tasa de crecimiento de los elementos. Para cada una de estas simulaciones, se medirá la velocidad en un punto $10m$ sobre el centro edificio de interés. Luego, se escogerá una tasa de crecimiento que genere una resolución a partir de la cual los resultados para la velocidad en el punto sean independientes de los cambios en la malla.

4.3.5. Homogeneidad Horizontal de la Capa Límite Atmosférica

Se realizarán simulaciones computacionales del flujo sobre un dominio vacío siguiendo todas las indicaciones presentadas en el capítulo 3. El tamaño del dominio será el mismo que se utilizará en

las demás simulaciones, así como también las condiciones de borde serán las mismas. Se compararán los perfiles $u(z)$, $k(z)$ y $\varepsilon(z)$ (ecuaciones 4.4, 4.5, 4.6 respectivamente) a la entrada del dominio con los que se calculen a la salida dominio. De esta manera se verificará si existe homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica.

4.3.6. Validación

Para validar la configuración del CFD, se simulará el flujo sobre un cubo y se comparará con resultados experimentales, mediciones in-situ y simulaciones de otros autores [22, 25]. Se medirán los tamaños de las recirculaciones más importantes sobre el cubo y se observará el comportamiento del coeficiente de presión sobre las caras del cubo en el plano medio.

4.3.7. Exporte de Resultados

Una vez realizadas las simulaciones computacionales para los 40 casos, se exportarán los resultados para analizarlos utilizando el software comercial *Wolfram Mathematica 8.0*. La variable a exportar corresponde al factor de concentración C_f definido en el capítulo 2, el cual se calculará como:

$$C_f(x, y, z) = \frac{u(x, y, z)}{u_\infty(z)} = \frac{u(x, y, z)}{\frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z+z_0}{z_0} \right)} \quad (4.8)$$

En la ecuación 4.8 se puede ver que $u_\infty(z)$ es el perfil de velocidad a la entrada del dominio lejos de la zona urbana. Estos datos serán exportados en un volumen cúbico de $20 \times 20 \times 20m$ sobre el edificio de interés con una resolución de $1m$.

4.4. Modelamiento Matemático

En esta sección se detalla el procedimiento que se seguirá para el modelamiento matemático de los resultados exportados del CFD. Se espera obtener funciones dependientes de a , b , c que aproximen los valores máximos de C_f , sus coordenadas sobre el edificio y el potencial energético asociado a dicha ubicación dada un área perpendicular al flujo. Se utilizará un sistema de referencia ubicado en la intersección del borde aguas arriba del tejado del edificio, y el plano de simetría del dominio. En este sistema de referencia (mostrado en la Figura 4.3), el eje x crece en la dirección del flujo, el eje y va de costado a costado del edificio, y el eje z representa la altura sobre el tejado.

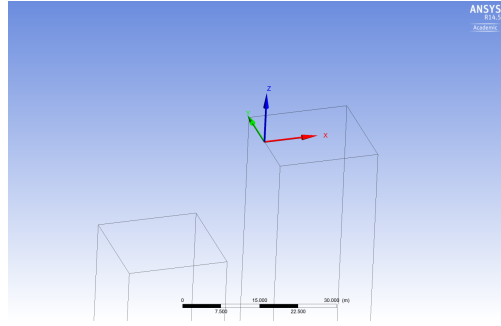


Figura 4.3: Sistema de coordenadas utilizado en los modelos matemáticos. El eje x crece en la dirección del flujo, el eje y va de costado a costado del edificio, y el eje z representa la altura sobre el tejado.

Recordando que todas las distancias serán adimensionalizadas dividiéndolas por $20m$, los datos corresponden a una matriz con valores para a, b, c, x, y, z, C_f obtenidos de los resultados, luego las variables se mueven entre:

$$\begin{array}{ll}
 x \in [0, 1] & a \in [1, 4] \\
 y \in [-0.5, 0.5] & b \in [0.5, 2] \\
 z \in [0, 1] & c \in [a + 1, 5]
 \end{array}$$

La resolución de los datos será de 0.05 en el espacio (para x, y, z), 1 para las alturas de los edificios (a, c) y 0.5 para la separación entre estos b . Estos datos se interpolarán espacialmente con *Wolfram Mathematica 8.0* para cada caso de configuración urbana, esto para poder calcular los valores máximos de C_f y sus coordenadas sobre el edificio. Posteriormente también se utilizará esta interpolación para calcular el potencial energético.

Una vez obtenidos los máximos de C_f , sus coordenadas y el potencial energético a partir de estos datos, se construirán modelos matemáticos para estos resultados. De esta manera, se podrá analizar la influencia de la configuración urbana sobre las condiciones para el emplazamiento de una turbina eólica.

4.4.1. Análisis del Comportamiento del Factor de Concentración

El primer paso para lograr construir los modelo matemáticos, será analizar el comportamiento del factor de concentración. Para lograr esto se observarán las variaciones de C_f en el espacio para las 40 diferentes configuraciones urbanas. Se realizará un proceso donde se observará el comportamiento de C_f en cada una de las 6 variables a, b, c, x, y, z .

4.4.2. Factor de Concentración Máximo y sus Coordenadas

Uno de los objetivos de este trabajo es la definición de emplazamientos adecuados para turbinas eólicas sobre edificaciones en base al comportamiento del recurso. Con este propósito, se entiende la posibilidad de que el emplazamiento se vea afectado por factores externos. Por esto, y luego de analizar los resultados, resulta coherente construir los modelos matemáticos dejando la coordenada en el eje y como variable independiente.

De esta manera, a partir de los resultados del CFD, para todas las configuración urbanas a, b, c , y diferentes valores de y , se encontrarán las coordenadas del valor máximo del factor de concentración, desde ahora C_{fMax} . A estas coordenadas las llamaremos X_c, Z_c . Como resultado, se tendrá una matriz de datos con valores para $a, b, c, y, X_c, Z_c, C_{fMax}$. Se construirán modelos matemáticos que a partir de polinomios de a, b, c , e y ajusten estos datos a las variables dependientes X_c, Z_c , y C_{fMax} lo mejor posible. Estas funciones se construirán de la siguiente manera, usando notación indicial:

$$\Pi_{Model} = Pa_l Pb_k Pc_j Py_i \lambda_{ijkl}^{\Pi} \quad (4.9)$$

En la ecuación 4.9, λ^{Π} es un tensor de cuarto orden con coeficientes que se obtendrán del ajuste de los datos a la variable dependiente que se esté modelando Π , ya sea X_c, Z_c , o C_{fMax} . Los vectores Pa, Pb, Pc , y Py contienen los polinomios de a, b, c , e y que se escogerán para el modelo. Para una variable independiente χ , el vector de polinomios $P\chi$ vendrá dado por:

$$P\chi_m = \chi^{m-1} \quad (4.10)$$

De la ecuación 4.10 se desprende que el grado del polinomio utilizado en el ajuste, para una variable χ , vendrá dado por el límite superior que se le imponga al índice m .

Luego, la tarea de construir los modelos matemáticos X_c, Z_c , y C_{fMax} se reducirá a escoger los límites para los índices i, j, k , y l y calcular los λ_{ijkl} , de forma que se ajusten los datos de manera aceptable con el menor número de coeficientes posibles.

4.4.3. Potencial Energético

Uno de los objetivos de este trabajo es la estimación del potencial energético en el emplazamiento adecuado para una turbina eólica de pequeña escala, dada la configuración urbana. Se busca un indicador de la calidad del entorno como concentrador de flujo, independiente del recurso eólico. Con esto, se podrían comparar diferentes distribuciones de edificios. Además, dadas las mediciones de viento globales de la ciudad, se podría cuantificar la potencia disponible para una turbina eólica de ciertas dimensiones en esa ubicación específica. Para definir este indicador, hay que comenzar

con la potencia extraíble del recurso eólico. Sea dP un diferencial de potencia, se tiene que:

$$dP = \frac{1}{2} \rho u^3 dA \quad (4.11)$$

En la ecuación 4.11 ρ es la densidad del aire, u es la velocidad del fluido perpendicular al diferencial de área dA . Luego, integrando y dividiendo por el área total, se obtiene la potencia por unidad de área promedio $\overline{P_A}$:

$$\overline{P_A} = \frac{\rho}{2A} \int_A u^3 dA \quad (4.12)$$

Recordando la definición del factor de concentración (ver ecuación 4.8) se reemplaza u :

$$\overline{P_A} = \frac{\rho}{2A} \int_A u_\infty^3 C_f^3 dA \quad (4.13)$$

Tomando un área cuadrada de arista D en un plano YZ (perpendicular al flujo) para $x = X_c$, centrada en cierto valor de $y = Y$, se tiene que $\overline{P_A}$ en una sección que por donde pasa el máximo valor del factor de concentración viene dada por:

$$\overline{P_A}(Y, D) = \frac{\rho}{2D^2} \int_{Y-D/2}^{Y+D/2} \int_{z_{min}}^{z_{min}+D} u_\infty^3 C_f^3 dz dy \quad (4.14)$$

En la ecuación 4.14, z_{min} es el mínimo valor asumido por z en la integral. Se busca que en el área se observen los valores más altos del valor de concentración en ese plano. Luego, z debe necesariamente pasar por Z_c , pero z_{min} debe mantenerse lejos del tejado del edificio donde la velocidad u decae a 0 rápidamente. Como criterio para lograr esto, se definirá z_{min} de la siguiente manera:

$$z_{min} = \begin{cases} Z_c - D/2 & \text{si } Z_c - D/2 > z^* \\ z^* & \text{si } Z_c - D/2 \leq z^* \end{cases} \quad (4.15)$$

En la ecuación 4.15, z^* es la altura por sobre el tejado del edificio a la cual se obtiene $C_f = 1$ en $y = Y$ para el caso específico. Ahora, se debe recordar que u_∞ se modela como un logaritmo dependiente de la altura sobre el suelo $z+c$ donde c es la altura del edificio. Luego, como c es grande, significa que las variaciones de u_∞ dentro del área serán pequeñas, por lo tanto, como aproximación se asumirá que su valor es constante, dejándolo fuera de la integral:

$$\overline{P_A}(Y, D) \approx \frac{\rho u_\infty^3}{2D^2} \int_{Y-D/2}^{Y+D/2} \int_{z_{min}}^{z_{min}+D} C_f^3 dz dy \quad (4.16)$$

A partir de la ecuación 4.16 se define el indicador de potencial energético PE dividiendo por la velocidad del flujo libre al cubo:

$$PE(Y, D) \triangleq \frac{\overline{P_A}}{u_\infty^3} = \frac{\rho}{2D^2} \int_{Y-D/2}^{Y+D/2} \int_{z_{min}}^{z_{min}+D} C_f^3 dz dy \quad (4.17)$$

Con este indicador se podría calcular el recurso disponible para una turbina de dimensión característica D dada una estimación de la velocidad en el flujo libre u_∞ . Dada su definición, el potencial energético tiene unidades de:

$$\frac{W}{m^2 \left(\frac{m}{s}\right)^3} \iff \frac{kg}{m^3}$$

De los resultados de las simulaciones computacionales se tienen los datos para C_f interpolados en el espacio para todos los casos de configuración urbana. Con estos datos, y con los modelos matemáticos para X_c, Z_c previamente construidos, se calcula el potencial energético PE_{Data} según la ecuación 4.17 para diferentes valores de Y, D y para todas las configuraciones urbanas a, b, c . Luego, se hará un modelo matemático para $PE_{Data}(a, b, c, Y, D)$ con funciones que se ajusten a estos resultados.

Para construir el modelo matemático, se seguirá como estrategia el modelamiento del decaimiento espacial del potencial energético a partir de su valor máximo en X_c, Y, Z_c dado por $C_{fMax}^3 \times \rho/2$. Este decaimiento espacial se traduce en una disminución del recurso eólico disponible al alejarse del emplazamiento adecuado. Para un largo de referencia D extremadamente grande, se debiera perder la influencia del entorno urbano, luego el potencial energético caería al valor obtenido en el flujo libre ($C_f = 1$). De acuerdo a estas nociones, se propondrá un modelo matemático PE_{Model} de la siguiente forma:

$$PE_{Model} = \frac{\rho}{2} [(C_{fMax}^3 - 1) e^{-KD} + 1] \quad (4.18)$$

En la ecuación 4.18, K es el factor de decaimiento espacial del potencial energético, este es función de la configuración urbana a, b, c y de la coordenada Y . Corresponde a un polinomio construido de igual manera que los modelos matemáticos para X_c, Z_c y C_{fMax} , como se muestra en la ecuación 4.9.

4.5. Análisis de Resultados

Por último, se realizará un análisis de los resultados obtenidos para cada tema en particular. Se comparan los resultados entre casos de configuración urbana del CFD con *ANSYS Fluent 14.5* y

del comportamiento del factor de concentración C_f observado con *Wolfram Mathematica 8.0*. Finalmente, se analizan los resultados de emplazamiento adecuado para turbinas eólicas sobre edificio y su potencial energético asociado.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se explicitan los resultados de las simulaciones computacionales, del comportamiento del factor de concentración, de la definición de emplazamientos adecuados para turbinas eólicas sobre edificios y del potencial energético asociado a estas ubicaciones. Adicionalmente, se hace un análisis particular en cada sección.

5.1. Resultados del CFD

En esta sección se muestran los resultados asociados a las simulaciones computacionales llevadas a cabo con el software comercial *ANSYS Fluent 14.5*. Se explicitan los procesos de independización de la solución de la malla, de verificación de la homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica y de validación del CFD. Se detallan y se analizan los resultados para los diferentes casos de configuraciones urbanas a, b, c , la lista de casos se presenta en la Tabla 4.1 del capítulo anterior.

5.1.1. Mallado y Análisis de Sensibilidad

El mallado fue realizado con el módulo *ANSYS Meshing* incluido en *ANSYS 14.5*. Como se indicó en la metodología, se usó una malla estructurada con elementos hexaédricos. Se impusieron tamaños fijos para las celdas, en contacto con las paredes de los edificios y con el suelo del dominio, de $0.5m$ y $2m$ respectivamente. Con estas restricciones, se hacen mallados variando la tasa de crecimiento de los elementos desde 1.3 hasta 1.1 con un paso de 0.05. Como consecuencia se obtienen diferentes resoluciones, para cada una se mide la velocidad en un punto sobre el edificio de interés. Se considera que el caso con la mayor resolución es la solución exacta, luego se compara la velocidad para este caso con la obtenida para las otras mallas.

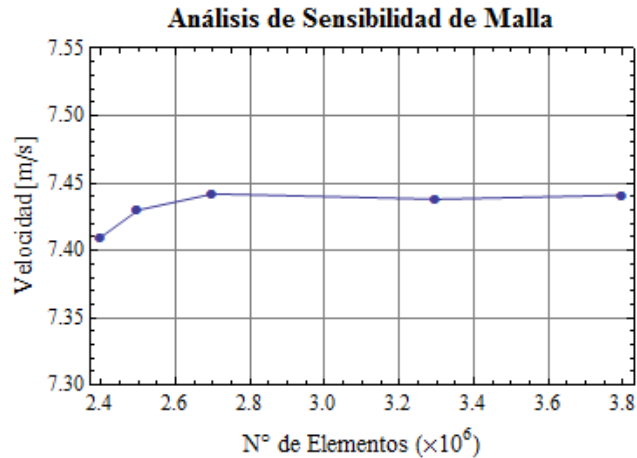


Figura 5.1: Gráfico de la velocidad medida en un punto fijo sobre el edificio de interés, versus el número de elementos en los diferentes mallados.

En la Figura 5.1 se presentan los resultados para el análisis de sensibilidad de malla. Se aprecia claramente que, sobre los 2.6 millones de elementos, la resolución de la malla tiene muy poca influencia sobre el resultado.

Se calculó el error entre la velocidad calculada para cada caso y la correspondiente a el caso con mayor resolución (tasa de crecimiento de los elementos 1.1). Luego, se observó el número de iteraciones que tardó en converger cada caso. Posteriormente se evaluó la eficiencia del recurso computacional analizando la Figura 5.2, donde se puede apreciar cuanto es el error que se elimina para una determinada velocidad de convergencia.

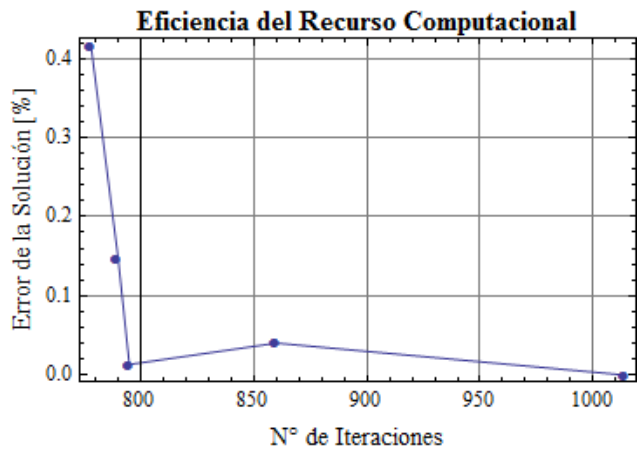


Figura 5.2: Gráfico del número de iteraciones requeridas para la convergencia versus el error de la solución para cada mallado.

Observando ambos gráficos se decide utilizar la tasa de crecimiento de 1.2 que corresponde a una

mallas de cerca de 2.7 millones de elementos. Con esta resolución, se obtuvo un error del 0.01 % en 795 iteraciones, con respecto al caso con 3.8 millones de elementos que tardó 1,014 iteraciones en converger.

Tabla 5.1: Métricas más relevantes de la malla escogida.

Métrica	Valor
N° de Elementos	2.68×10^6
N° de Nodos	2.98×10^6
Tasa de Crecimiento	1.2
<i>Skewness</i> (máxima)	0.61
<i>Skewness</i> (promedio)	1.08×10^{-3}
Calidad Ortogonal(mínima)	0.74
Calidad Ortogonal(promedio)	0.98

En la Tabla 5.1 se muestran las métricas más importantes de la malla generada para el caso 1 ($a = 1$, $b = 0.5$, $c = 2$) con la tasa de crecimiento de celdas seleccionada. Se aprecia como se cumple con los requisitos sugeridos por el manual del usuario de *ANSYS Fluent* [24] para la *skewness* máxima (< 0.8) y para la calidad ortogonal mínima (> 0.2). La *skewness* es una métrica que varía entre 0–1 que mide cuanto se aleja la forma de un elemento de la forma de la celda ideal (equilateral o equiangular), donde el mejor valor corresponde a 0 y el peor a 1. En la Figura 5.3 se ve esta malla en el plano de simetría del dominio con diferentes niveles de ampliación.

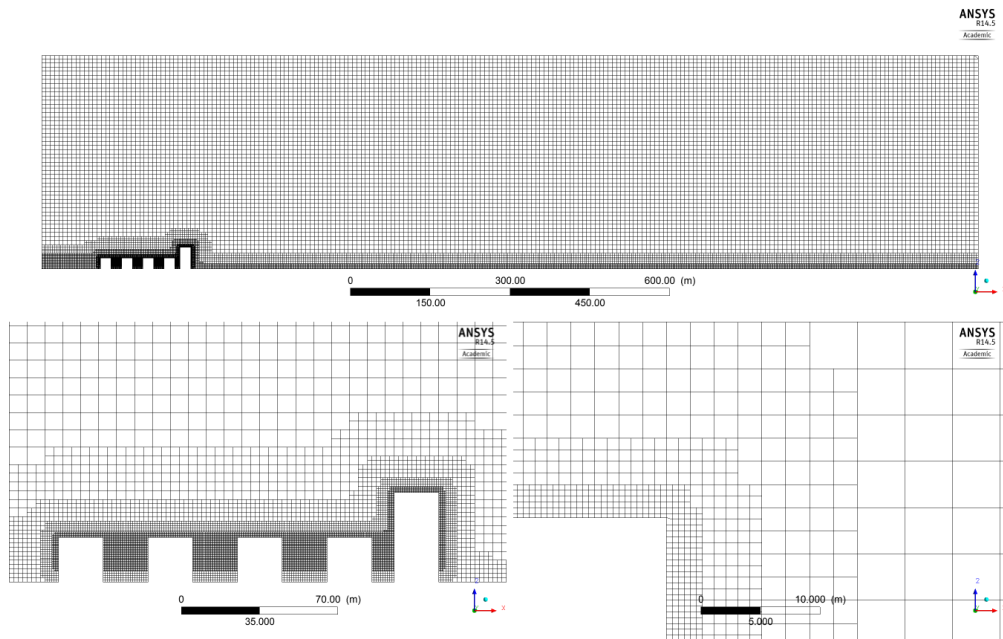


Figura 5.3: Malla generada a partir de la tasa de crecimiento escogida para el caso 1. Cortes en el plano de simetría del dominio con diferentes niveles de ampliación.

5.1.2. Homogeneidad Horizontal de la Capa Límite Atmosférica

Para verificar que existe homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica, se realizó una simulación computacional del flujo sobre un dominio vacío. Se comparó los perfiles obtenidos a la entrada y a la salida del dominio para ver que no existan variaciones significativas en la dirección del flujo.

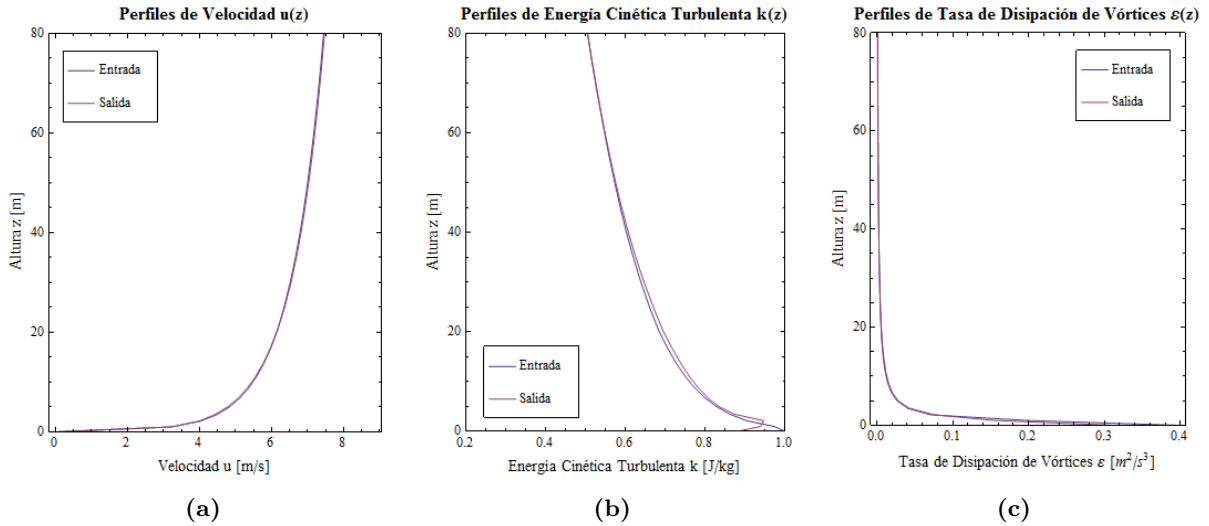


Figura 5.4: Perfiles en la entrada y en la salida de un dominio vacío: (a) Velocidad horizontal $u(z)$. (b) Energía cinética turbulenta $k(z)$. (c) Tasa de disipación de vórtices $\varepsilon(z)$.

En la Figura 5.4 se grafican los perfiles de entrada y de salida en los 80m más cercanos al suelo donde sería más probable encontrar gradientes horizontales. Se observa que los perfiles prácticamente coinciden encontrando unas pequeñas variaciones para la energía cinética turbulenta cerca del suelo. Se concluye que se satisface la homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica con la configuración del CFD seleccionada.

5.1.3. Validación

Para validar los resultados del CFD, se realizó una simulación computacional del flujo sobre un cubo montado en una superficie. La configuración de esta simulación fue la misma que la utilizada en el resto de los experimentos. En esta sección se comparan los resultados obtenidos del flujo sobre el cubo mediante CFD con otras simulaciones CFD validadas en la literatura y con resultados empíricos de mediciones in-situ y pruebas en túneles de viento. Específicamente se comparan las dimensiones de las estructuras más importantes del flujo y el comportamiento del coeficiente de presión C_p sobre las caras del cubo en el plano medio vertical. Abohela *et al.* en [25] recopilan datos utilizados para la validación de este tipo de problemas.

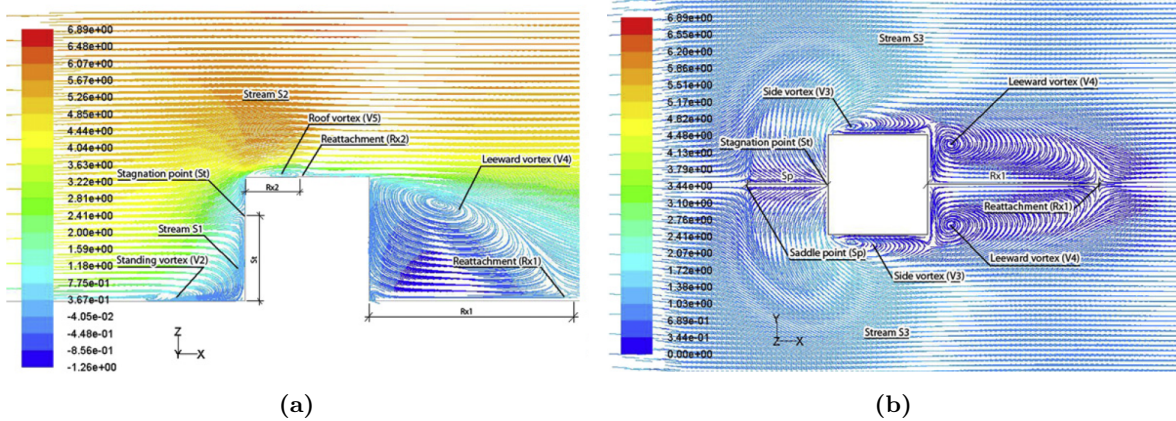


Figura 5.5: Líneas de trayectoria coloreadas según magnitud de velocidad. Se muestran las estructuras características del flujo sobre un cubo: (a) En el plano medio vertical. (b) En el plano del suelo. Fuente: Abohela et. al en [22].

En la Figura 5.5 se muestran las estructuras de vórtices y recirculaciones presentes en el flujo sobre un cubo. Se aprecia la división del flujo en cuatro corrientes, la primera desviada hacia abajo por la cara aguas arriba ($S1$), la segunda desviada sobre la cara superior del cubo ($S2$) y las otras dos corrientes desviadas hacia los costados ($S3$). La desviación de la corriente principal ocurre en el punto de máxima presión en la cara aguas arriba, en el punto de estancamiento (St). Debido a la presencia del cubo, el flujo se separa pero se reacopla nuevamente aguas abajo del obstáculo (Rx_1). Además, también existe desprendimiento del flujo cuando este golpea la esquina superior de la cara aguas arriba del cubo, el reacople sucede sobre la cara superior (Rx_2). Se forma un vórtice aguas arriba del cubo ($V2$) que comienza donde el flujo se separa del suelo, en el punto silla (Sp). Aparecen dos vórtices en los costados ($V3$), dos aguas abajo ($V4$) y la recirculación sobre el cubo ($V5$). Para validar las simulaciones primero se compararán los largos específicos en las estructuras más importantes del flujo: el punto silla Sp , el punto de estancamiento St , y los reacoples del flujo sobre la cara superior Rx_2 y aguas abajo Rx_1 .

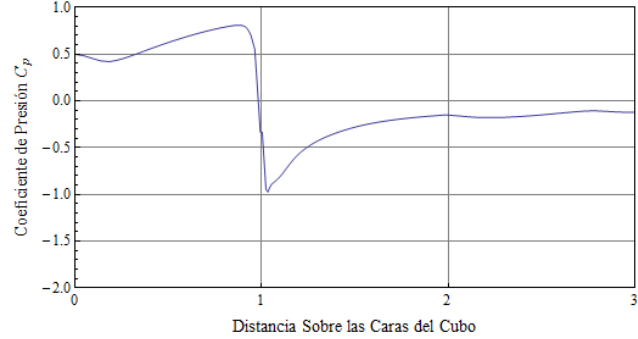
Tabla 5.2: Largos específicos en las principales estructuras del flujo, según recopilación por Abohela et. al [25] y según resultados del CFD.

	Sp	St	Rx_2	Rx_1
Simulaciones CFD validadas en la literatura	$0.64h-1.58h$	$0.64h-0.80h$	$0.3h-0.64h$	$1.50h-2.74h$
Túneles de viento	<i>No disponible</i>	$0.64h-0.85h$	$0.30h$	$1.34h-1.50h$
Mediciones in-situ	<i>No disponible</i>	$0.81h$	$0.60h$	<i>No disponible</i>
Resultados CFD	$0.68h$	$0.83h$	$0.31h$	$1.65h$

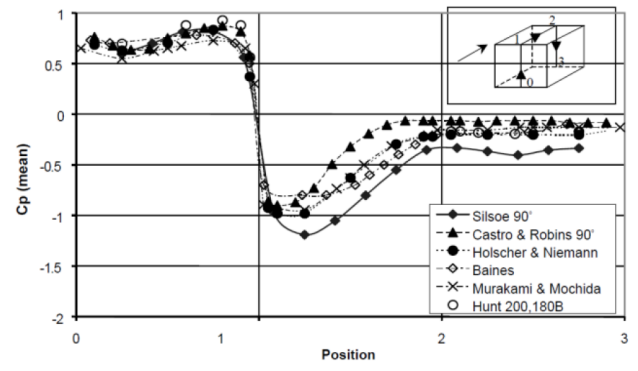
En la Tabla 5.2 se aprecia la concordancia de los resultados obtenidos del CFD con los presentados en la literatura. El punto silla Sp está a una distancia $0.68h$ de la cara aguas arriba del cubo (donde

h es el largo de las caras del cubo), por lo que queda dentro del rango de los valores obtenidos en simulaciones CFD de publicaciones anteriores. Para el punto de estancamiento St esta a una altura $0.83h$ por lo que tiene un valor cercano al de las mediciones in-situ y esta dentro del rango de las pruebas en túneles de viento y los resultados CFD. El reacople del flujo sobre la cara superior del cubo Rx_2 se presenta a una distancia $0.31h$ desde el borde aguas arriba. Si bien este valor se aleja de las mediciones in-situ, es coherente con las otras fuentes. El reacople en la estela Rx_1 sucede a una distancia $1.65h$ sobre la cara aguas abajo, quedando dentro del rango de las otras simulaciones CFD pero fuera del rango de los túneles de viento. Cabe destacar que todos los resultados de simulaciones CFD de la literatura sobrestiman el largo de la recirculación aguas abajo del cubo.

Para concluir la validación de los resultados, se compara el comportamiento del coeficiente de presión C_p sobre las caras del cubo en el plano vertical medio. En la Figura 5.6a se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones CFD, y en la Figura 5.6b se muestran los resultados empíricos de publicaciones, recopilados por Abohela *et al.* [25]. En los gráficos se observa el coeficiente de presión C_p en función de la distancia adimensional sobre las caras del cubo. Esta distancia se mide comenzando desde la esquina inferior aguas arriba 0, subiendo por la misma cara hasta la esquina superior 1, se sigue avanzando por el tejado del cubo hasta la esquina superior aguas abajo 2, el recorrido termina en la esquina inferior aguas abajo 3. El comportamiento de C_p es claramente similar, por lo que se dan por validadas las simulaciones.



(a)



(b)

Figura 5.6: Gráficos del coeficiente de presión en el plano medio sobre las caras de un cubo montado en una pared: (a) Según resultados del CFD. (b) Según mediciones experimentales in-situ y en túneles de viento, recopilación por Abohela *et al.* [25].

5.1.4. Detalle de Resultados por Caso

En esta sección se explicitan los resultados de las simulaciones de dinámica de fluidos computacional. Para evitar redundancias se presentan figuras para la mitad de los experimentos, tomando solo los casos extremos para el parámetro menos relevante en las soluciones. Estos corresponden a los casos 1–4, 13–19, 26–30, 35–37 y 40, conformados por todos los experimentos donde, la distancia entre el edificio de interés y el que esta inmediatamente aguas arriba, es $b = 0.5$ o $b = 2$. De esta manera se omiten los valores intermedios de b , ya que se considera que no aportan al análisis hecho al final del capítulo.

Para cada uno de los casos mencionados se presentan cuatro figuras. La primera corresponde a contornos de magnitud de velocidad y vectores de velocidad superpuestos en el plano de simetría del dominio. Esto permite observar como la distribución de edificios modifica localmente esta variable. La segunda figura corresponde a contornos de presión relativa con vectores de velocidad superpues-

tos, también en el plano medio. Se pueden observar las zonas donde la presión es superior a la presión atmosférica y donde es inferior. Mientras mayor sea la diferencia entre los valores encontrados para la presión en estas regiones, mas se acelerará el fluido para desplazarse entre ellas. En la tercera figura se muestran líneas de corriente, coloreadas por magnitud de velocidad, liberadas desde un plano que se encuentra sobre el edificio de altura a . Estas tienen como objetivo mostrar las desviaciones del flujo al golpear el frente del edificio de interés. Se aprecia que el flujo se divide en cuatro corrientes, una hacia el suelo, una sobre el edificio, y las otras dos por los costados de este. La última figura corresponde a una iso-superficie del factor de concentración $C_f = 1.05$. Esta permite identificar las regiones del espacio donde el aire es acelerado, en el eje x , un 5% (o más al interior de las superficies) con respecto al flujo libre.

Caso 1: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 2$

En la Figura 5.7 se puede observar, según los contornos, la magnitud de la velocidad del aire, y también su dirección con los vectores. Se ve claramente que el flujo se deflecta y se acelera al pasar sobre el primer edificio y el último (contando según crece el eje x). Al avanzar sobre los edificios intermedios la velocidad disminuye pero el flujo es prácticamente horizontal. En la Figura 5.8 se aprecia como aumenta la presión en las caras donde golpea el flujo en el primer y último edificio. Sobre estos, existen zonas de baja presión que coinciden con las regiones donde se acelera el flujo. La Figura 5.9 muestra como el flujo sobre el cuarto edificio se divide en cuatro corrientes, hacia el suelo, sobre y a ambos costados del edificio de interés. Por último, en la Figura 5.10 se destacan las zonas con la mayor aceleración de la componente en el eje x de la velocidad.

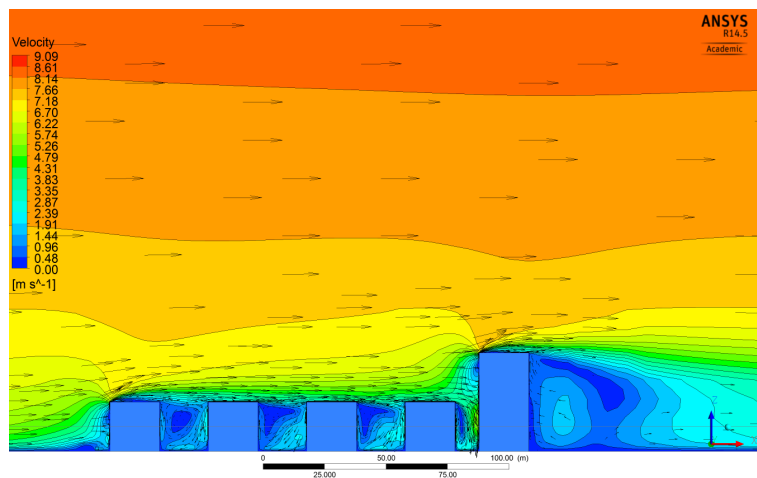


Figura 5.7: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 1: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 2$.

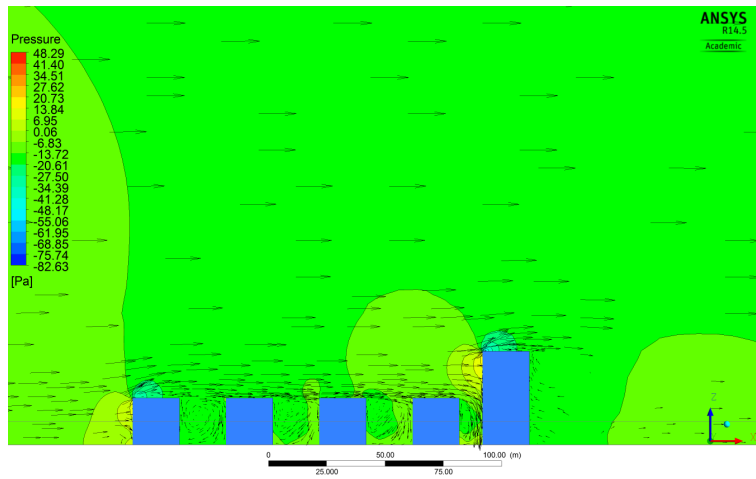


Figura 5.8: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 1: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 2$.

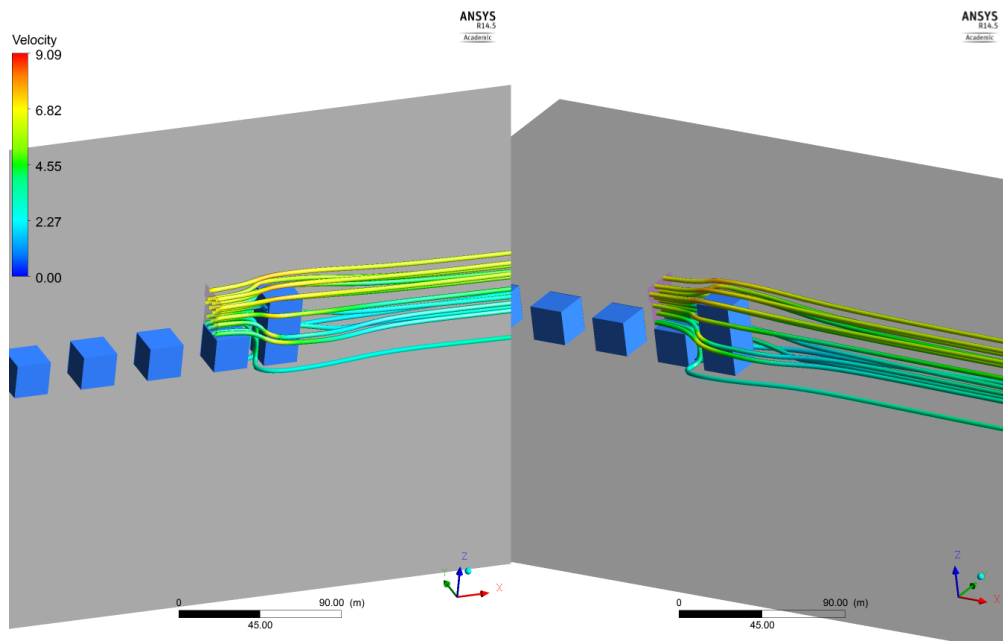


Figura 5.9: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 1: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 2$.

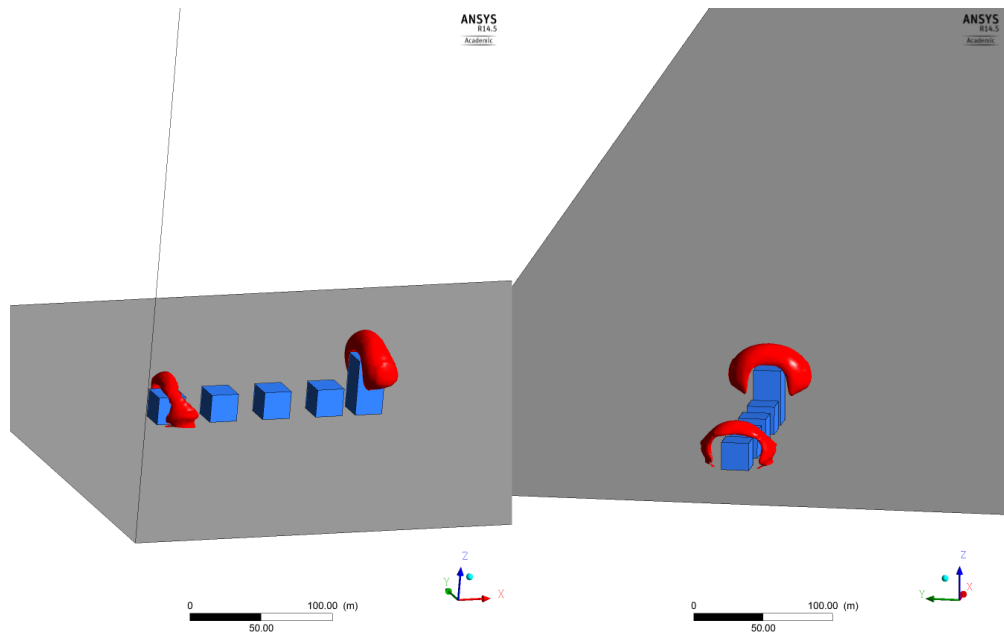


Figura 5.10: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 1: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 2$.

Caso 2: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 3$

En la Figura 5.11 se ve un comportamiento similar al del caso anterior. En la Figura 5.12 se aprecia que, las zonas de presión alta y baja sobre el último edificio abarcan más superficie y toman valores más extremos que en el caso anterior. La Figura 5.13 muestra como gran parte del flujo es desviado por los costados del último edificio. Por último, en la Figura 5.14 se aprecia que, en comparación con el caso anterior, las zonas de concentración de flujo son más pequeñas para el primer edificio, y para el último edificio, son más grandes y se alargan más cerca del suelo.

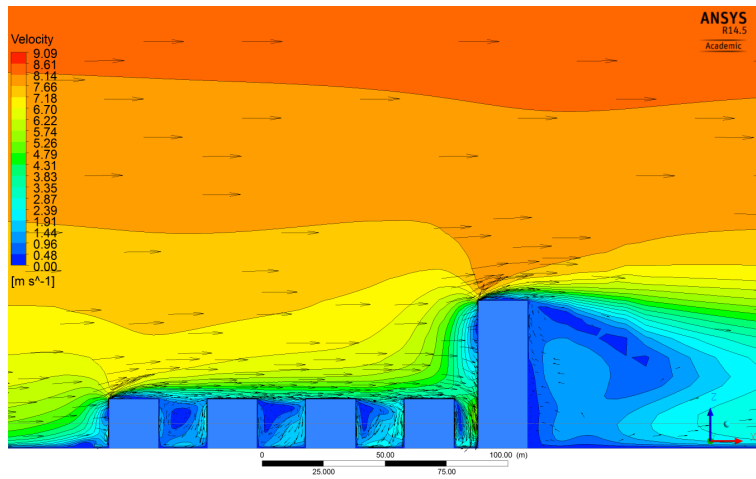


Figura 5.11: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 2: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 3$.

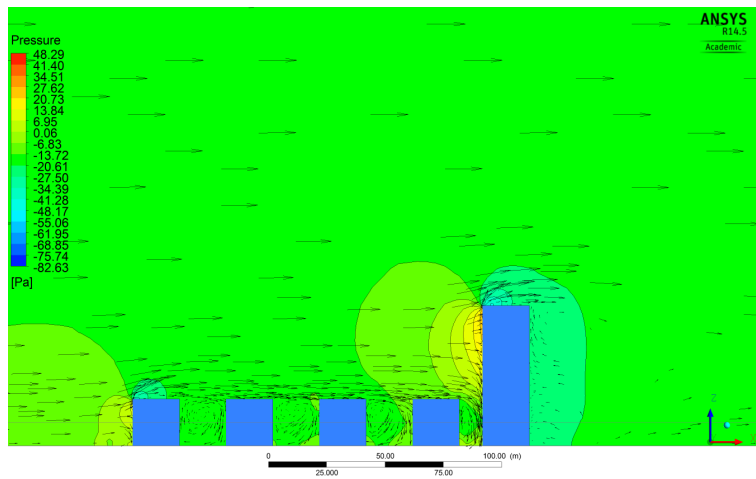


Figura 5.12: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 2: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 3$.

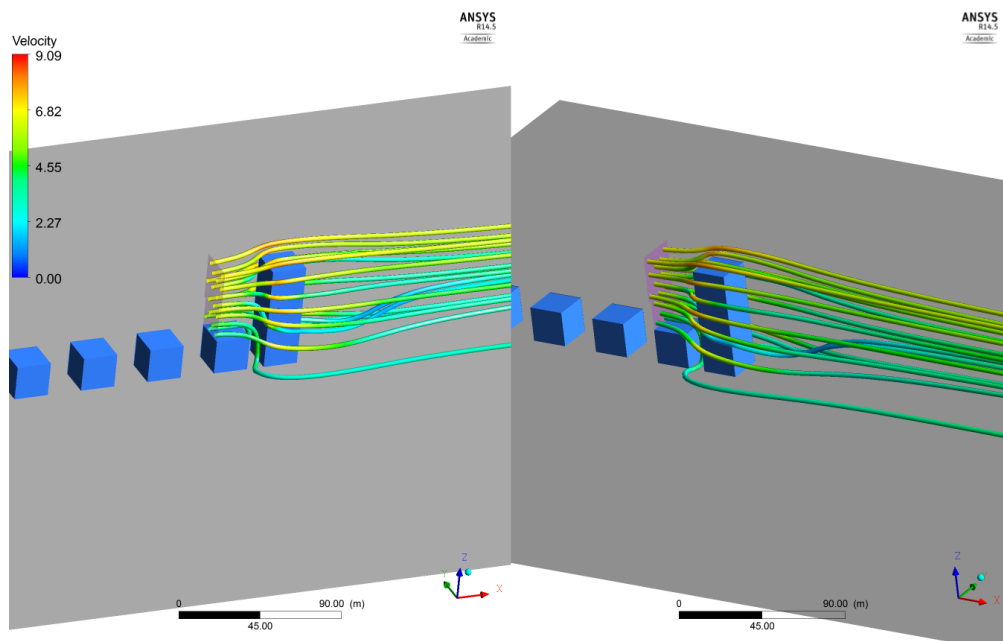


Figura 5.13: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 2: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 3$.

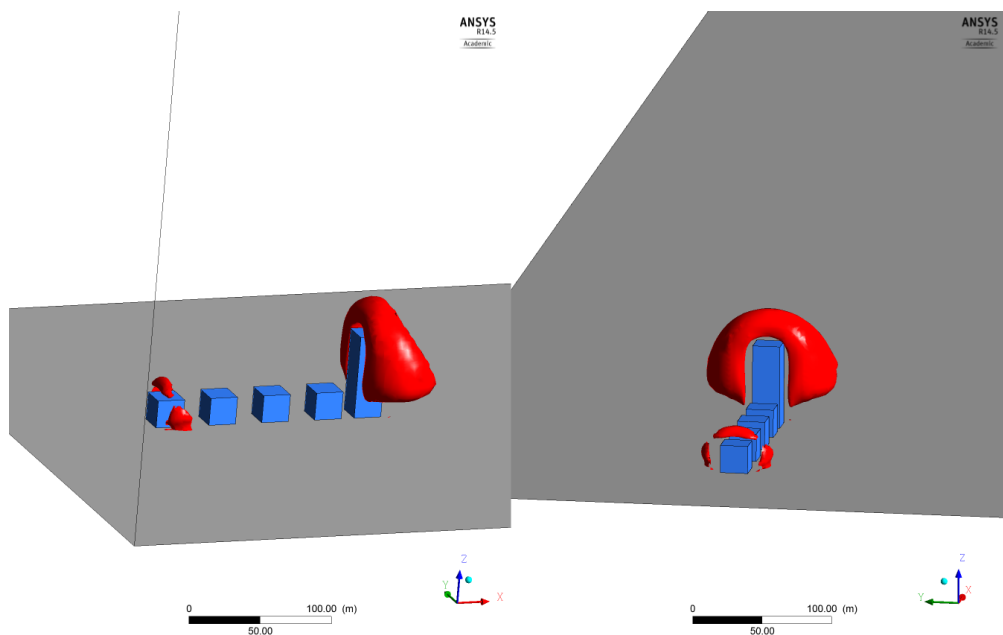


Figura 5.14: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 2: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 3$.

Caso 3: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 4$

En la Figura 5.15 se ve un comportamiento similar al de los casos anteriores. En la Figura 5.16 se aprecia que, las zonas de presión alta y baja sobre el último edificio abarcan más superficie y toman valores más extremos que en el caso anterior. La Figura 5.17 muestra como gran parte del flujo es desviado por los costados del último edificio. Por último, en la Figura 5.18 se aprecia que, en comparación con el caso anterior, las zonas de concentración de flujo son más pequeñas para el primer edificio, y para el último edificio, son más grandes y se alargan más cerca del suelo.

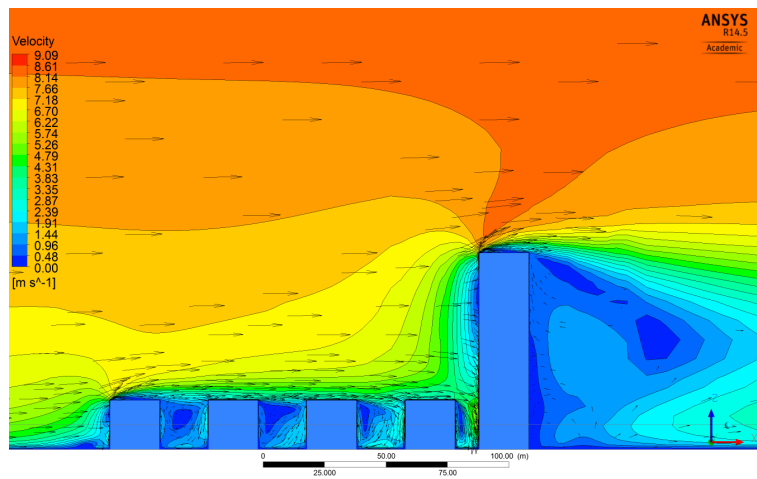


Figura 5.15: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 3: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 4$.

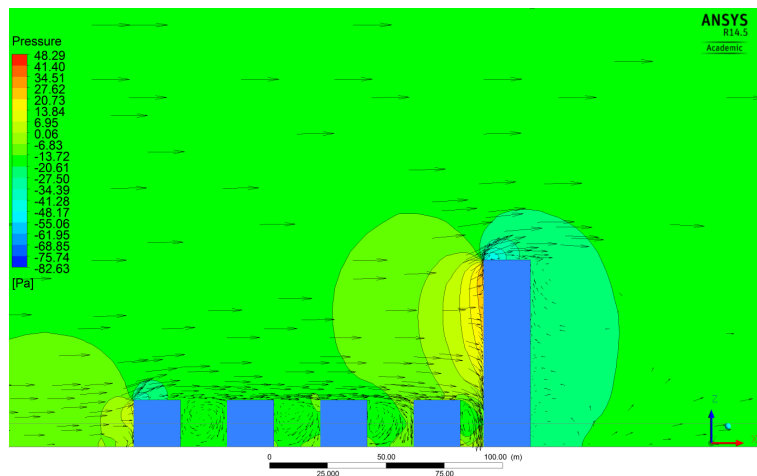


Figura 5.16: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 3: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 4$.

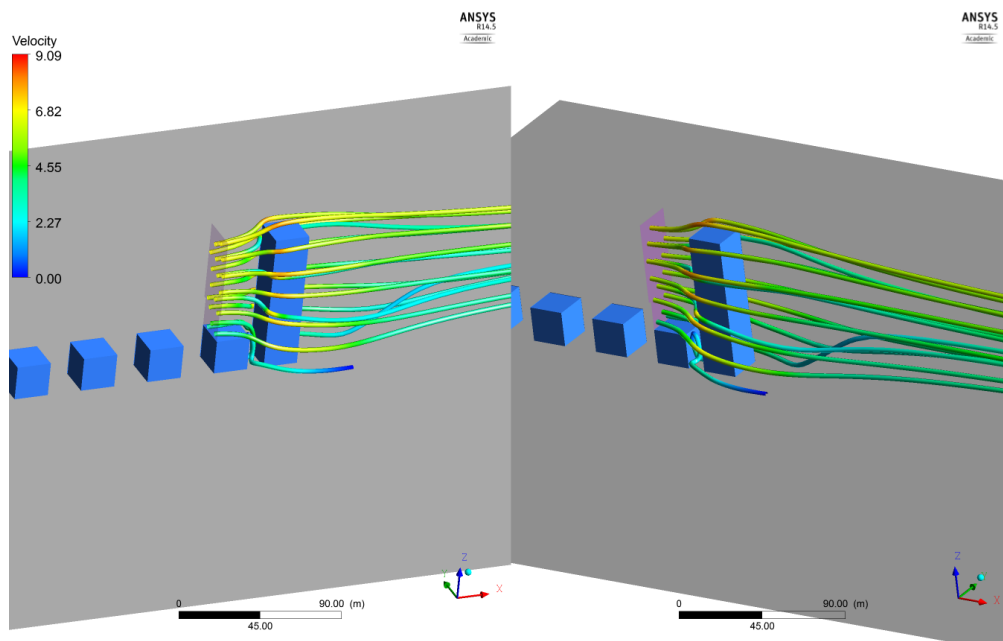


Figura 5.17: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 3: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 4$.

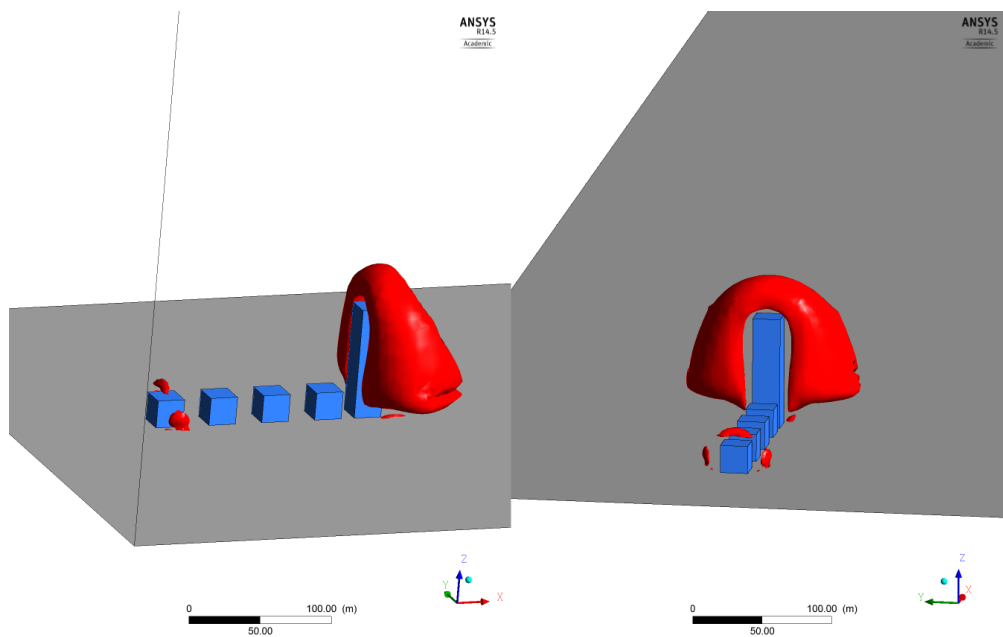


Figura 5.18: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 3: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 4$.

Caso 4: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 5$

En la Figura 5.19 se ve que en el borde del edificio de interés, donde el flujo se separa, los vectores de velocidad forman un ángulo con respecto a la horizontal levemente mayor que para el caso 1. En la Figura 5.20 se aprecia que, las zonas de presión alta y baja sobre el último edificio abarcan más superficie y toman valores más extremos que en el caso anterior. La Figura 5.21 muestra como gran parte del flujo es desviado por los costados del último edificio. Por último, en la Figura 5.22 se aprecia que, en comparación con el caso anterior, las zonas de concentración de flujo son más pequeñas para el primer edificio, y para el último edificio, son más grandes y se alargan más cerca del suelo.

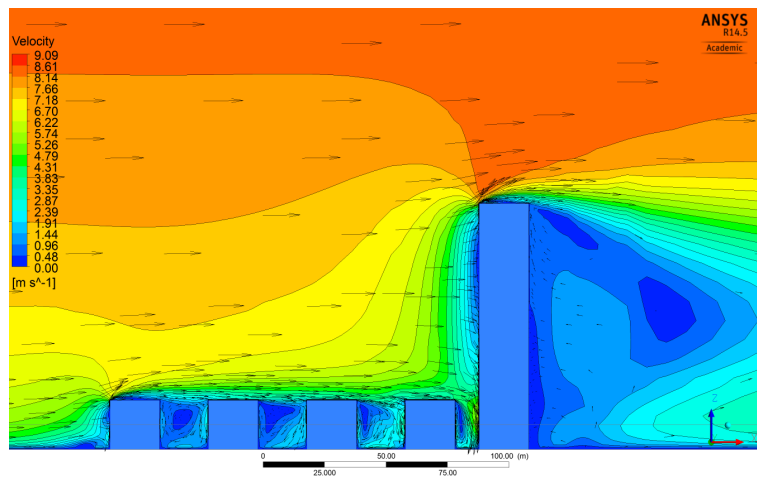


Figura 5.19: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 4: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 5$.

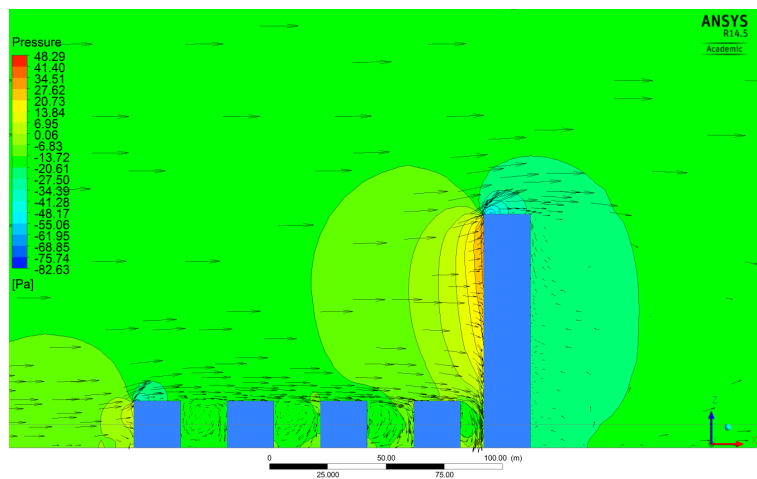


Figura 5.20: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 4: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 5$.

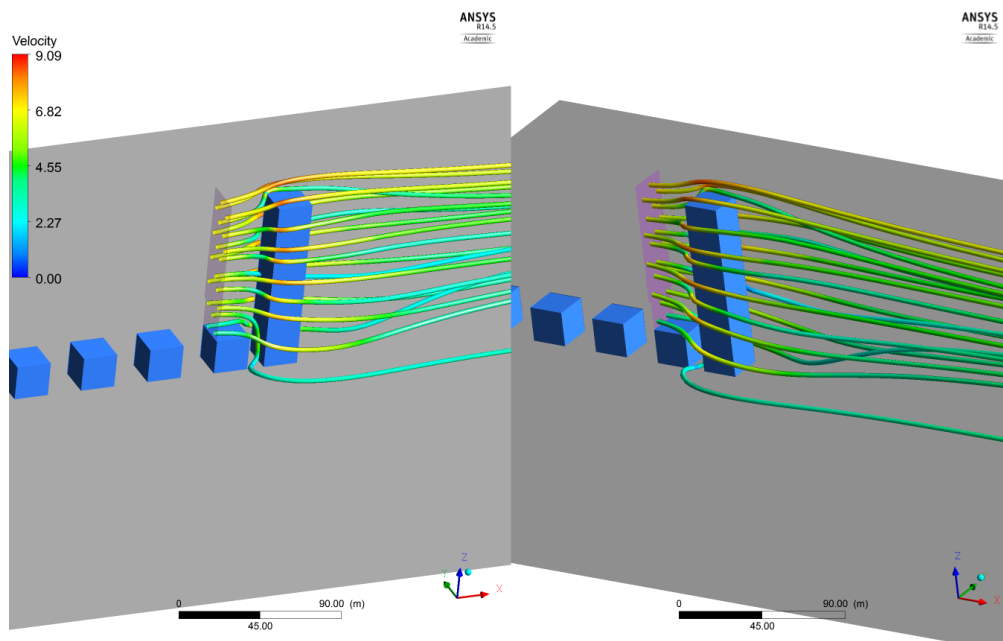


Figura 5.21: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 4: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 5$.

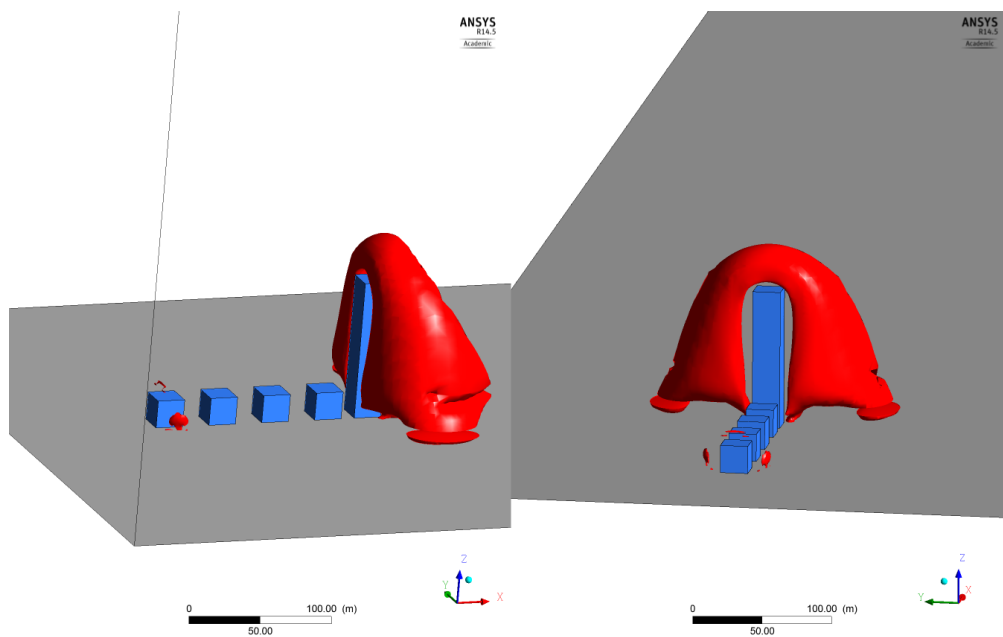


Figura 5.22: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 4: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 5$.

Caso 13: $a = 1$, $b = 2$, $c = 2$

En los contornos de velocidad (Figura 5.23), comparando con el caso 1, se puede ver una mayor aceleración sobre el edificio de interés en este caso. Además, la velocidad del flujo que desciende por la parte baja de la cara aguas arriba del último edificio es menor que en el caso 1. En la Figura 5.24 se aprecia que, el máximo global para la presión relativa, es menor que para los casos anteriores. En la Figura 5.26 se aprecia que las zonas de concentración de flujo son más grandes que para el caso 1.

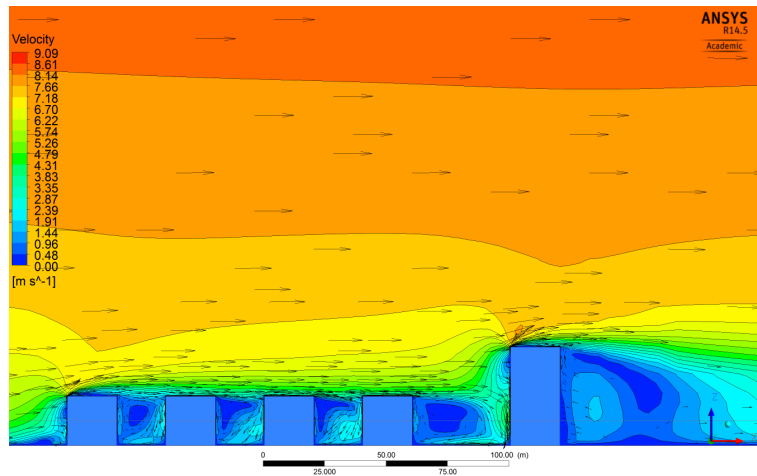


Figura 5.23: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 13: $a = 1$, $b = 2$, $c = 2$.

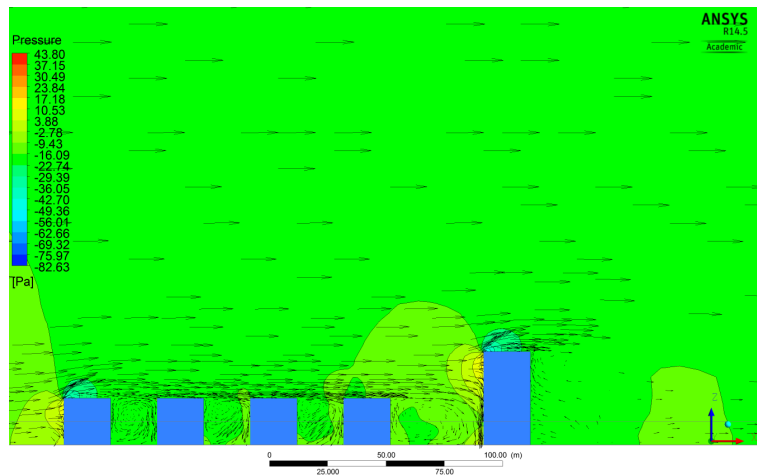


Figura 5.24: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 13: $a = 1$, $b = 2$, $c = 2$.

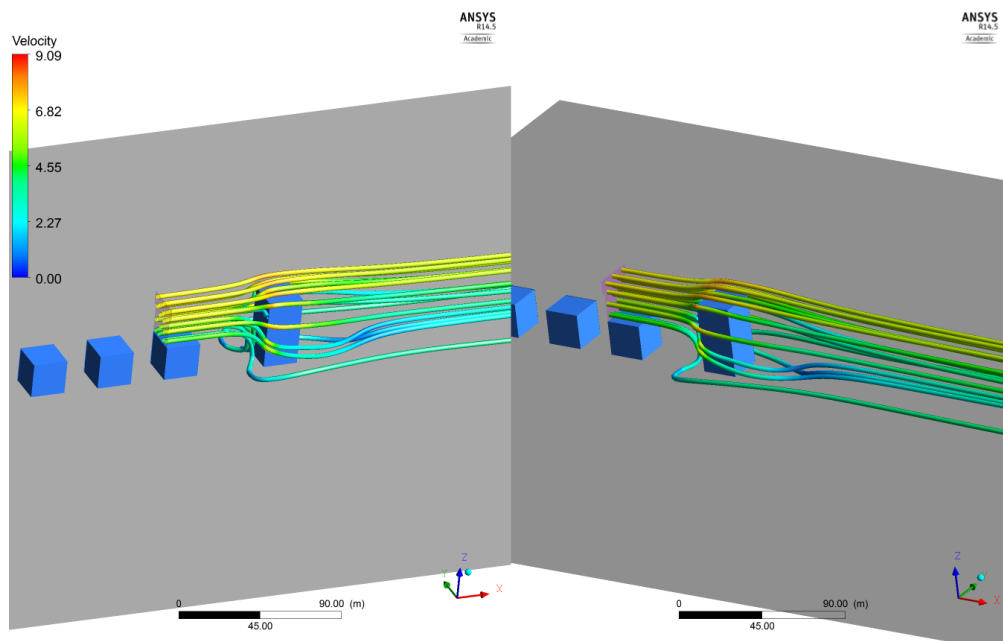


Figura 5.25: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 13: $a = 1$, $b = 2$, $c = 2$.

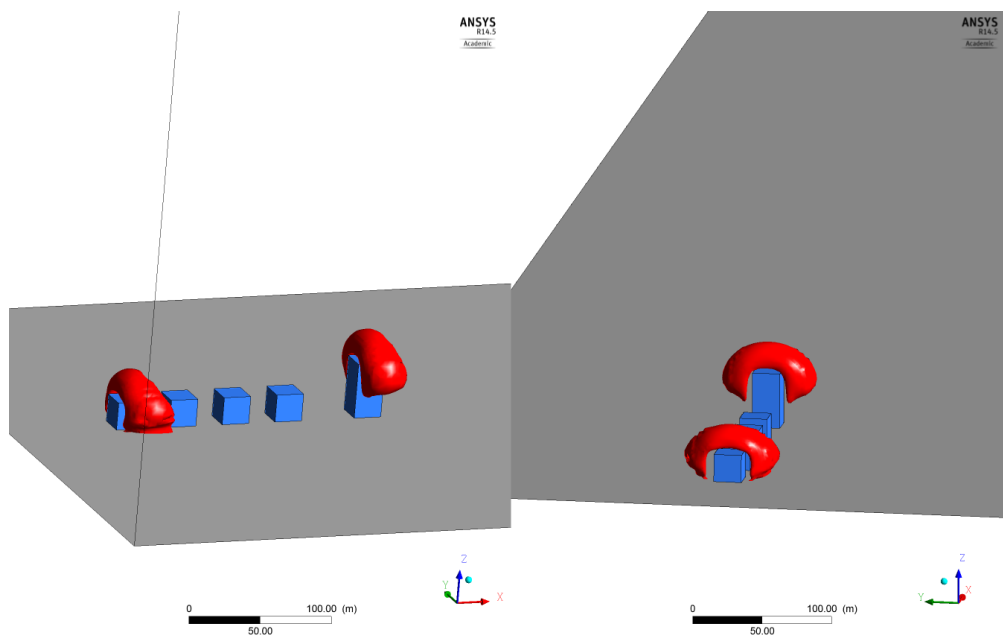


Figura 5.26: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 13: $a = 1$, $b = 2$, $c = 2$.

Caso 14: $a = 1$, $b = 2$, $c = 3$

En la Figura 5.27 se ve un comportamiento similar al del caso anterior. En la Figura 5.28 se aprecia que, las zonas de presión alta y baja sobre el último edificio abarcan más superficie y toman valores más extremos que en el caso anterior. La Figura 5.29 muestra como gran parte del flujo es desviado por los costados del último edificio. Por último, en la Figura 5.30 se aprecia que, en comparación con el caso anterior, las zonas de concentración de flujo son más pequeñas para el primer edificio, y para el último edificio, son más grandes y se alargan más cerca del suelo.

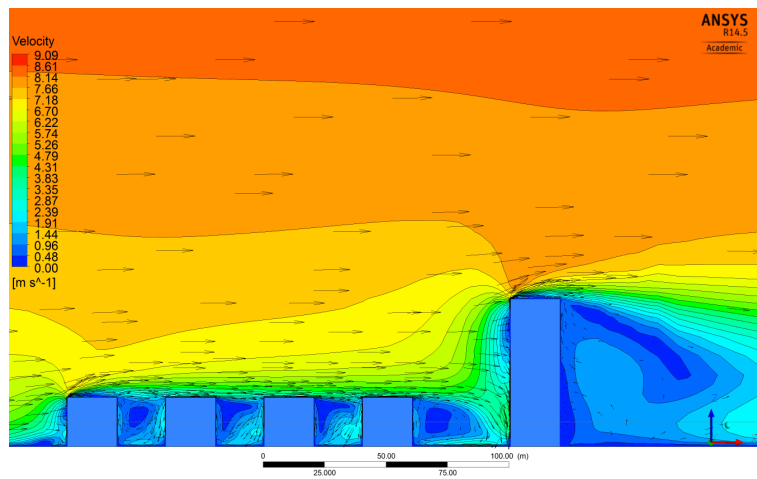


Figura 5.27: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 14: $a = 1$, $b = 2$, $c = 3$.

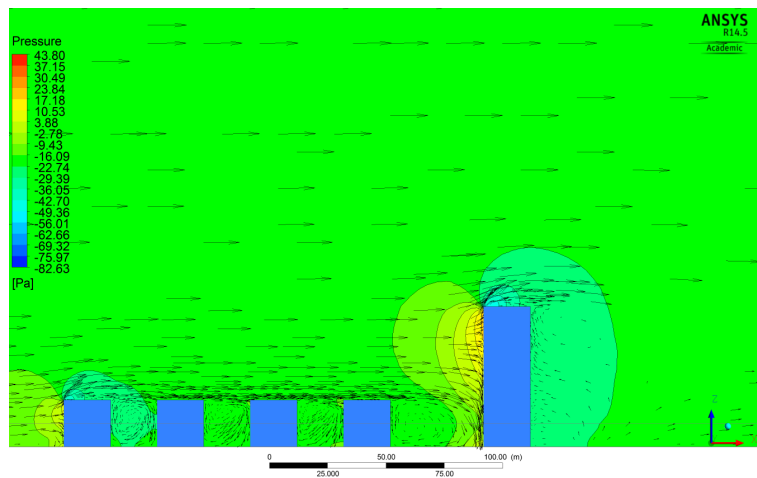


Figura 5.28: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 14: $a = 1$, $b = 2$, $c = 3$.

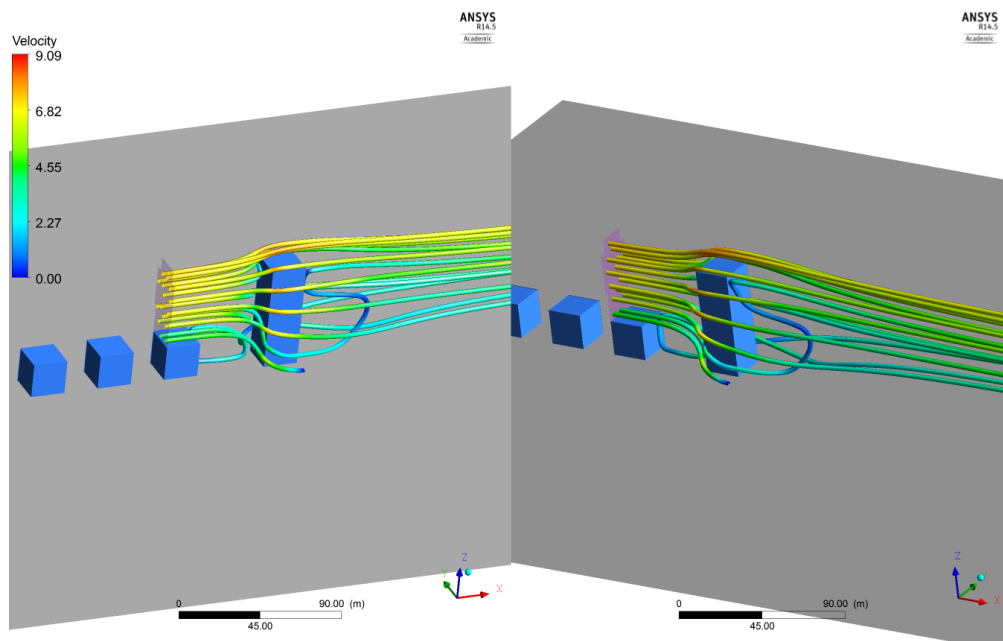


Figura 5.29: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 14: $a = 1$, $b = 2$, $c = 3$.

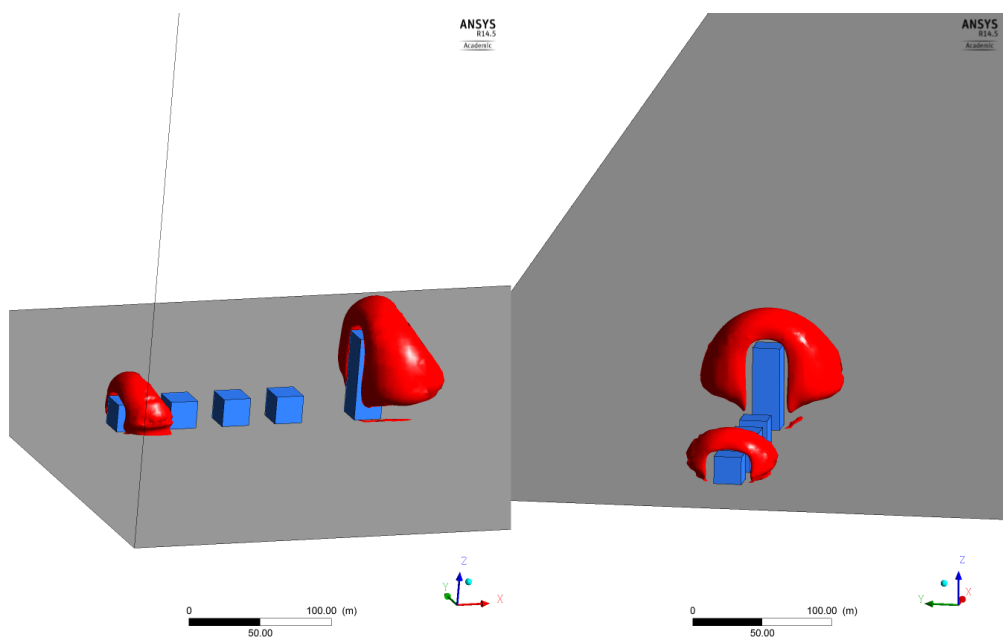


Figura 5.30: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 14: $a = 1$, $b = 2$, $c = 3$.

Caso 15: $a = 1$, $b = 2$, $c = 4$

En la Figura 5.31 se ve un comportamiento similar al del caso anterior. En la Figura 5.32 se aprecia que, las zonas de presión alta y baja sobre el último edificio abarcan más superficie y toman valores más extremos que en el caso anterior. La Figura 5.33 muestra como gran parte del flujo es desviado por los costados del último edificio. Por último, en la Figura 5.34 se aprecia que, en comparación con el caso anterior, las zonas de concentración de flujo son más pequeñas para el primer edificio, y para el último edificio, son más grandes y se alargan más cerca del suelo.

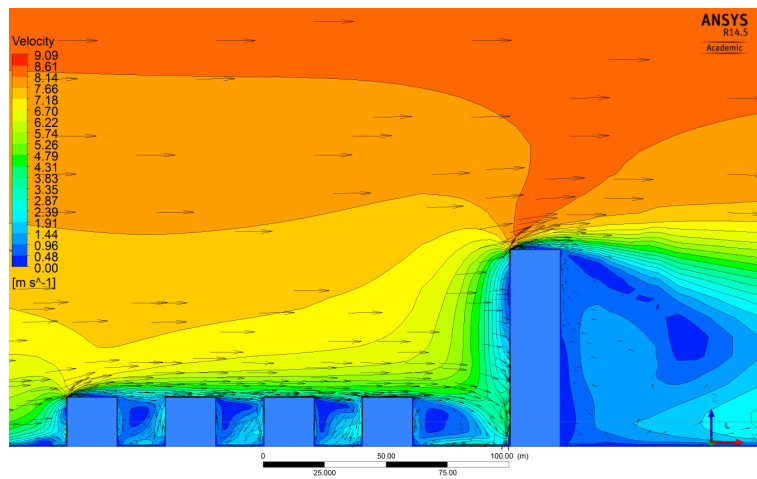


Figura 5.31: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 15: $a = 1$, $b = 2$, $c = 4$.

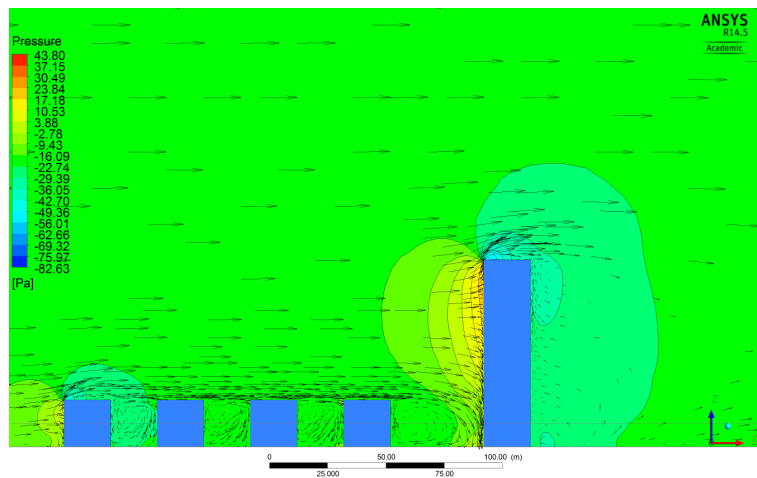


Figura 5.32: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 15: $a = 1$, $b = 2$, $c = 4$.

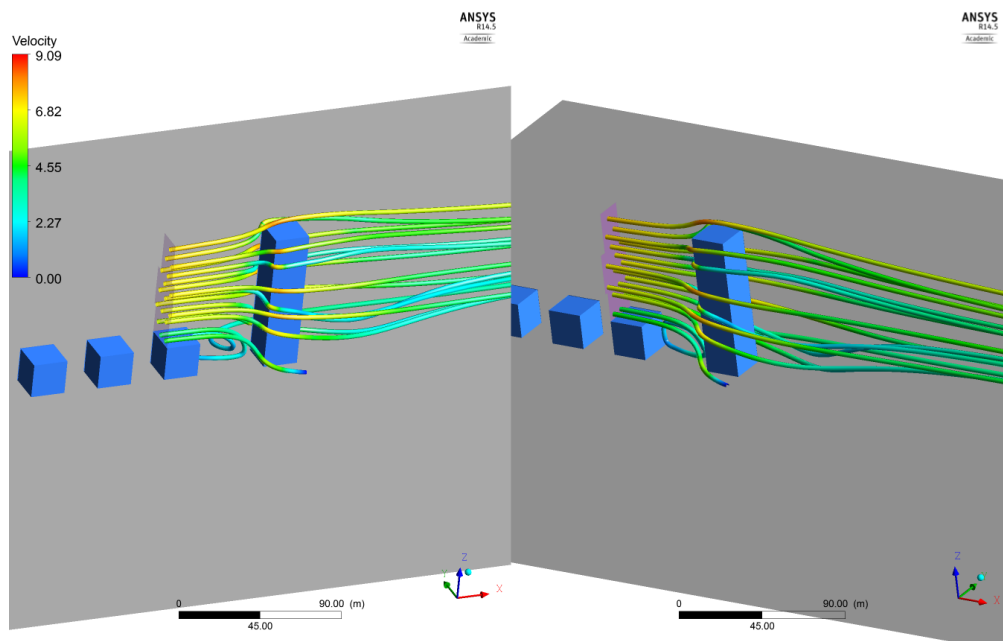


Figura 5.33: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 15: $a = 1$, $b = 2$, $c = 4$.

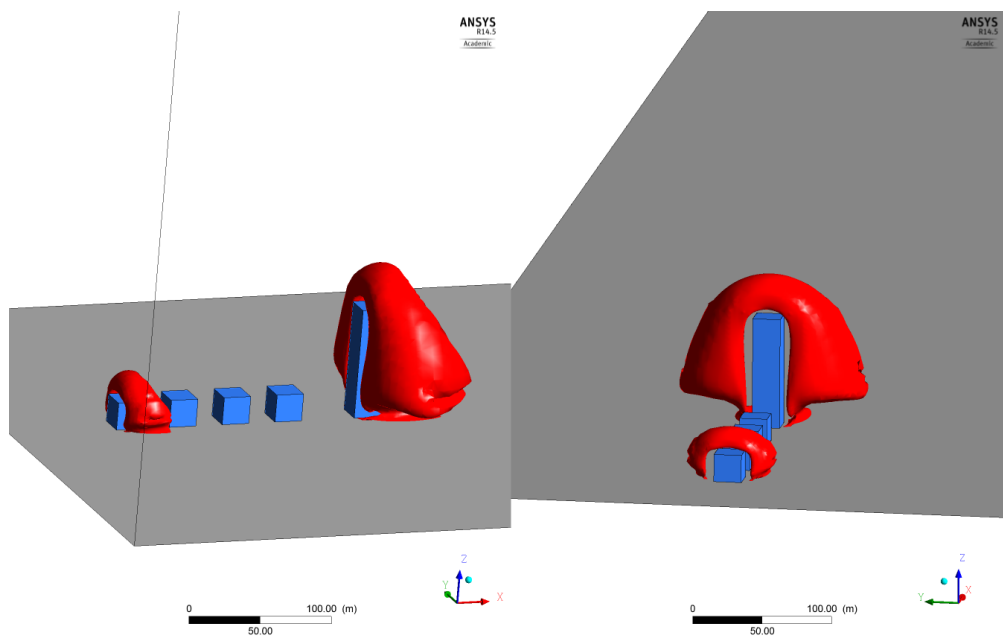


Figura 5.34: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 15: $a = 1$, $b = 2$, $c = 4$.

Caso 16: $a = 1$, $b = 2$, $c = 5$

En la Figura 5.35 se ve que en el borde del edificio de interés, donde el flujo se separa, los vectores de velocidad forman un ángulo con respecto a la horizontal levemente mayor que para el caso 13. En la Figura 5.36 se aprecia que, las zonas de presión alta y baja sobre el último edificio abarcan más superficie y toman valores más extremos que en el caso anterior. La Figura 5.37 muestra como gran parte del flujo es desviado por los costados del último edificio. Por último, en la Figura 5.38 se aprecia que, en comparación con el caso anterior, las zonas de concentración de flujo son más pequeñas para el primer edificio, y para el último edificio, son más grandes y se alargan más cerca del suelo.

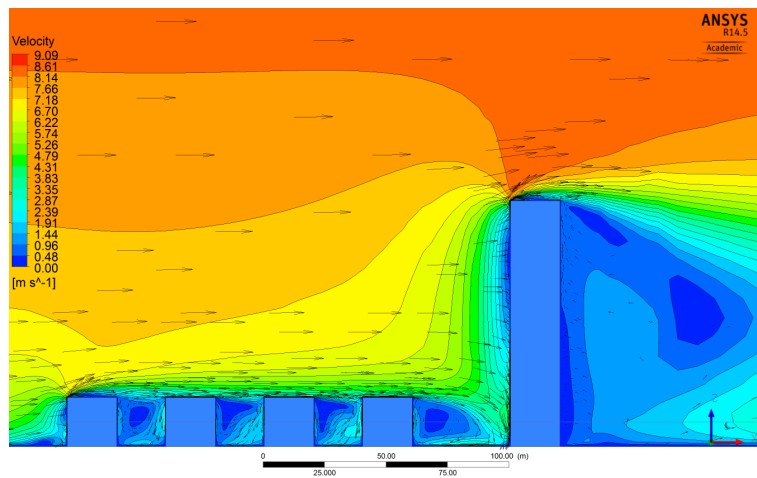


Figura 5.35: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 16: $a = 1$, $b = 2$, $c = 5$.

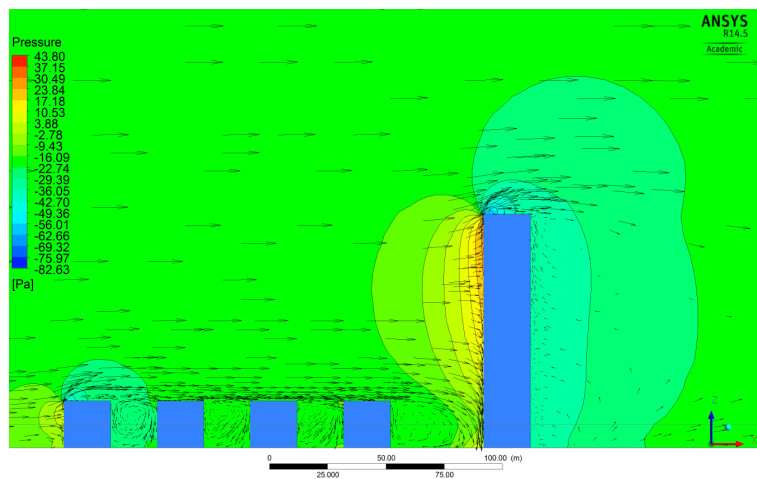


Figura 5.36: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 16: $a = 1$, $b = 2$, $c = 5$.

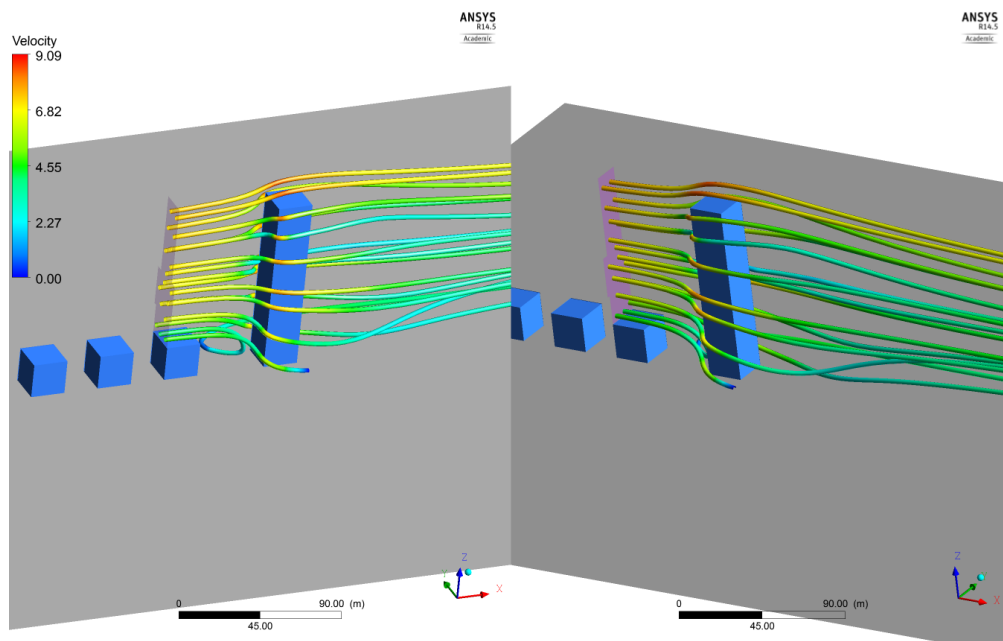


Figura 5.37: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 16: $a = 1$, $b = 2$, $c = 5$.

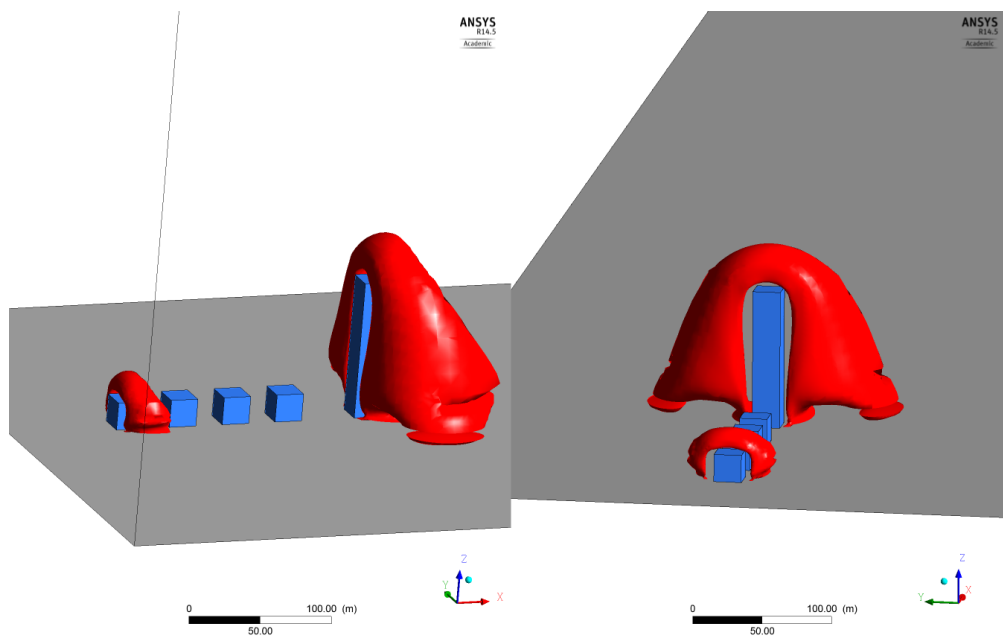


Figura 5.38: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 16: $a = 1$, $b = 2$, $c = 5$.

Caso 17: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 3$

En la Figura 5.39 se ve que el flujo se deflecta y se acelera al pasar sobre el primer, el cuarto y el último edificio (contando según crece el eje x). En la Figura 5.40 se aprecia como aumenta la presión en las caras donde golpea el flujo en el primer, en el cuarto y en el último edificio. Sobre estos, existen zonas de baja presión que coinciden con las regiones donde se acelera el flujo. La Figura 5.41 muestra como el flujo sobre el cuarto edificio se divide en cuatro corrientes, hacia el suelo, sobre y a ambos costados del edificio de interés. Por último, en la Figura 5.42 se destacan las zonas con la mayor aceleración de la componente en el eje x de la velocidad.

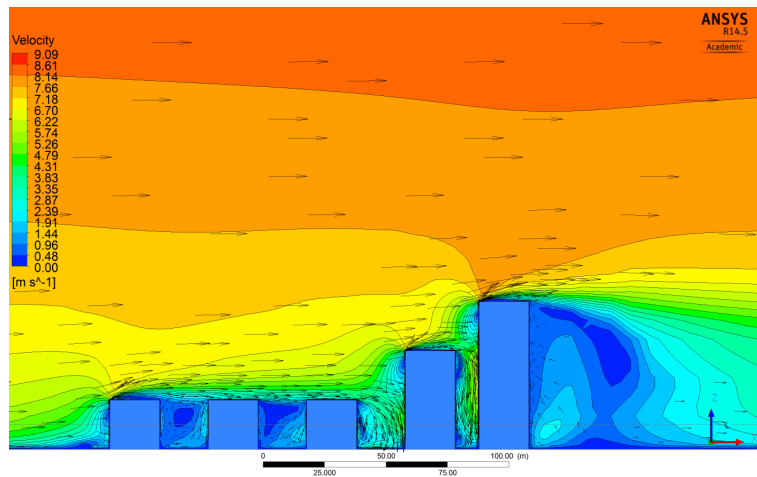


Figura 5.39: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 17: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 3$.

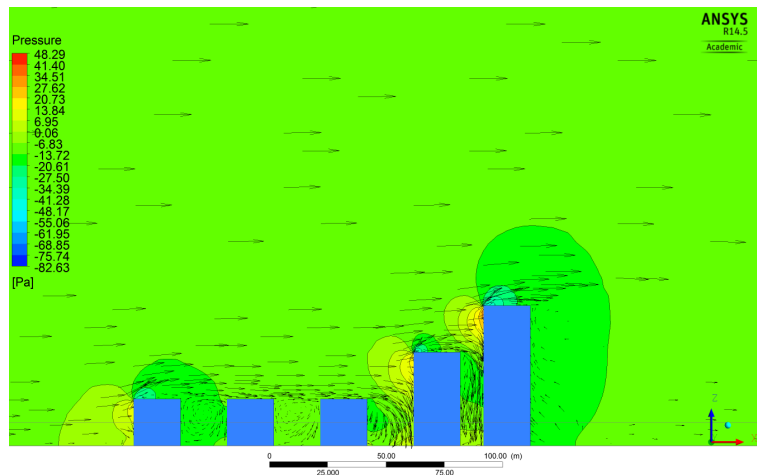


Figura 5.40: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 17: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 3$.

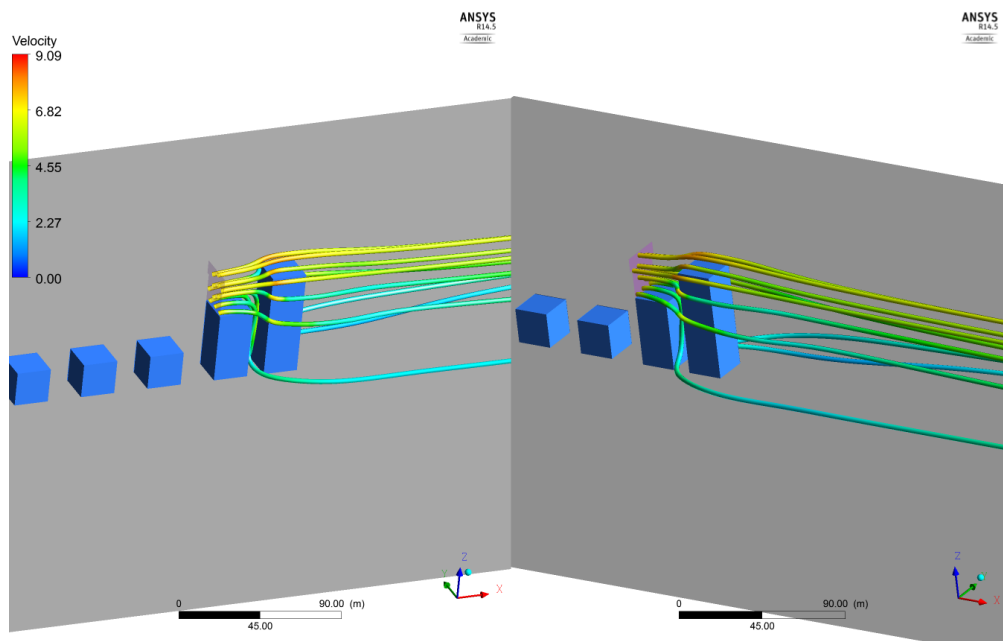


Figura 5.41: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 17: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 3$.

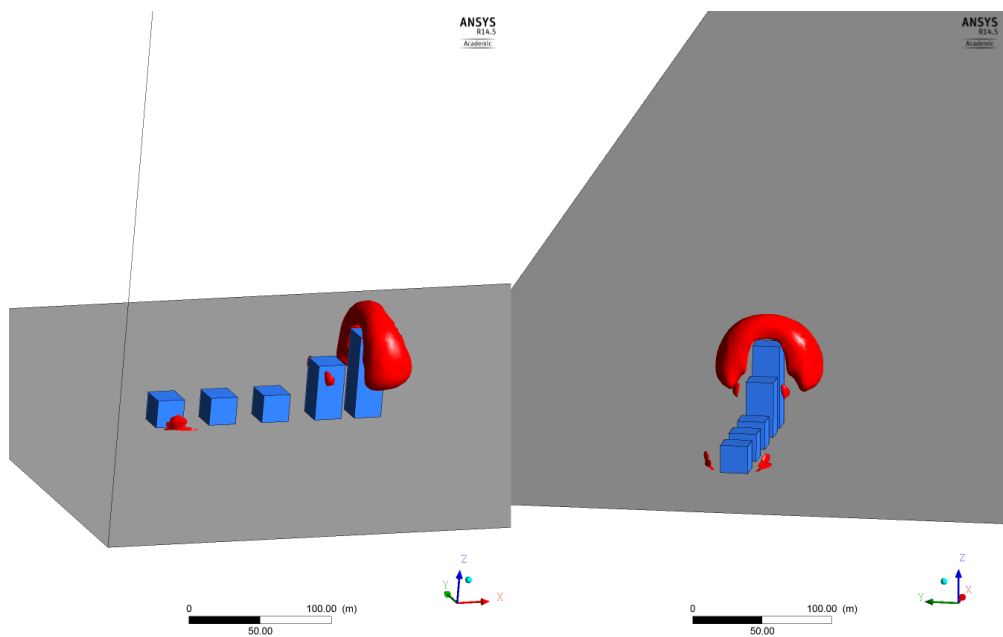


Figura 5.42: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 17: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 3$.

Caso 18: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 4$

En la Figura 5.43 se ve un comportamiento similar al del caso anterior. En la Figura 5.44 se aprecia que, las zonas de presión alta y baja sobre el último edificio abarcan más superficie y toman valores más extremos que en el caso anterior. La Figura 5.45 muestra como gran parte del flujo es desviado por los costados del último edificio. Por último, en la Figura 5.46, se aprecian zonas de concentración de flujo más grandes alrededor del último edificio en comparación con el caso anterior.

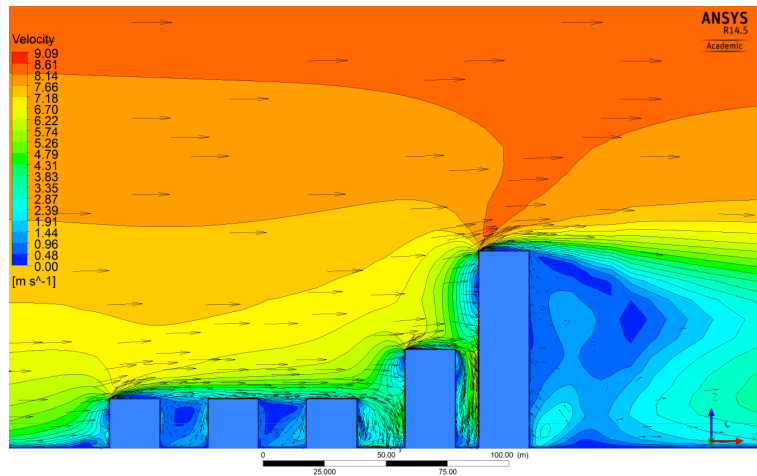


Figura 5.43: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 18: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 4$.

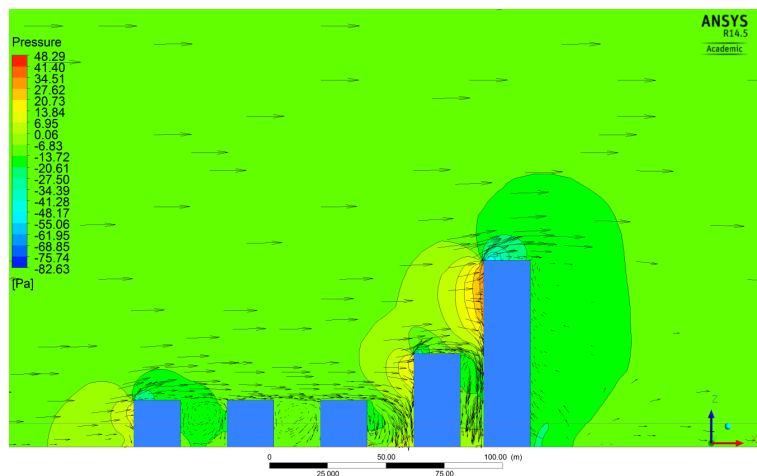


Figura 5.44: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 18: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 4$.

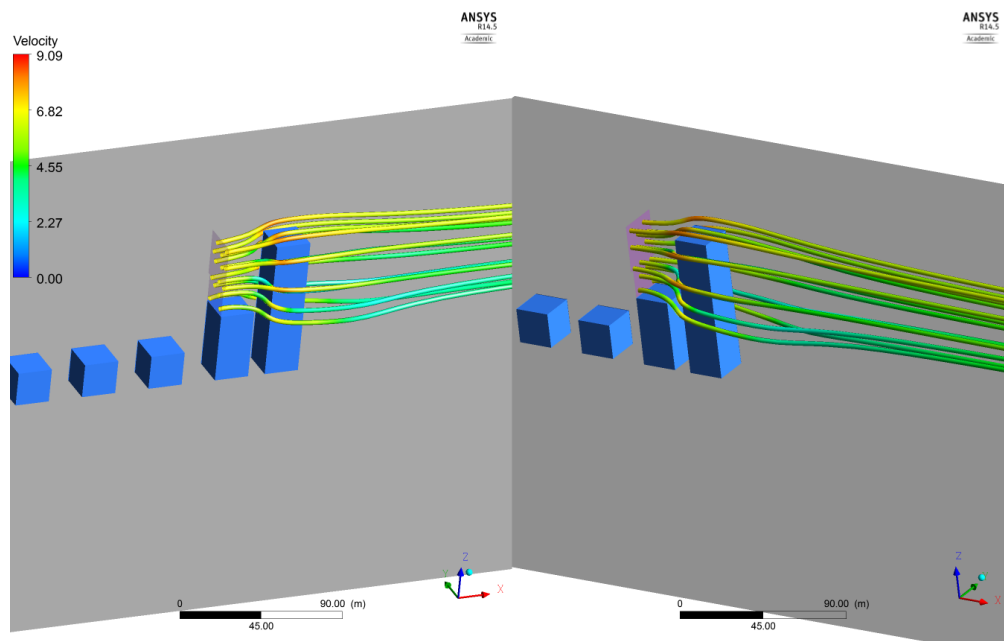


Figura 5.45: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 18: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 4$.

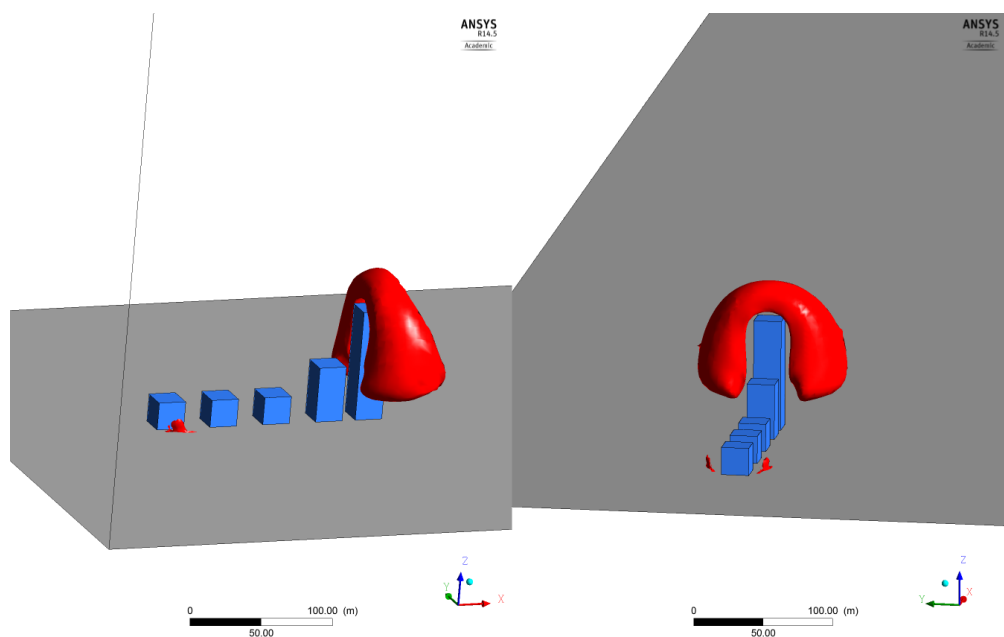


Figura 5.46: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 18: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 4$.

Caso 19: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 5$

En la Figura 5.47 se ve un comportamiento similar al del caso anterior. En la Figura 5.48 se aprecia que, las zonas de presión alta y baja sobre el último edificio abarcan más superficie y toman valores más extremos que en el caso anterior. La Figura 5.49 muestra como gran parte del flujo es desviado por los costados del último edificio. Por último, en la Figura 5.50, se aprecian zonas de concentración de flujo más grandes alrededor del último edificio en comparación con el caso anterior.

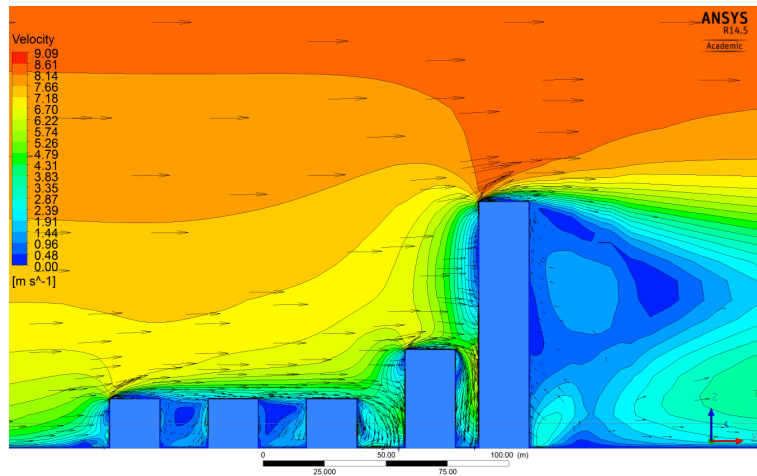


Figura 5.47: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 19: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 5$.

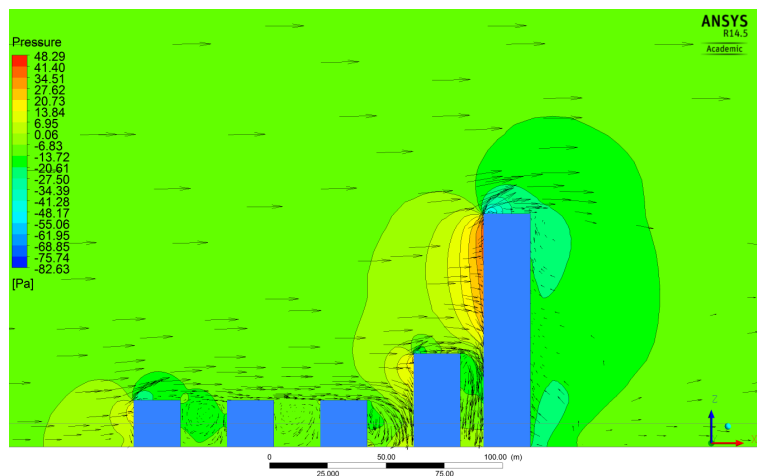


Figura 5.48: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 19: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 5$.

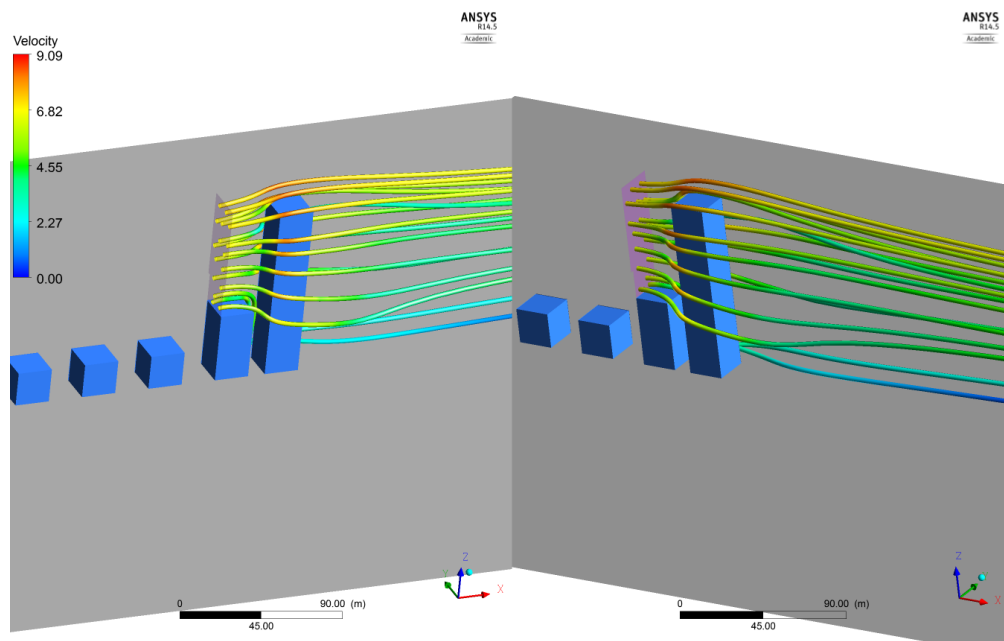


Figura 5.49: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 19: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 5$.

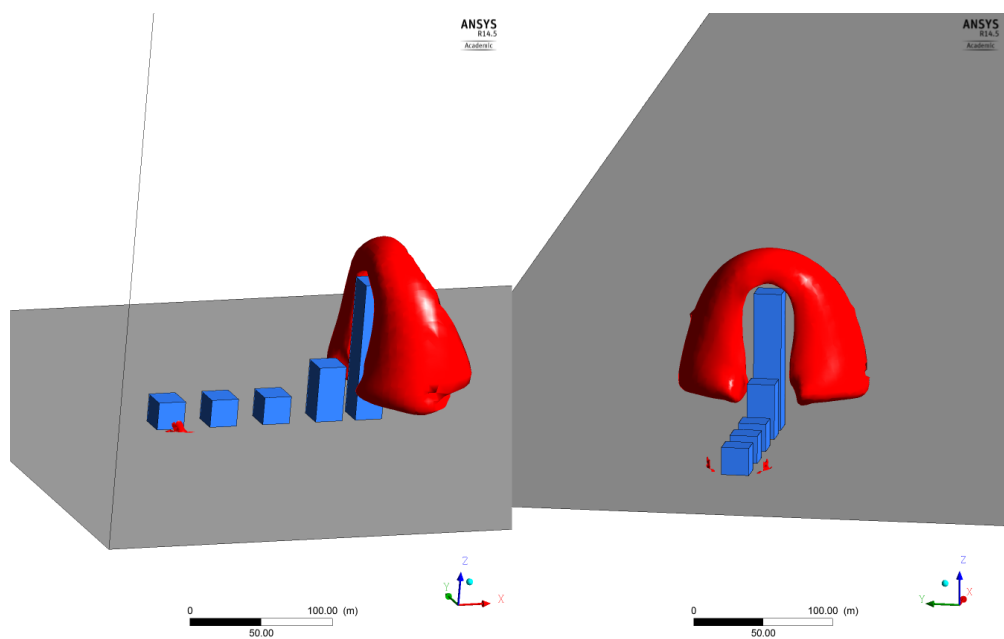


Figura 5.50: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 19: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 5$.

Caso 26: $a = 2$, $b = 2$, $c = 3$

En los contornos de velocidad (Figura 5.51), comparando con el caso 17, se muestra una mayor aceleración sobre el cuarto edificio en este caso. Además, la velocidad del flujo que desciende por la parte baja de la cara aguas arriba del último edificio es menor que en el caso 17. En la Figura 5.52 se aprecia que, el mínimo global para la presión relativa, es mayor que para los casos anteriores. En la Figura 5.54 se aprecia que las zonas de concentración de flujo son más grandes que para el caso 17.

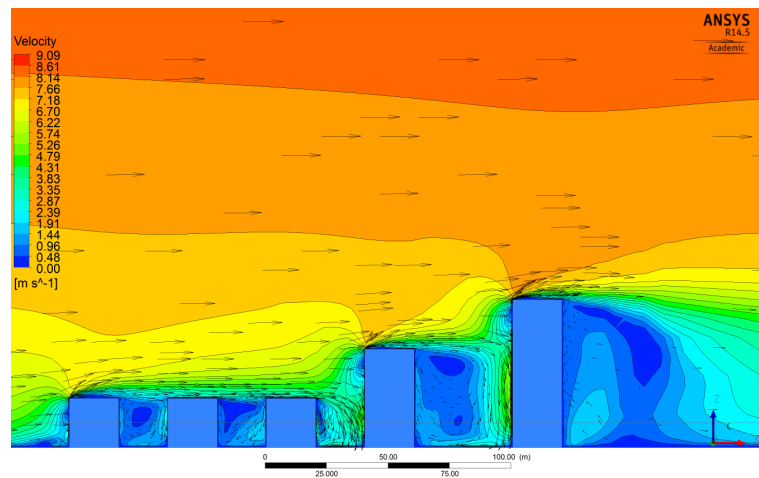


Figura 5.51: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 26: $a = 2$, $b = 2$, $c = 3$.

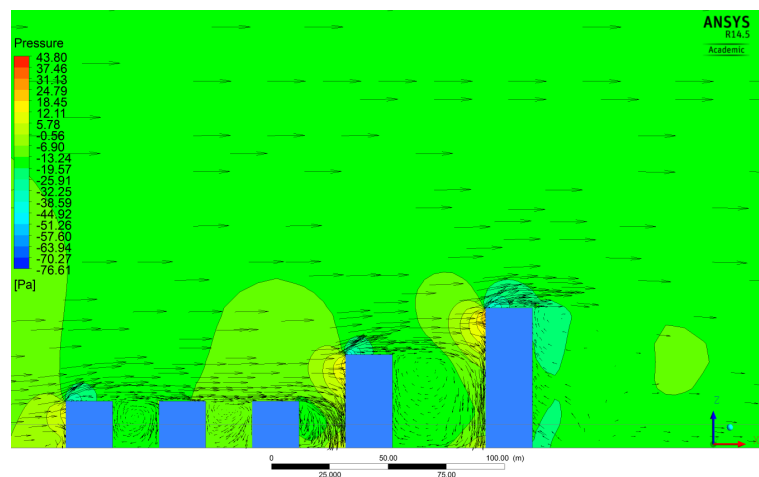


Figura 5.52: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 26: $a = 2$, $b = 2$, $c = 3$.

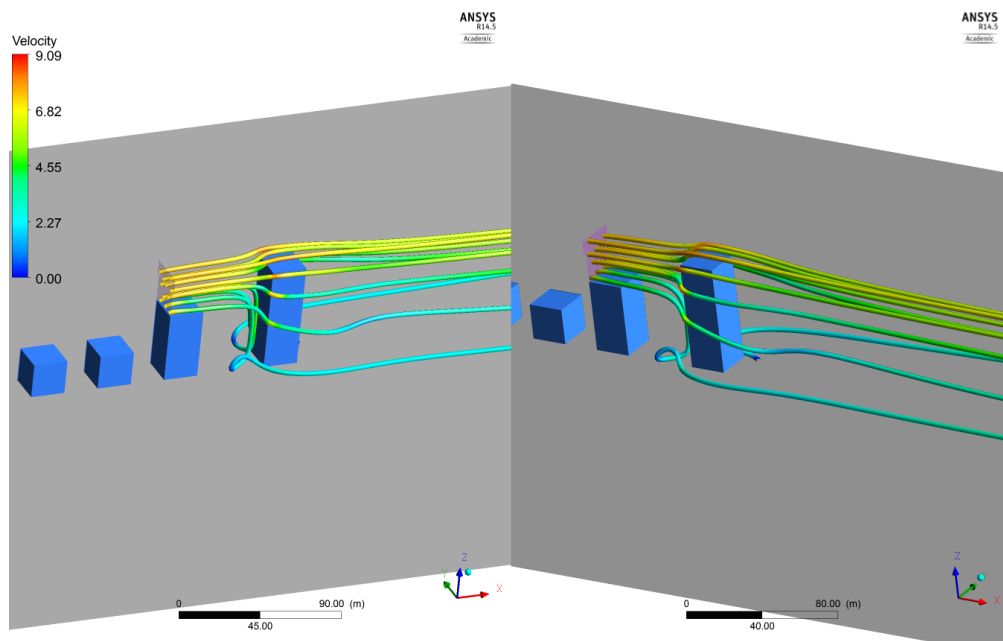


Figura 5.53: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 26: $a = 2$, $b = 2$, $c = 3$.

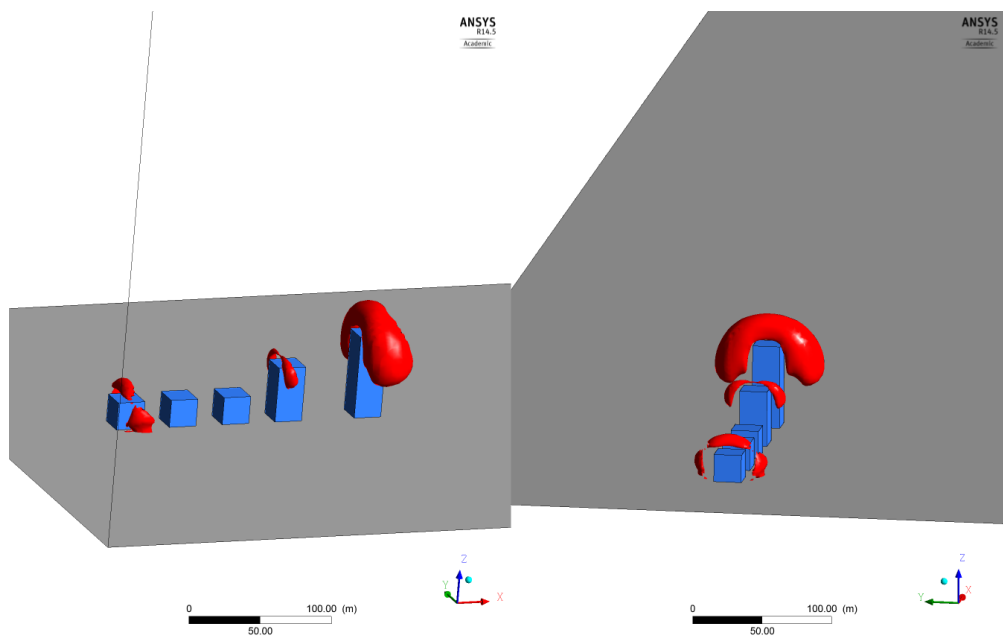


Figura 5.54: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 26: $a = 2$, $b = 2$, $c = 3$.

Caso 27: $a = 2$, $b = 2$, $c = 4$

En la Figura 5.55 se ve un comportamiento similar al del caso anterior. En la Figura 5.56 se aprecia que, las zonas de presión alta y baja sobre el último edificio abarcan más superficie y toman valores más extremos que en el caso anterior. La Figura 5.57 muestra como gran parte del flujo es desviado por los costados del último edificio. Por último, en la Figura 5.58, se aprecian zonas de concentración de flujo más grandes alrededor del último edificio en comparación con el caso anterior.

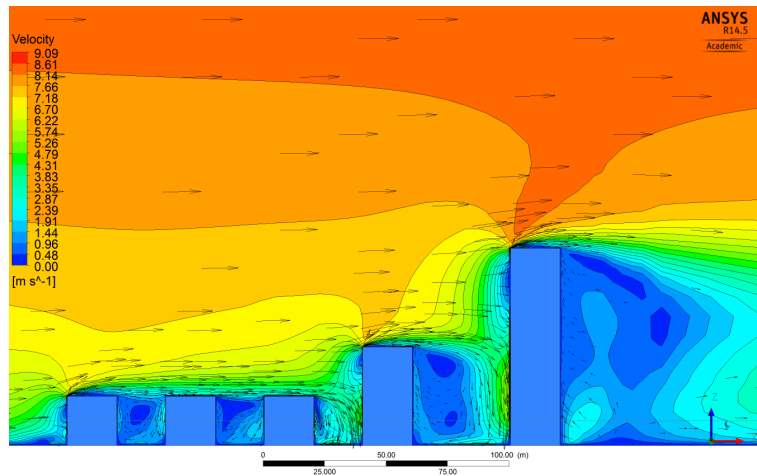


Figura 5.55: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 27: $a = 2$, $b = 2$, $c = 4$.

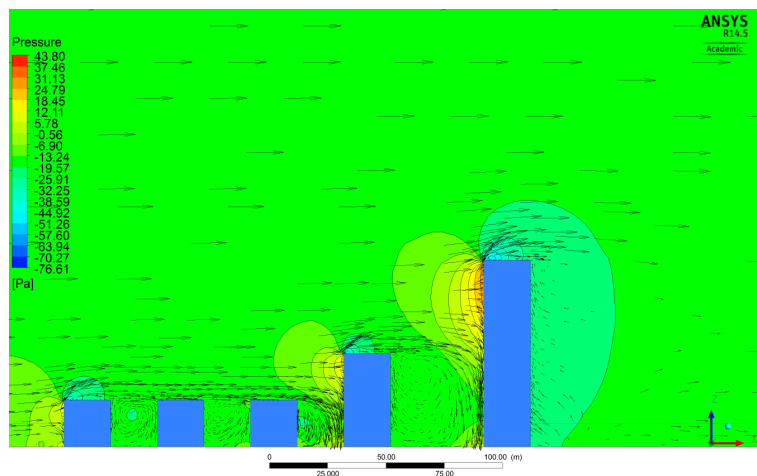


Figura 5.56: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 27: $a = 2$, $b = 2$, $c = 4$.

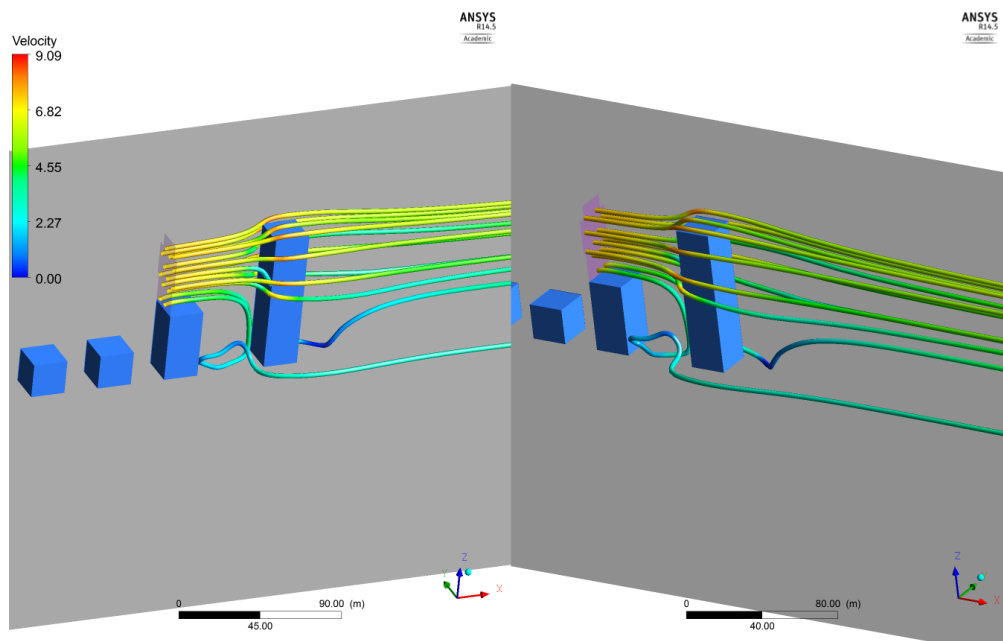


Figura 5.57: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 27: $a = 2$, $b = 2$, $c = 4$.

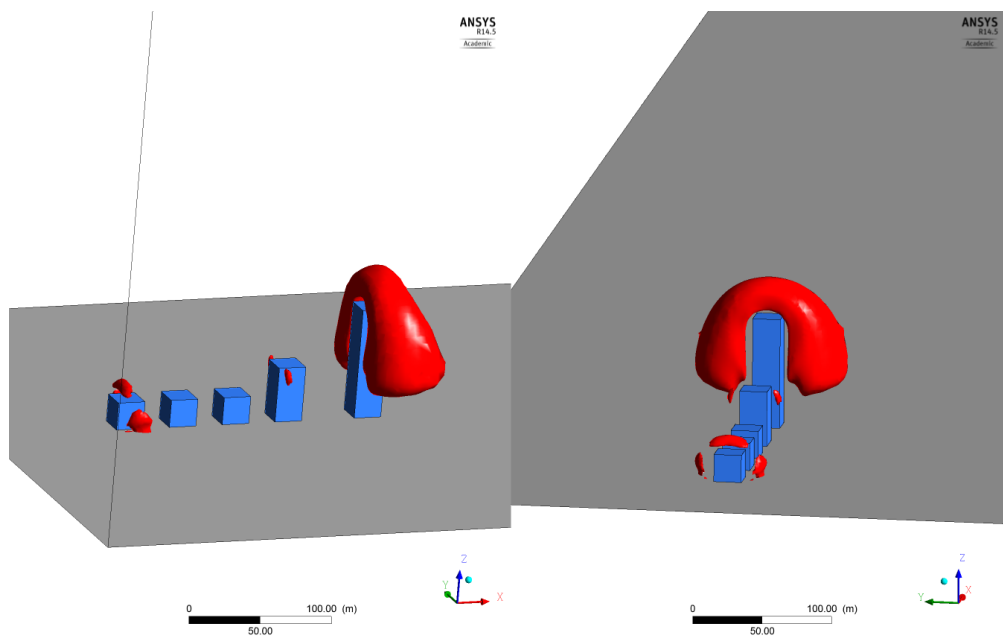


Figura 5.58: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 27: $a = 2$, $b = 2$, $c = 4$.

Caso 28: $a = 2$, $b = 2$, $c = 5$

En la Figura 5.59 se ve un comportamiento similar al del caso anterior. En la Figura 5.60 se aprecia que, las zonas de presión alta y baja sobre el último edificio abarcan más superficie y toman valores más extremos que en el caso anterior. La Figura 5.61 muestra como gran parte del flujo es desviado por los costados del último edificio. Por último, en la Figura 5.62, se aprecian zonas de concentración de flujo más grandes alrededor del último edificio en comparación con el caso anterior.

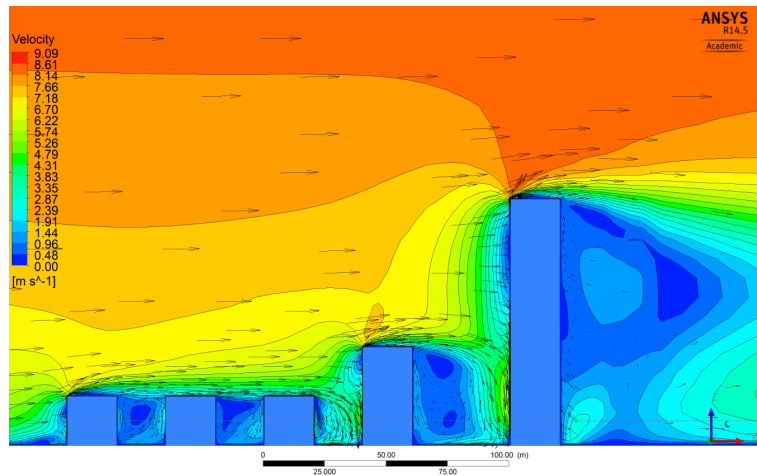


Figura 5.59: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 28: $a = 2$, $b = 2$, $c = 5$.

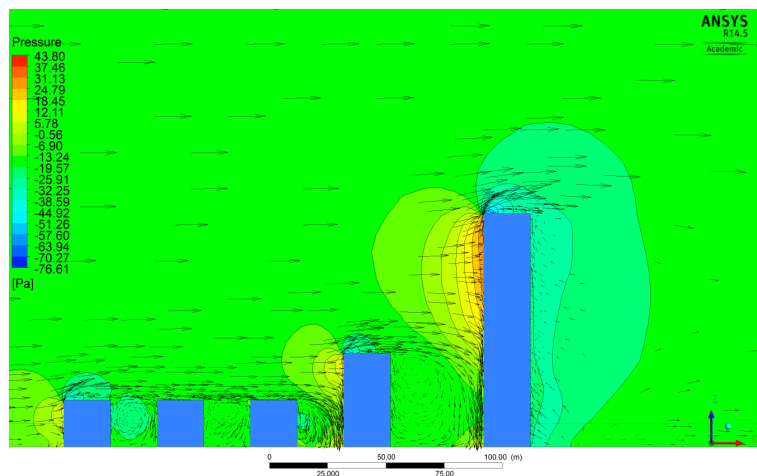


Figura 5.60: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 28: $a = 2$, $b = 2$, $c = 5$.

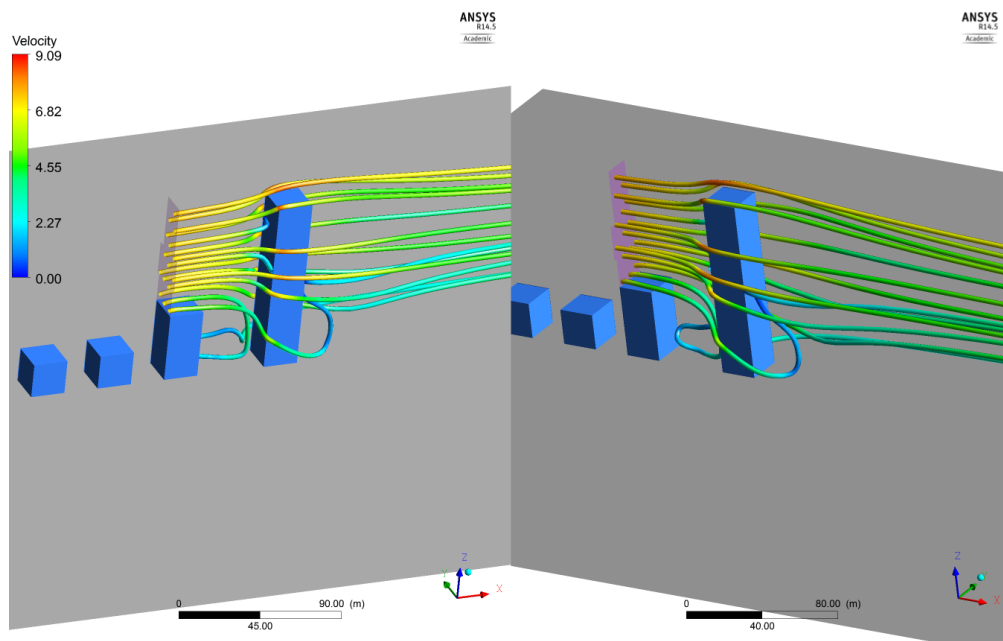


Figura 5.61: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 28: $a = 2$, $b = 2$, $c = 5$.

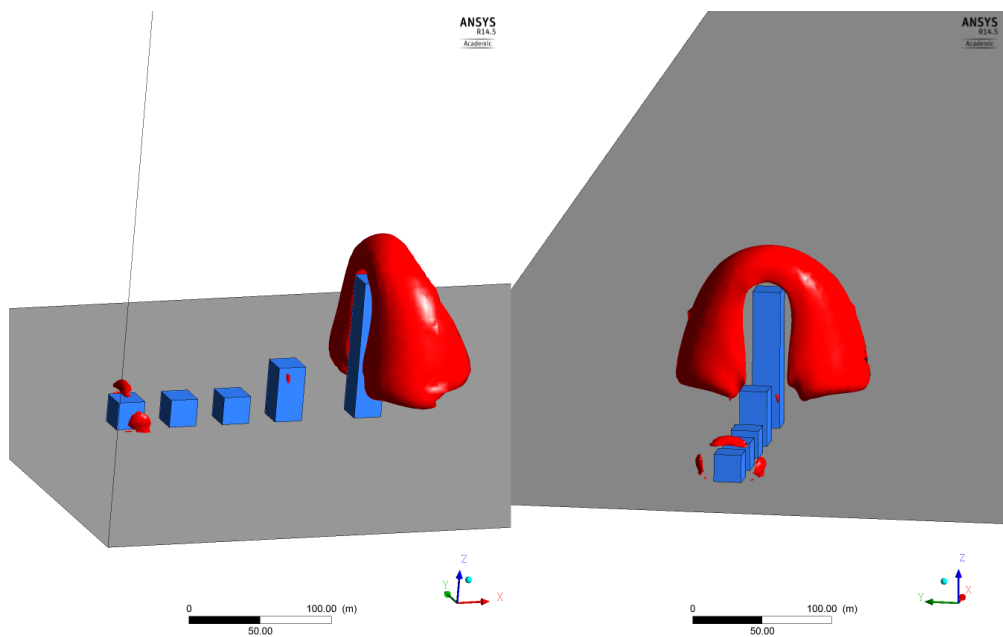


Figura 5.62: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 28: $a = 2$, $b = 2$, $c = 5$.

Caso 29: $a = 3$, $b = 0.5$, $c = 4$

En la Figura 5.63 se ve que el flujo se deflecta y se acelera al pasar sobre el primer, el cuarto y el último edificio (contando según crece el eje x). En la Figura 5.64 se aprecia como aumenta la presión en las caras donde golpea el flujo en el primer, cuarto y en el último edificio. Sobre estos, existen zonas de baja presión que coinciden con las regiones donde se acelera el flujo. La Figura 5.65 muestra como el flujo sobre el cuarto edificio se divide en cuatro corrientes, hacia el suelo, sobre y a ambos costados del edificio de interés. Por último, en la Figura 5.66 se destacan las zonas con la mayor aceleración de la componente en el eje x de la velocidad.

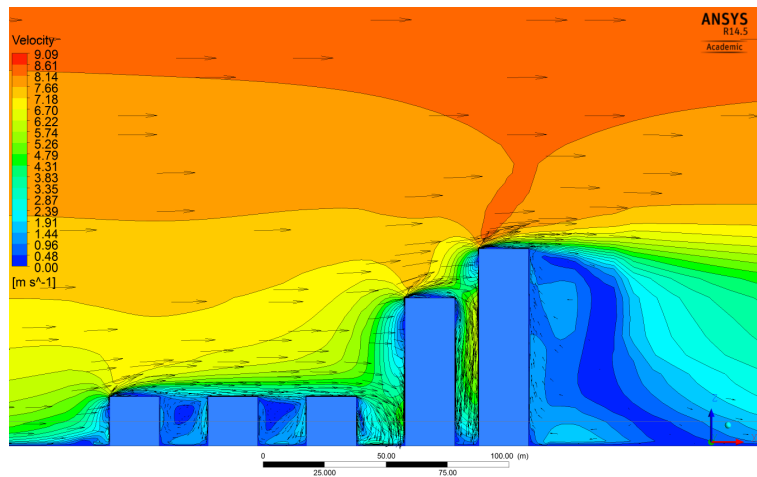


Figura 5.63: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 29: $a = 3$, $b = 0.5$, $c = 4$.

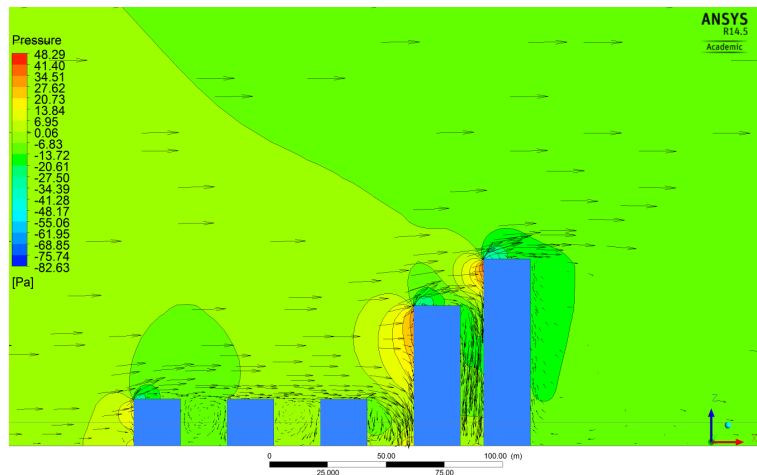


Figura 5.64: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 29: $a = 3$, $b = 0.5$, $c = 4$.

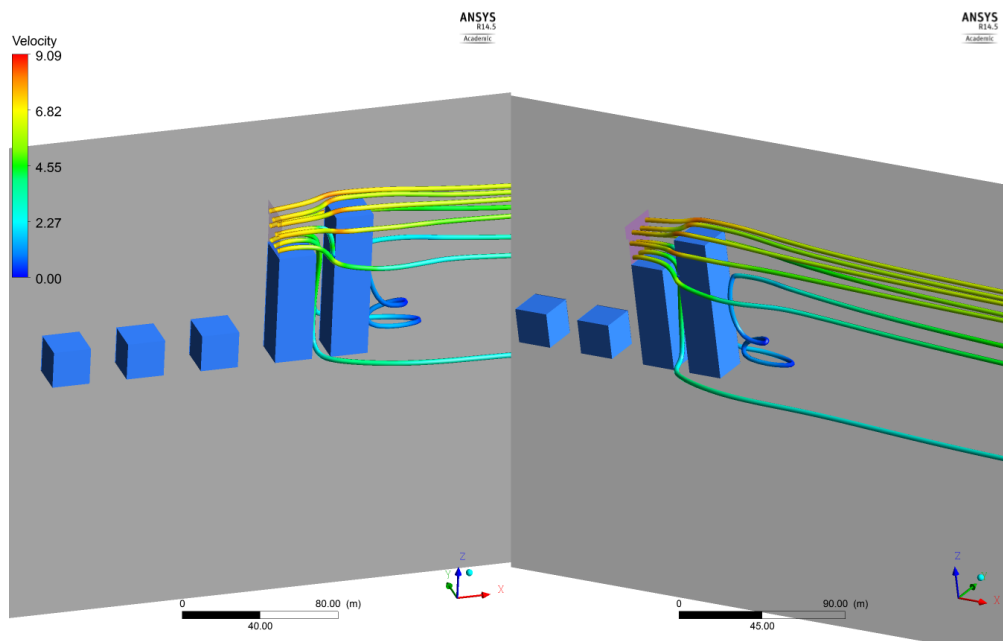


Figura 5.65: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 29: $a = 3$, $b = 0.5$, $c = 4$.

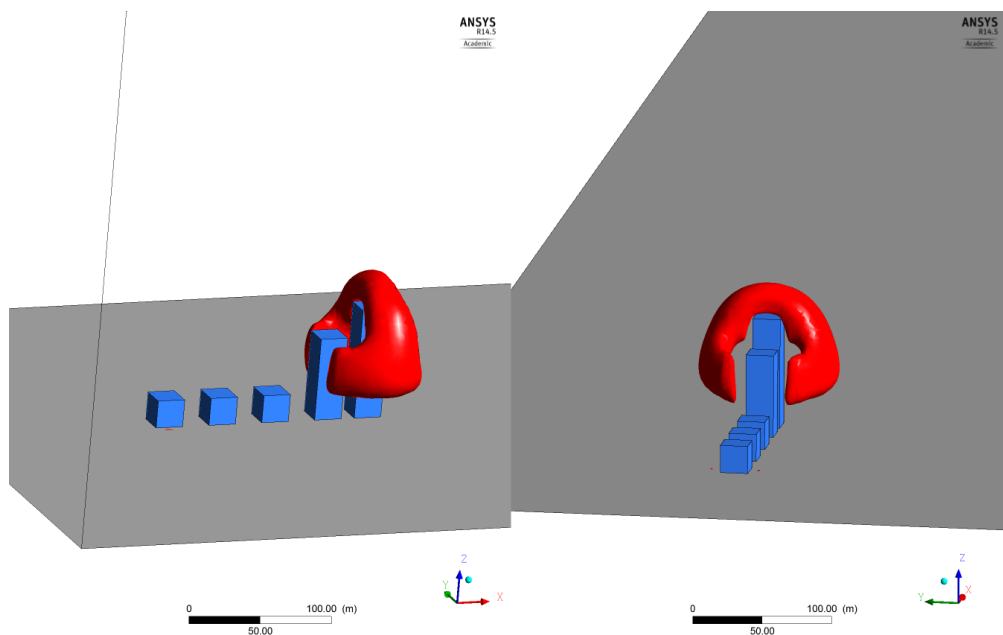


Figura 5.66: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 29: $a = 3$, $b = 0.5$, $c = 4$.

Caso 30: $a = 3$, $b = 0.5$, $c = 5$

En la Figura 5.67 se ve un comportamiento similar al del caso anterior. En la Figura 5.68 se aprecia que, las zonas de presión alta y baja sobre el último edificio abarcan más superficie y toman valores más extremos que en el caso anterior. La Figura 5.69 muestra como gran parte del flujo es desviado por los costados del último edificio. Por último, en la Figura 5.70, se aprecian zonas de concentración de flujo más grandes alrededor del último edificio en comparación con el caso anterior.

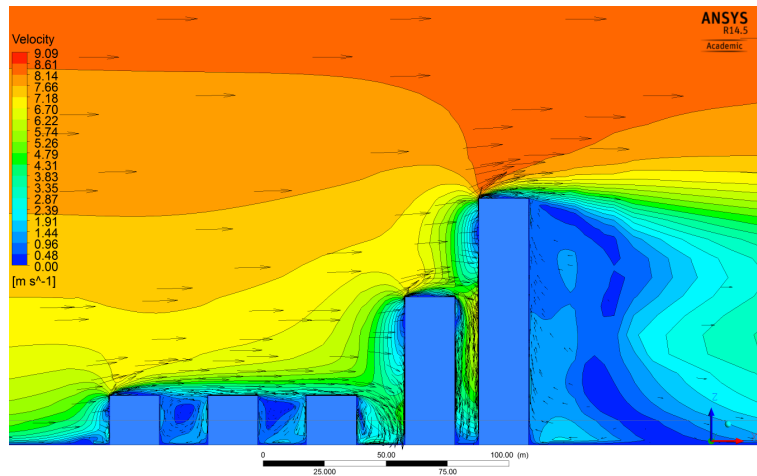


Figura 5.67: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 30: $a = 3$, $b = 0.5$, $c = 5$.

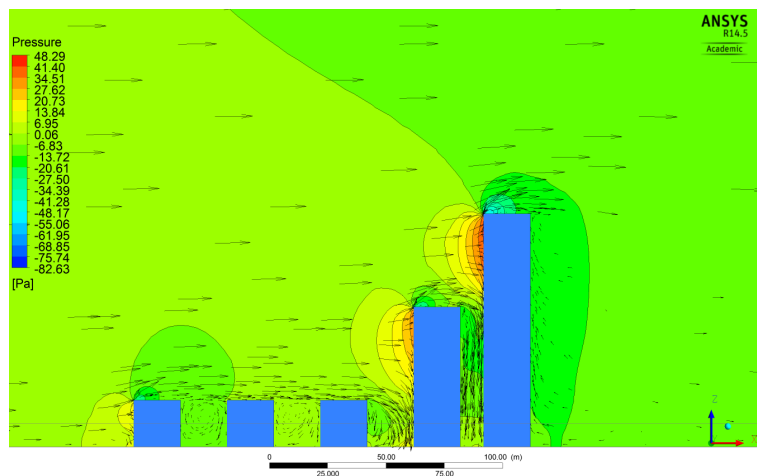


Figura 5.68: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 30: $a = 3$, $b = 0.5$, $c = 5$.

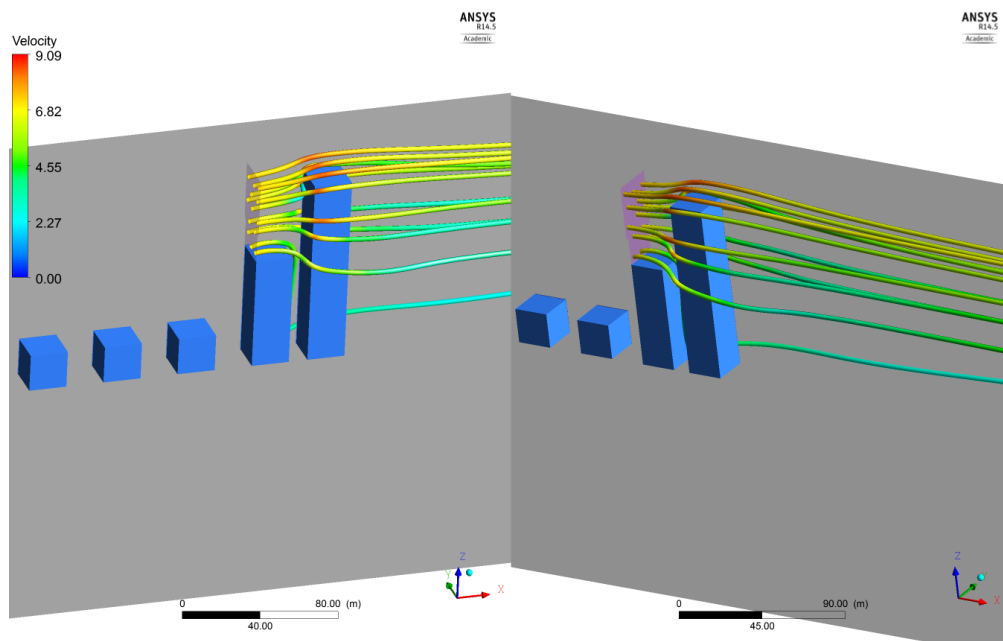


Figura 5.69: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 30: $a = 3$, $b = 0.5$, $c = 5$.

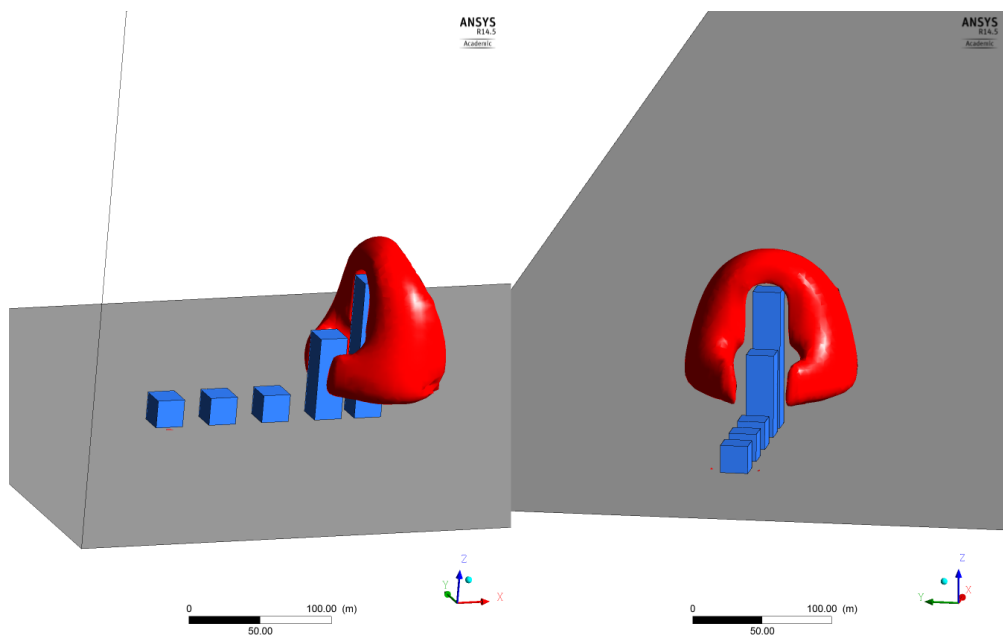


Figura 5.70: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 30: $a = 3$, $b = 0.5$, $c = 5$.

Caso 35 $a = 3, b = 2, c = 4$

En los contornos de velocidad (Figura 5.71), comparando con el caso 29, se muestra una mayor aceleración sobre el cuarto edificio en este caso. Además, la velocidad del flujo que desciende por la parte baja de la cara aguas arriba del último edificio es menor que en el caso 29. En la Figura 5.72 se aprecia que, el mínimo global para la presión relativa, es mayor que para los casos anteriores.

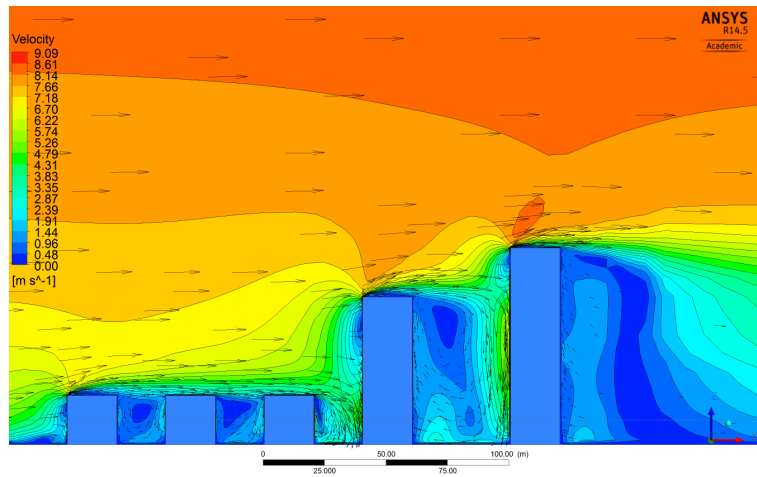


Figura 5.71: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 35: $a = 3, b = 2, c = 4$.

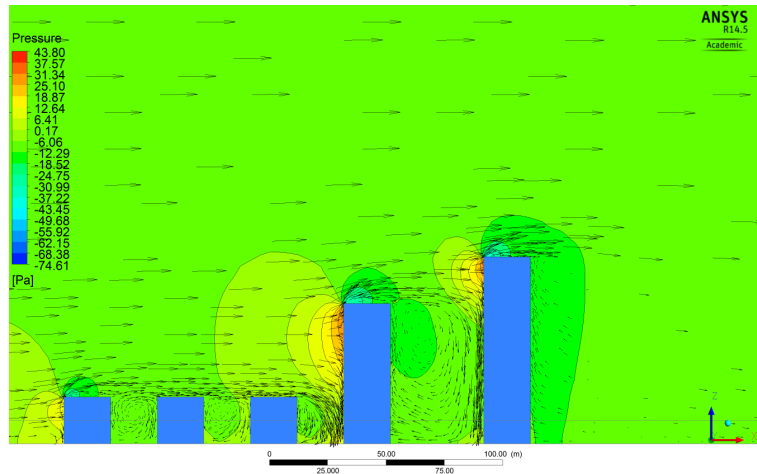


Figura 5.72: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 35: $a = 3, b = 2, c = 4$.

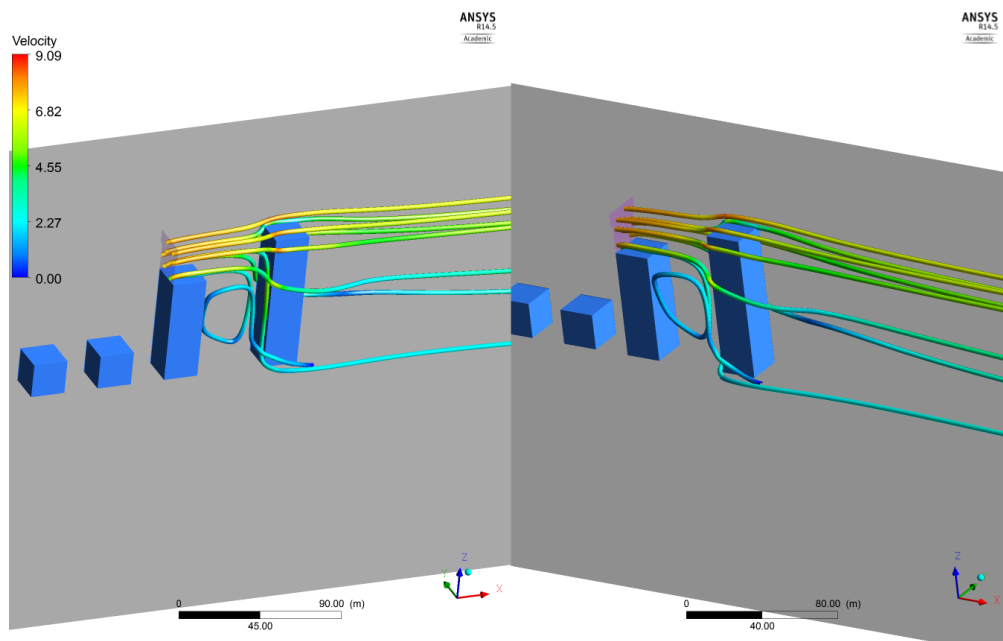


Figura 5.73: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 35: $a = 3$, $b = 2$, $c = 4$.

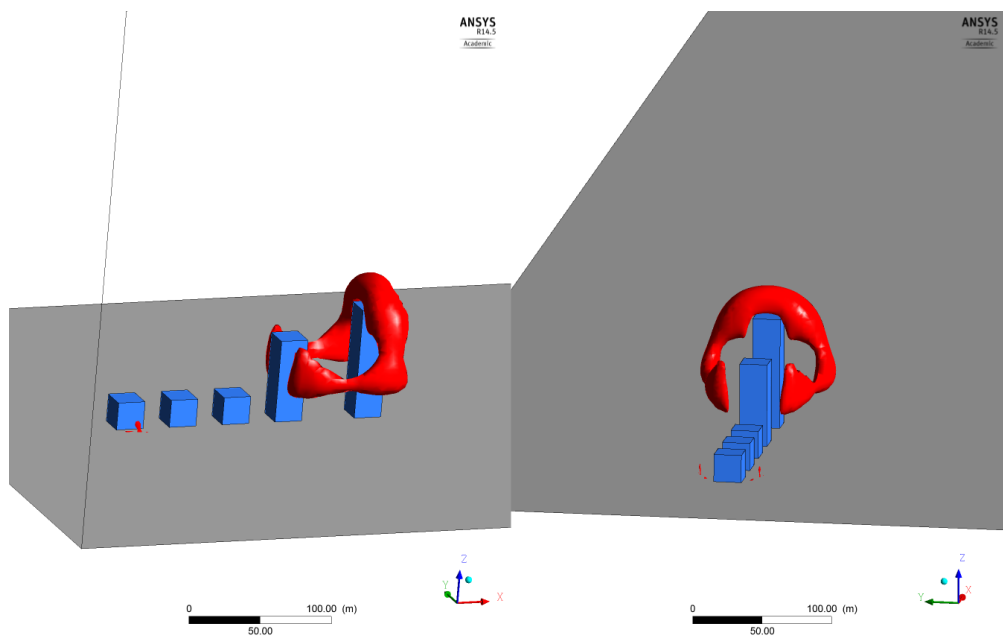


Figura 5.74: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 35: $a = 3$, $b = 2$, $c = 4$.

Caso 36: $a = 3$, $b = 2$, $c = 5$

En la Figura 5.75 se ve un comportamiento similar al del caso anterior. En la Figura 5.76 se aprecia que, las zonas de presión alta y baja sobre el último edificio abarcan más superficie y toman valores más extremos que en el caso anterior. La Figura 5.77 muestra como gran parte del flujo es desviado por los costados del último edificio. Por último, en la Figura 5.78, se aprecian zonas de concentración de flujo más grandes alrededor del último edificio en comparación con el caso anterior.

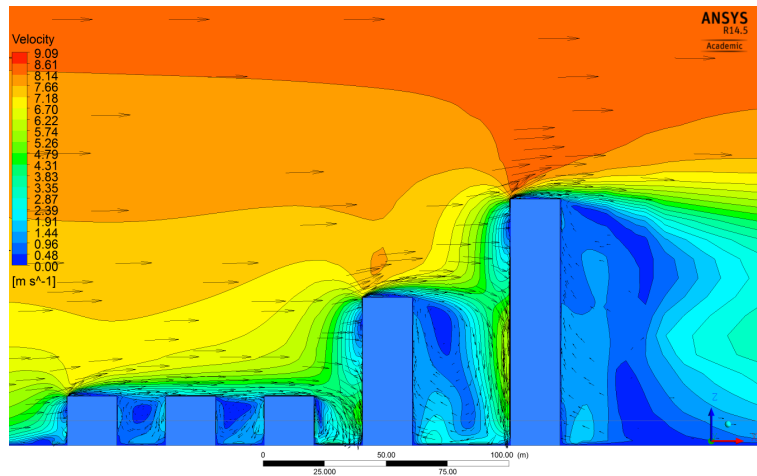


Figura 5.75: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 36: $a = 3$, $b = 2$, $c = 5$.

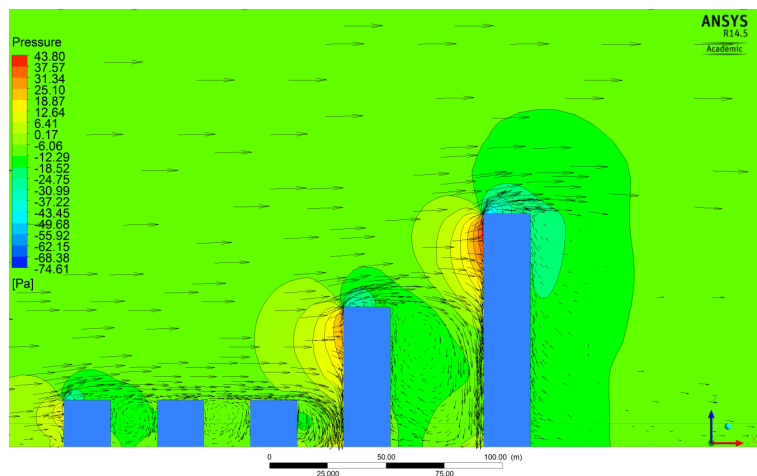


Figura 5.76: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 36: $a = 3$, $b = 2$, $c = 5$.

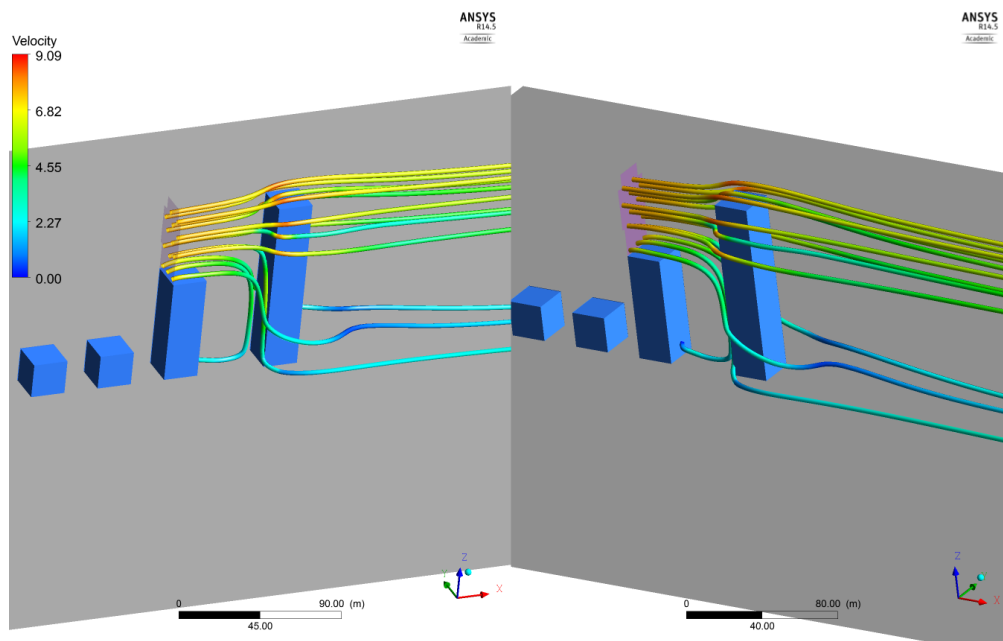


Figura 5.77: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 36: $a = 3$, $b = 2$, $c = 5$.

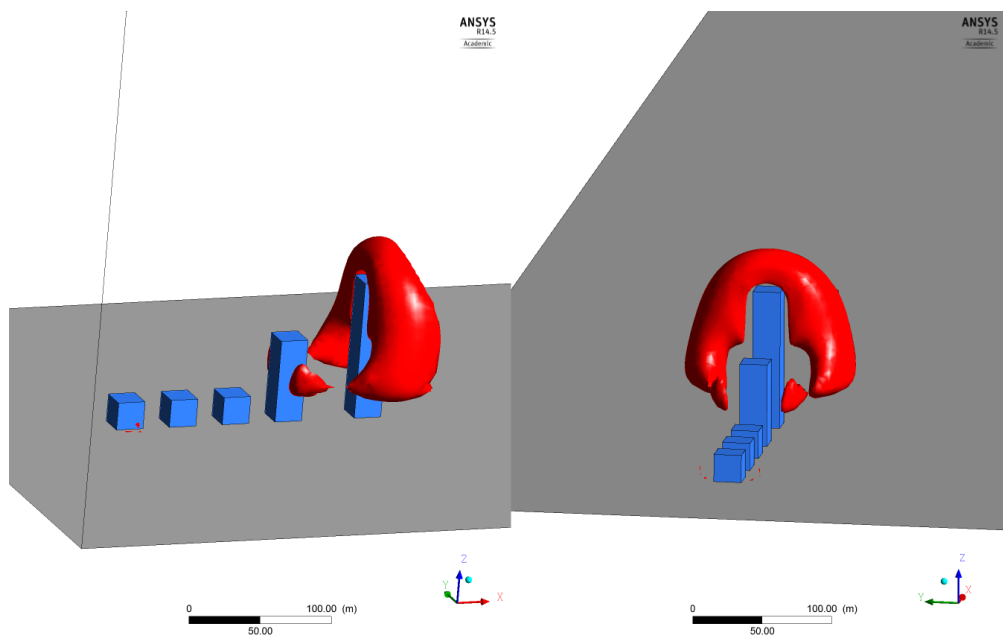


Figura 5.78: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 36: $a = 3$, $b = 2$, $c = 5$.

Caso 37: $a = 4$, $b = 0.5$, $c = 5$

En la Figura 5.79 se ve que el flujo se deflecta y se acelera al pasar sobre el primer, el cuarto y el último edificio (contando según crece el eje x). En la Figura 5.80 se aprecia como aumenta la presión en las caras donde golpea el flujo en el primer, cuarto y en el último edificio. Sobre estos, existen zonas de baja presión que coinciden con las regiones donde se acelera el flujo. La Figura 5.81 muestra como el flujo sobre el cuarto edificio se divide en cuatro corrientes, hacia el suelo, sobre y a ambos costados del edificio de interés. Por último, en la Figura 5.82 se destacan las zonas con la mayor aceleración de la componente en el eje x de la velocidad.

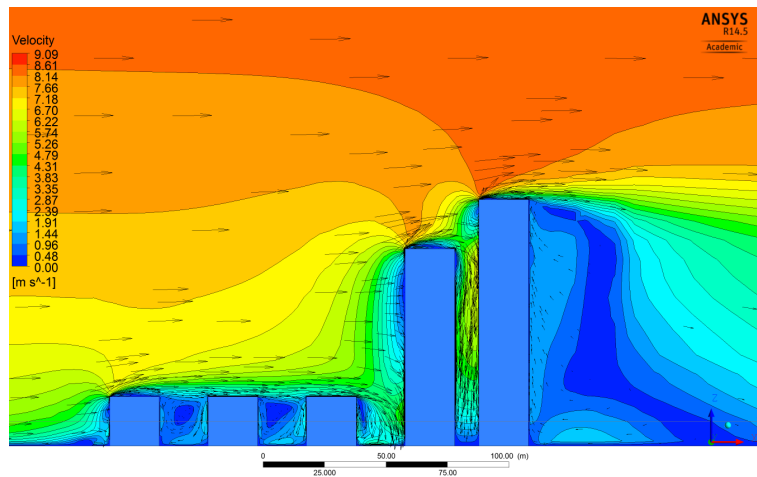


Figura 5.79: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 37: $a = 4$, $b = 0.5$, $c = 5$.

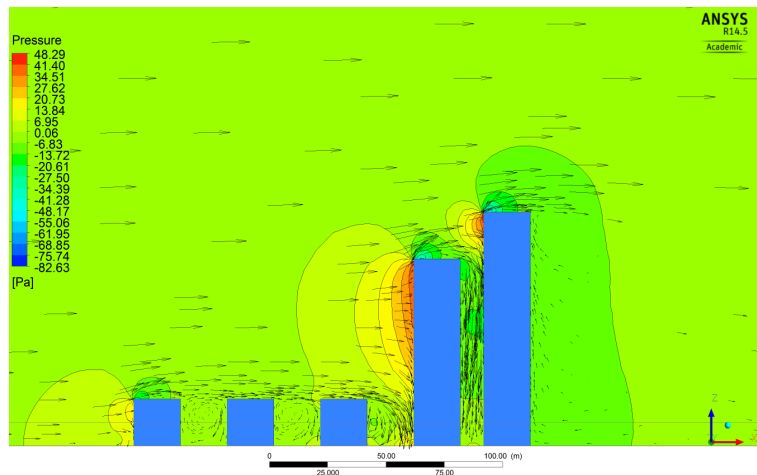


Figura 5.80: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 37: $a = 4$, $b = 0.5$, $c = 5$.

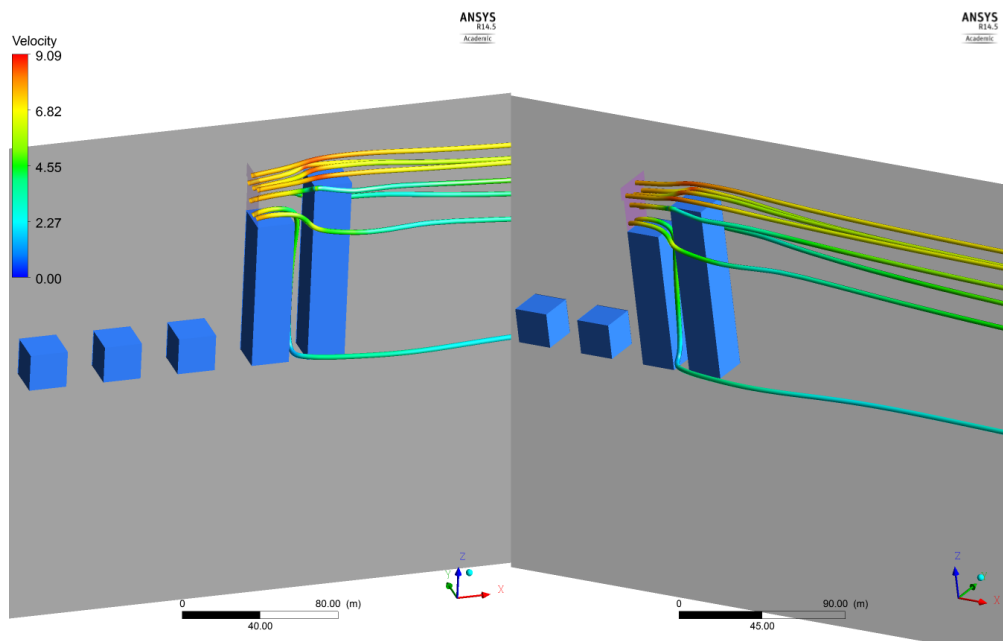


Figura 5.81: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 37: $a = 4$, $b = 0.5$, $c = 5$.

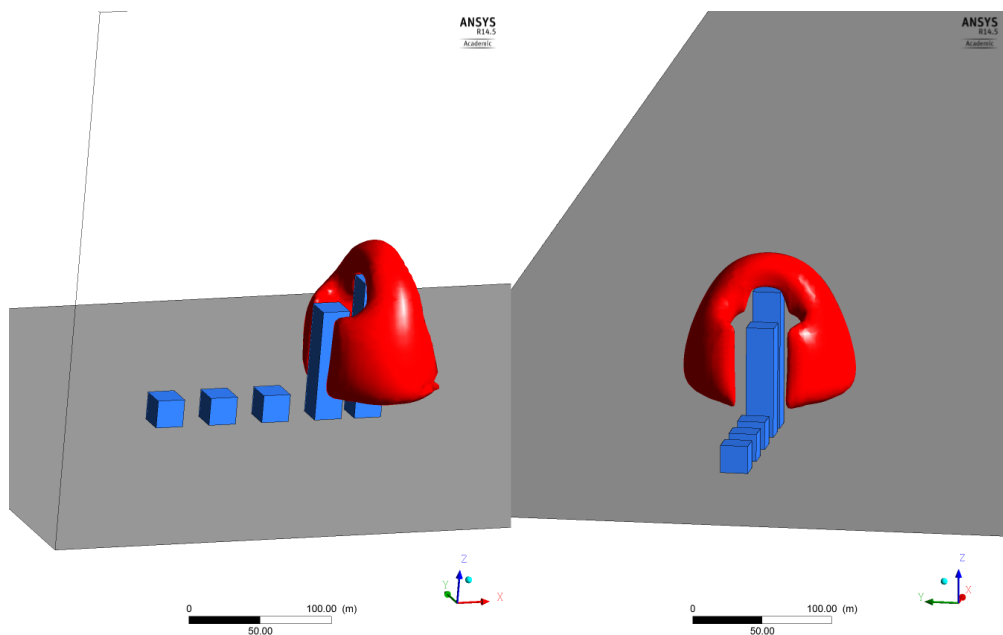


Figura 5.82: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 37: $a = 4$, $b = 0.5$, $c = 5$.

Caso 40: $a = 4$, $b = 2$, $c = 5$

En los contornos de velocidad (Figura 5.83), comparando con el caso 37, se puede ver una mayor aceleración sobre el cuarto edificio en este caso. Además, la velocidad del flujo que desciende por la parte baja de la cara aguas arriba del último edificio es menor que en el caso 37. En la Figura 5.84 se aprecia que, el mínimo global para la presión relativa, es mayor que para los casos anteriores.

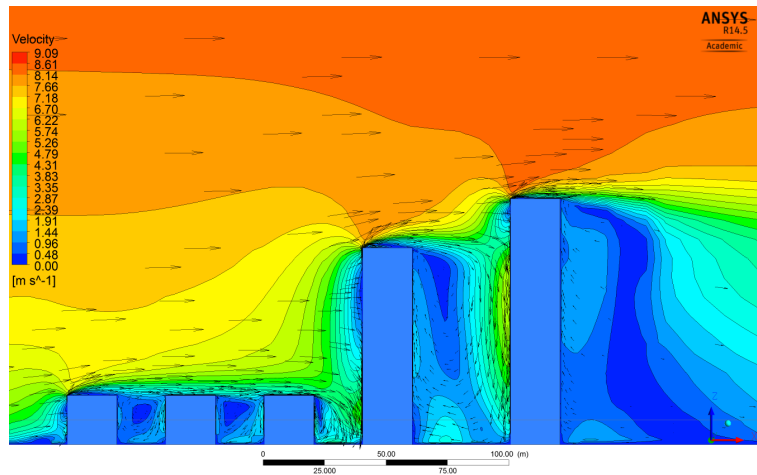


Figura 5.83: Contornos de magnitud de velocidad en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 40: $a = 4$, $b = 2$, $c = 5$.

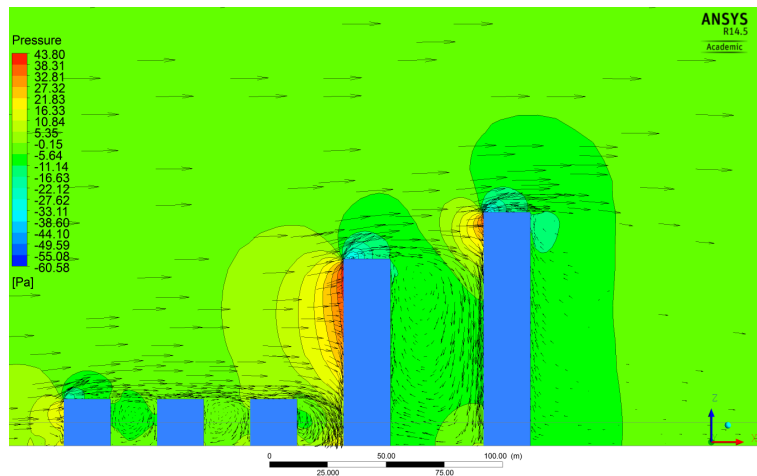


Figura 5.84: Contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Vectores de velocidad superpuestos, caso 40: $a = 4$, $b = 2$, $c = 5$.

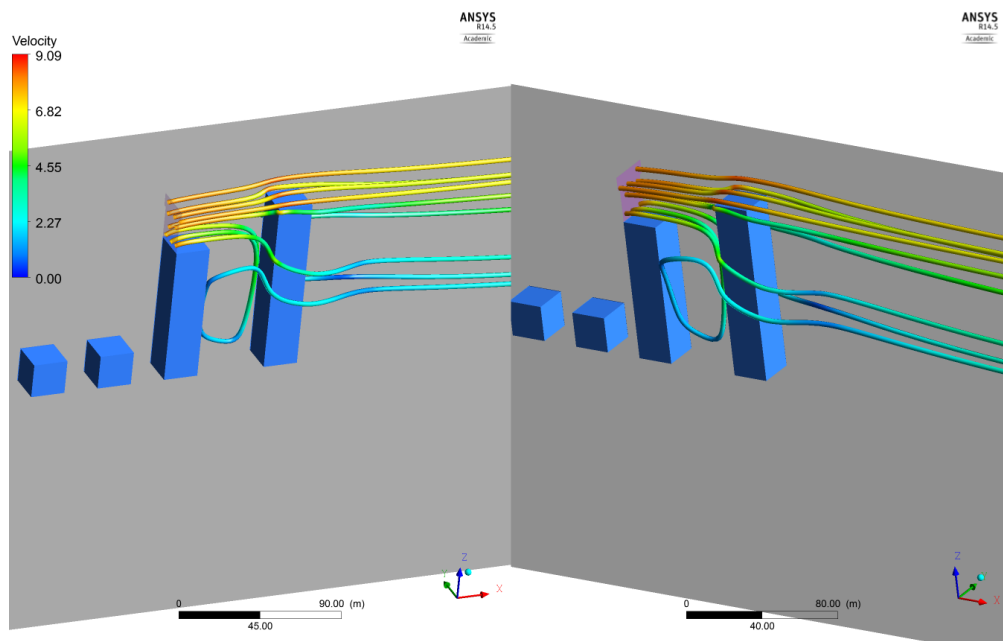


Figura 5.85: Líneas de corriente sobre el edificio de interés, liberadas desde un plano encima del edificio aguas arriba. Colores según magnitud de velocidad, caso 40: $a = 4$, $b = 2$, $c = 5$.

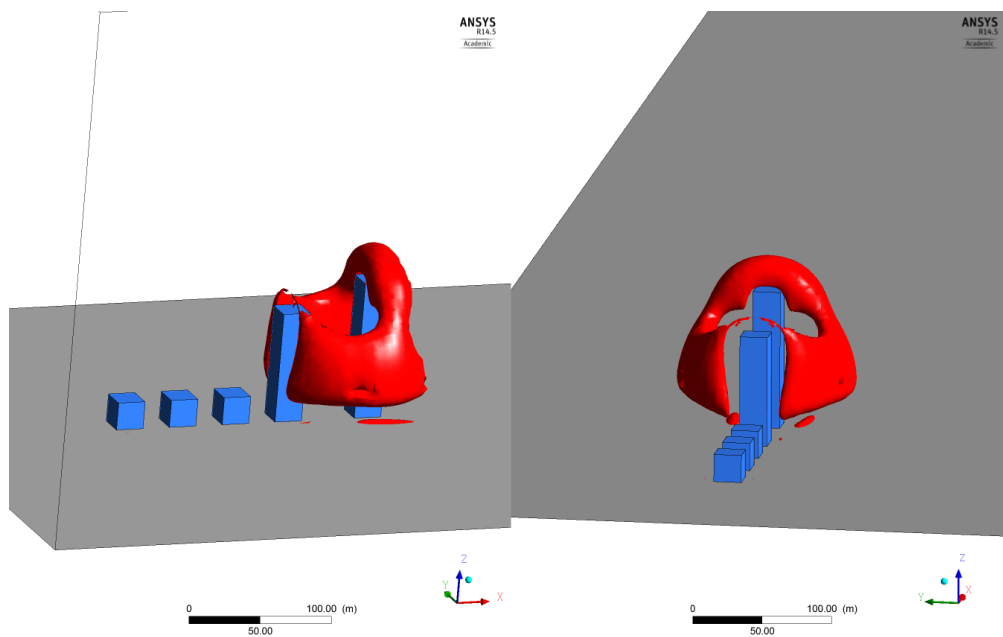


Figura 5.86: Iso-superficies de $C_f = 1.05$, caso 40: $a = 4$, $b = 2$, $c = 5$.

5.1.5. Análisis de Resultados

En esta sección se resume y analiza los resultados correspondientes a las simulaciones de dinámica de fluidos computacional. Primero se realiza un estudio de sensibilidad de malla, se verifica que se cumpla la homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica en un dominio vacío y se validan los resultados del CFD. Estas etapas permiten tener una solución numérica aceptable como representación del fenómeno físico real. Posteriormente se detallan los resultados para los 20 casos más relevantes ($b = 0.5$ y $b = 2$). Para todos estos se presentan contornos, vectores de velocidad y contornos de presión relativa en el plano de simetría del dominio. Además se muestran iso-superficies del factor de concentración $C_f = 1.05$ y líneas de corriente alrededor del edificio de interés.

En los contornos y vectores de velocidad se puede observar, claramente que el flujo se deflece y se acelera al encontrarse con los edificios. En los contornos de presión relativa se aprecia que aumenta la presión en las caras donde golpea el flujo y que existen zonas de baja presión sobre los edificios que coinciden con las regiones donde se acelera el flujo. Las líneas de corriente muestran como el flujo al encontrarse con el edificio de interés se divide en cuatro direcciones, hacia el suelo, sobre y a ambos costados de este. En las iso-superficies se destacan las zonas con la mayor aceleración de la componente en el eje x de la velocidad.

Se puede notar que el flujo presenta un comportamiento distinto al encontrarse con, un edificio cuya altura es mayor que la de los obstáculos aguas arriba (descubierto), que con uno cuya altura es igual (cubierto). Se aprecia en los contornos de velocidad que luego de la interacción con el primer edificio, los edificios siguientes, que se encuentran cubiertos, se comportan como si fueran un solo obstáculo. Este obstáculo actúa como un placa plana, el flujo se mantiene horizontal y se forma una capa límite. Sobre los edificios descubiertos existe separación del flujo comenzando en el borde aguas arriba, el aire se acelera y es deflectado cierto ángulo con respecto a la horizontal. En los resultados se aprecia que, cuando el edificio de interés presenta un menor grado de cobertura ($c \gg a$), las zonas del flujo con aceleración horizontal abarcan un volumen más grande del espacio. Bajo esta misma condición, se puede ver que, mientras más descubierto está el edificio, más grande es el ángulo de deflexión del flujo. Esto se explica porque las zonas de alta presión abarcan un área mucho mayor sobre la cara aguas arriba de un edificio que supera en altura a su entorno. Esto implica que la altura del punto de estancamiento como fracción de la altura total del edificio, es mayor si el edificio está más cubierto (zonas de alta presión concentradas en la parte superior de la fachada).

Por último, se observa el efecto de la separación b . Mientras más descubierto se encuentra el edificio de interés, mayor es el aumento de presión sobre su cara de aproximación del flujo. Esto provoca un campo de alta presión que disminuye la velocidad del aire. Si este campo de presión se encuentra más alejado del cuarto edificio, es decir, si b aumenta, la aceleración sobre este edificio será mayor.

5.2. Comportamiento del Factor de Concentración

En esta sección se hace un análisis de los datos exportados a partir de las soluciones de las simulaciones CFD. Usando el software comercial *Wolfram Mathematica 8.0* se estudia el comportamiento del factor de concentración C_f en el volumen exportado sobre el edificio de interés para los diferentes experimentos. Para esto se realizan gráficos de contornos de C_f en los planos YZ , ZX y XY para diferentes cortes en x , en y y en z respectivamente. Como el parámetro con menos influencia en los resultados es la separación entre edificios b , solo se muestran los gráficos en los casos con los valores extremos para este parámetro $b = 0.5$ y $b = 2$. Posteriormente, se calculan los valores máximos de C_f en cortes del espacio para diferentes valores de y , se analiza el comportamiento global de C_{fMax} y la influencia de los parámetros de la configuración urbana a , b , c . También se relaciona esto con las discusiones cualitativas explicitadas en la sección anterior.

5.2.1. Detalle de Resultados por Caso

Utilizando *Wolfram Mathematica 8.0* se interpolan en el espacio los resultados del CFD para cada uno de los 20 casos más relevantes ($b = 0.5$, $b = 2$). Se grafican contornos de C_f con escala de colores, en el plano YZ para valores de x entre 0 y 1 con un espaciado de 0.25, en el plano ZX para y entre 0 y 0.5 con espaciado de 0.125 (solución es simétrica con respecto al plano $y = 0$), y en el plano XY para z entre 0 y 1 con un espaciado de 0.25. Se analiza el comportamiento de estos contornos y se discuten sus variaciones entre casos.

Caso 1: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 2$

La primera columna de la Figura 5.87 presenta contornos de C_f en el plano YZ . Estos forman bandas de C_f que varían con la altura z y se curvan hacia abajo al alejarse de $y = 0$ donde son más delgadas. En estos planos también se puede apreciar que a medida que se avanza en el eje x , el flujo varía cada vez menos. La segunda columna muestra los contornos en planos ZX . Las estructuras formadas asemejan elipses inclinadas una dentro de otra, donde C_f decae al alejarse de la elipse más pequeña. Se ve que se cumple la condición de no deslizamiento en el tejado del edificio $z = 0$, donde C_f cae a 0. Esto sucede más rápido hacia los costados del edificio $y = \pm 0.5$. En la tercera columna (plano XY) se aprecian bandas de C_f que cruzan según el eje y , estas se curvan en la dirección aguas arriba al acercarse a los costados del edificio.

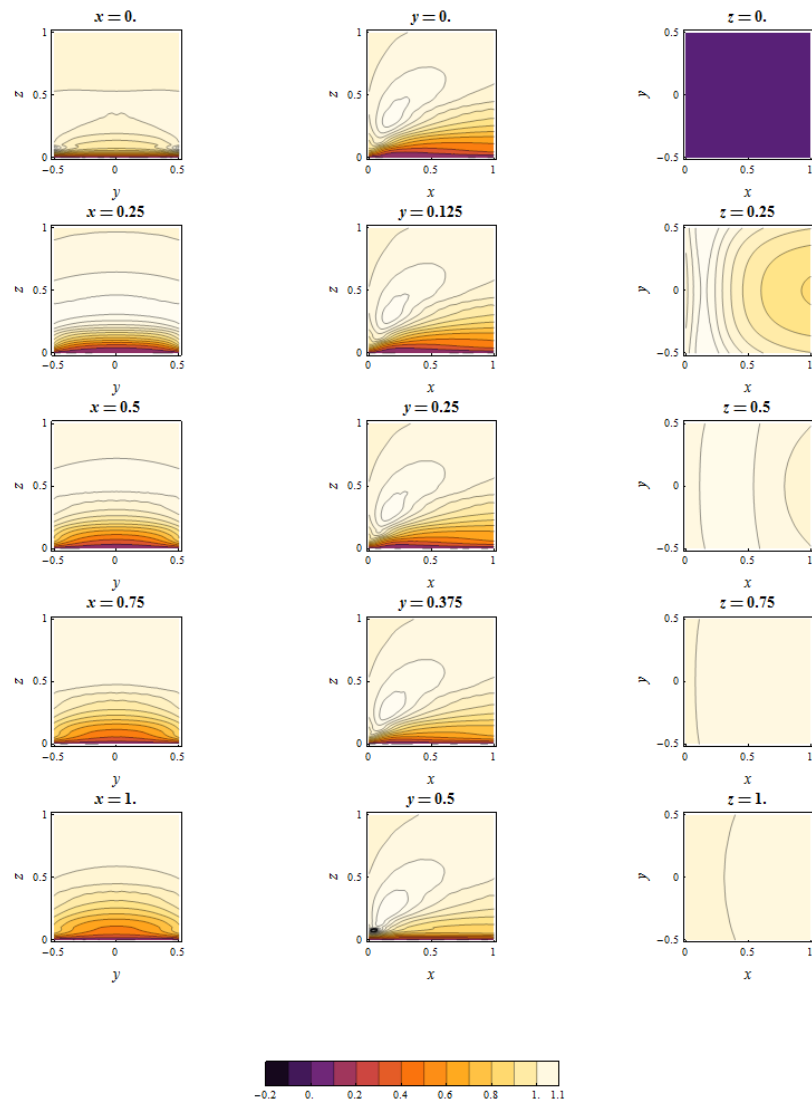


Figura 5.87: Contornos de factor de concentración por planos, caso 1: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 2$.

Caso 2: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 3$

En la Figura 5.88, en la primera columna se observan valores más altos de C_f hacia los costados del edificio $y = \pm 0.5$. En la segunda columna se puede ver una zona donde el factor de concentración es negativo, esto significa que la componente de la velocidad según el eje x es $u < 0$. Esta región describe una recirculación del flujo y muestra una altura y largo máximos en $y = 0$. Comparado con el caso anterior, las estructuras elípticas son más grandes para este caso, los colores sugieren que se alcanzan menores valores de C_f pero con variaciones menos bruscas. En la tercera columna se aprecia que aparecen contornos, para valores bajos de x , cuya curvatura es en la dirección aguas abajo al alejarse de $y = 0$.

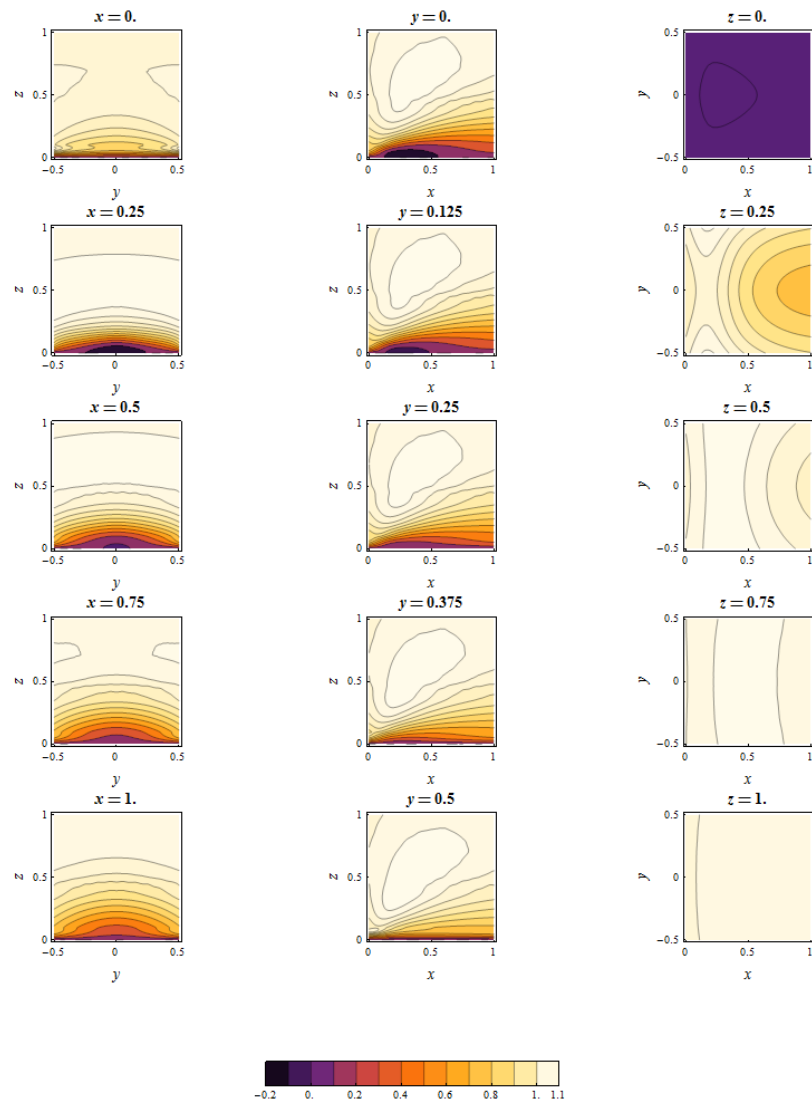


Figura 5.88: Contornos de factor de concentración por planos, caso 2: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 3$.

Caso 3: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 4$

En la Figura 5.89, en la primera columna se observan valores más altos de C_f hacia los costados del edificio $y = \pm 0.5$. En la segunda columna se puede ver que la zona de recirculación del flujo es más grande en este caso que en el anterior. Las estructuras elípticas son más grandes comparado con el caso anterior, los colores sugieren que se alcanzan menores valores de C_f pero con variaciones menos bruscas. En la tercera columna se aprecia que aparecen contornos, para valores bajos de x , cuya curvatura es en la dirección aguas abajo al alejarse de $y = 0$, de igual manera que para el caso anterior.

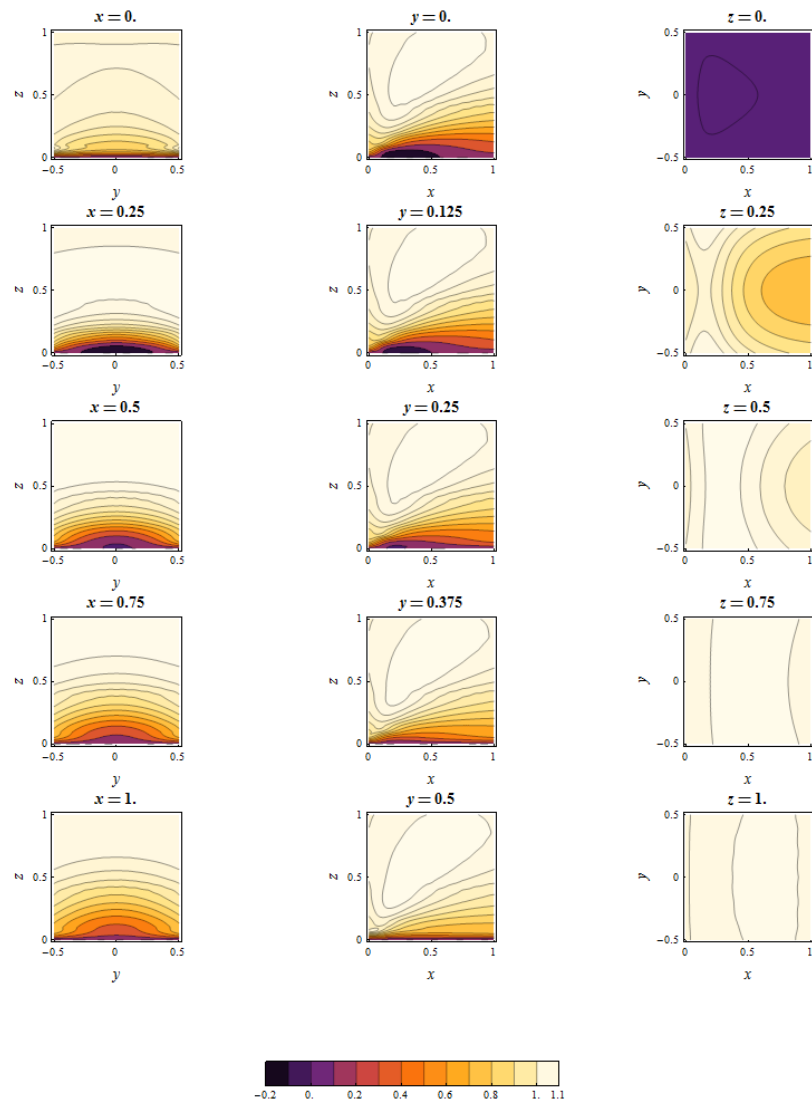


Figura 5.89: Contornos de factor de concentración por planos, caso 3: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 4$.

Caso 4: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 5$

En la Figura 5.90, en la primera columna se observan valores más altos de C_f hacia los costados del edificio $y = \pm 0.5$. En la segunda columna se puede ver que la zona de recirculación del flujo es más grande en este caso que en el anterior. Las estructuras elípticas son más grandes comparado con el caso anterior, los colores sugieren que se alcanzan menores valores de C_f pero con variaciones menos bruscas. En la tercera columna se aprecia que aparecen contornos, para valores bajos de x , cuya curvatura es en la dirección aguas abajo al alejarse de $y = 0$, de igual manera que para el caso anterior.

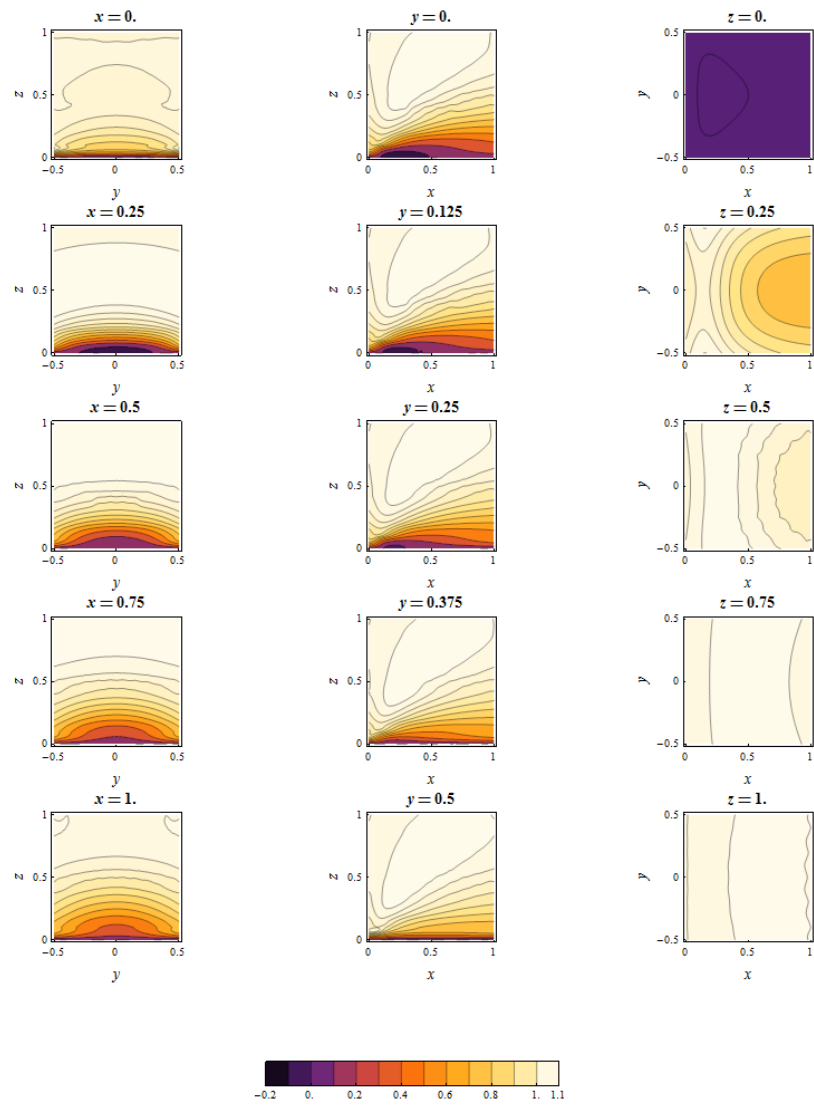


Figura 5.90: Contornos de factor de concentración por planos, caso 4: $a = 1$, $b = 0.5$, $c = 5$.

Caso 13: $a = 1$, $b = 2$, $c = 2$

En la Figura 5.91 se aprecia que la variabilidad del factor de concentración C_f en el espacio es mucho mayor que para el caso 1, ver Figura 5.87. La escala de colores también indica que se alcanzan valores mayores de C_f con una mayor separación entre edificios b para las mismas alturas de edificios a , c .

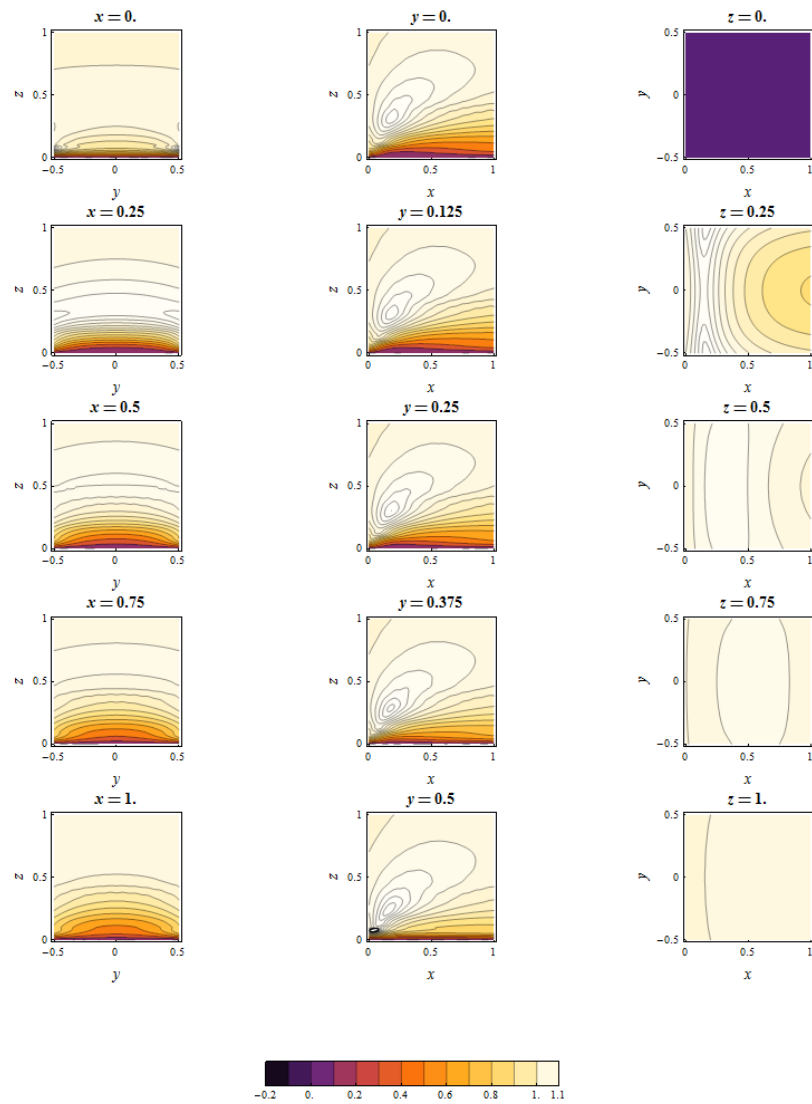


Figura 5.91: Contornos de factor de concentración por planos, caso 13: $a = 1$, $b = 2$, $c = 2$.

Caso 14: $a = 1$, $b = 2$, $c = 3$

En la Figura 5.92, en la primera columna se observan valores más altos de C_f hacia los costados del edificio $y = \pm 0.5$. En la segunda columna se puede ver que la zona de recirculación del flujo es más grande en este caso que en el anterior. Las estructuras elípticas son más grandes comparado con el caso anterior, los colores sugieren que se alcanzan menores valores de C_f pero con variaciones menos bruscas. En la tercera columna se aprecia que aparecen contornos, para valores bajos de x , cuya curvatura es en la dirección aguas abajo al alejarse de $y = 0$, de igual manera que para el caso anterior.

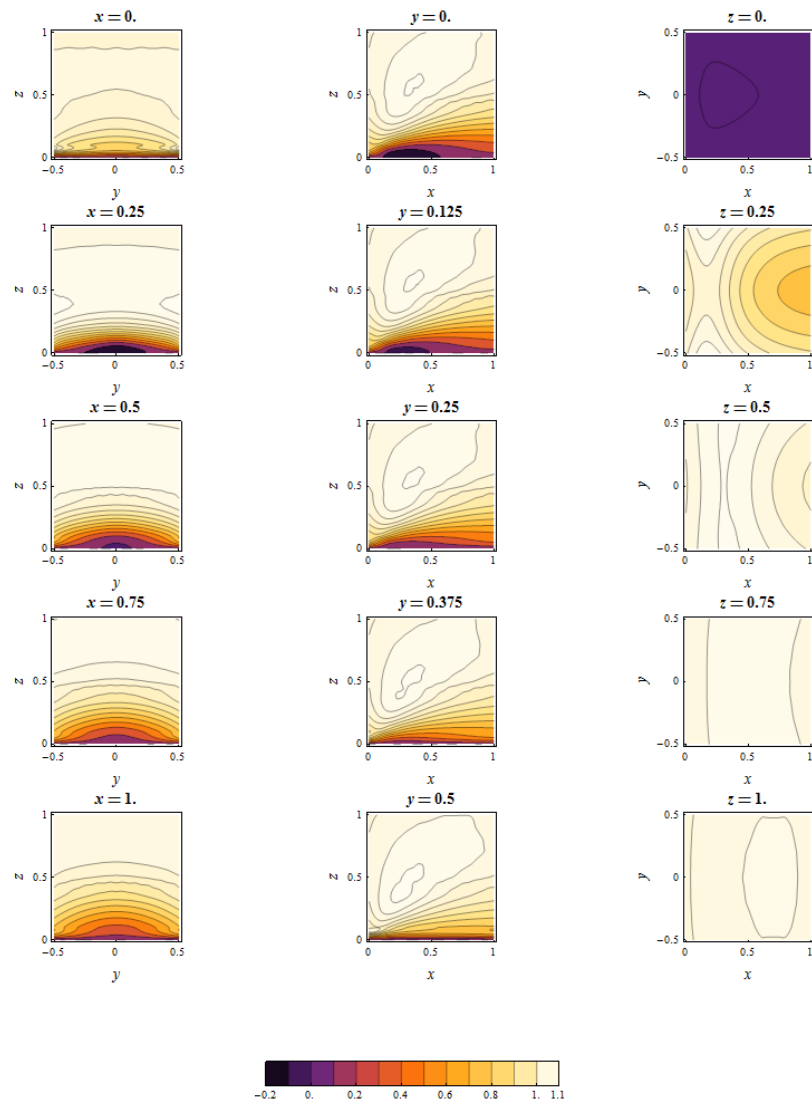


Figura 5.92: Contornos de factor de concentración por planos, caso 14: $a = 1$, $b = 2$, $c = 3$.

Caso 15: $a = 1$, $b = 2$, $c = 4$

En la Figura 5.93, en la primera columna se observan valores más altos de C_f hacia los costados del edificio $y = \pm 0.5$. En la segunda columna se puede ver que la zona de recirculación del flujo es más grande en este caso que en el anterior. Las estructuras elípticas son más grandes comparado con el caso anterior, los colores sugieren que se alcanzan menores valores de C_f pero con variaciones menos bruscas. En la tercera columna se aprecia que aparecen contornos, para valores bajos de x , cuya curvatura es en la dirección aguas abajo al alejarse de $y = 0$, de igual manera que para el caso anterior.

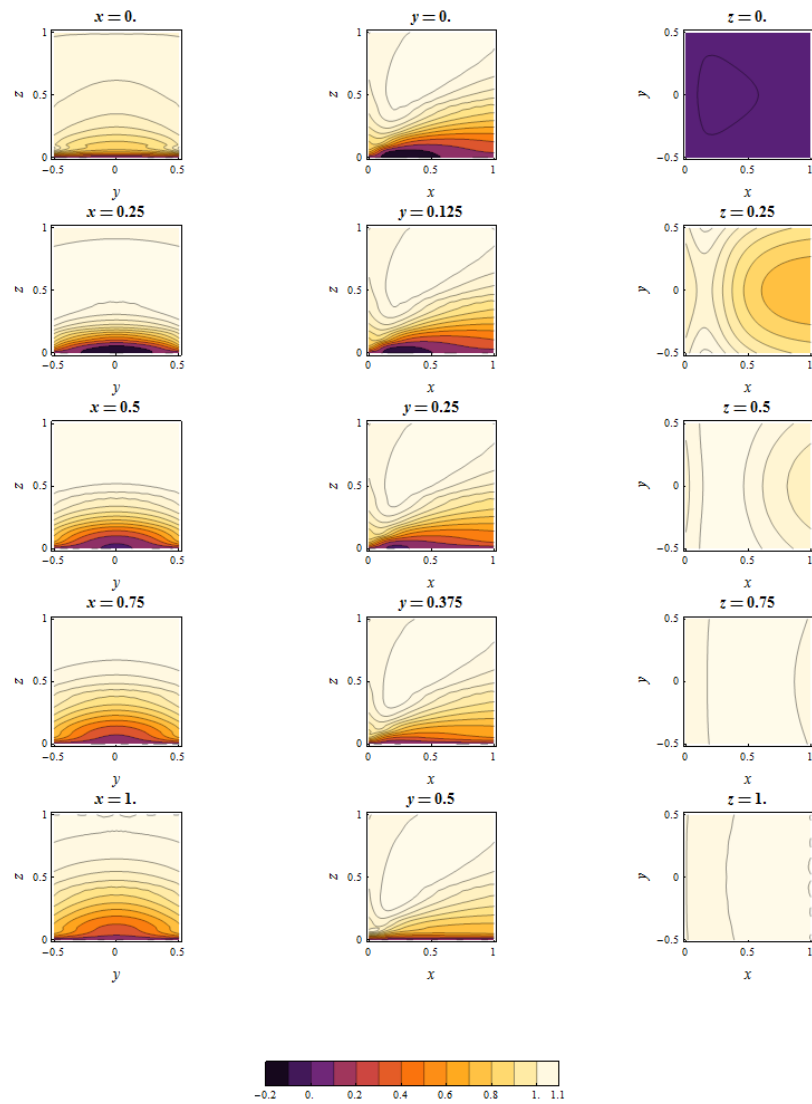


Figura 5.93: Contornos de factor de concentración por planos, caso 15: $a = 1$, $b = 2$, $c = 4$.

Caso 16: $a = 1$, $b = 2$, $c = 5$

En la Figura 5.94, en la primera columna se observan valores más altos de C_f hacia los costados del edificio $y = \pm 0.5$. En la segunda columna se puede ver que la zona de recirculación del flujo es más grande en este caso que en el anterior. Las estructuras elípticas son más grandes comparado con el caso anterior, los colores sugieren que se alcanzan menores valores de C_f pero con variaciones menos bruscas. En la tercera columna se aprecia que aparecen contornos, para valores bajos de x , cuya curvatura es en la dirección aguas abajo al alejarse de $y = 0$, de igual manera que para el caso anterior.

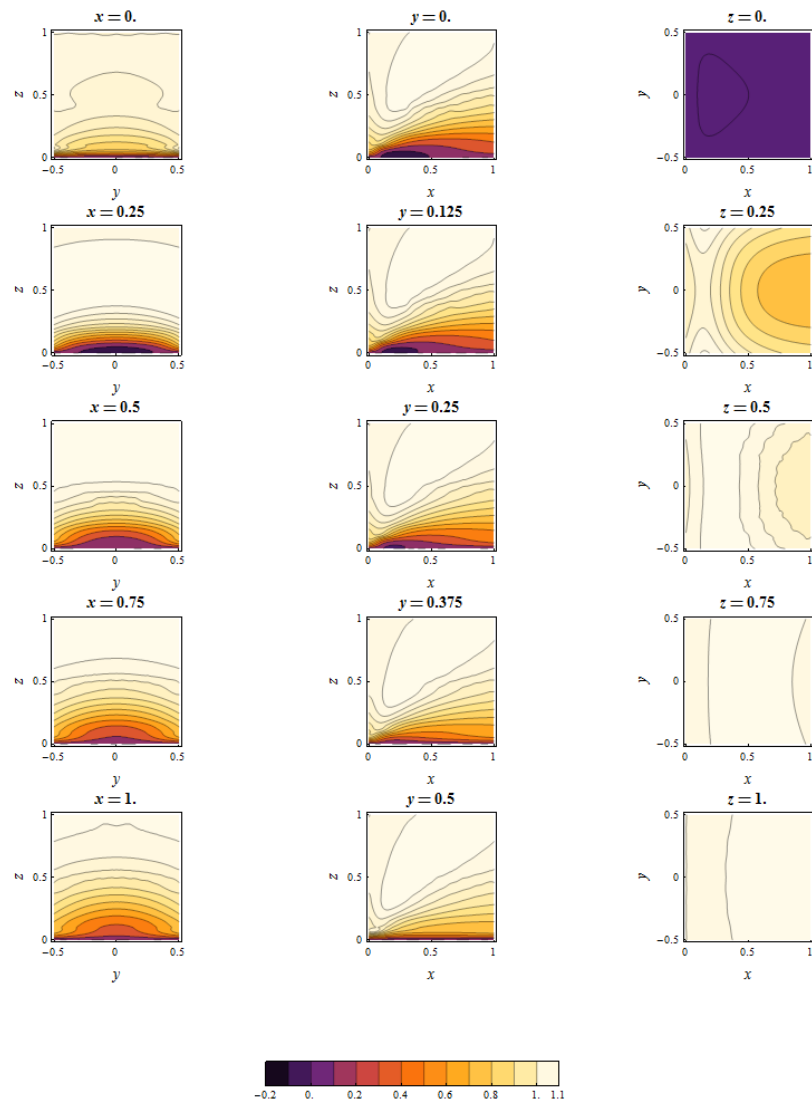


Figura 5.94: Contornos de factor de concentración por planos, caso 16: $a = 1$, $b = 2$, $c = 5$.

Caso 17: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 3$

La primera columna de la Figura 5.95 presenta contornos de C_f en el plano YZ . Estos forman bandas de C_f que varían con la altura z y se curvan hacia abajo al alejarse de $y = 0$ donde son más delgadas. En estos planos también se puede apreciar que a medida que se avanza en el eje x , el flujo varía cada vez menos. La segunda columna muestra los contornos en planos ZX . Las estructuras formadas asemejan elipses inclinadas una dentro de otra, donde C_f decae al alejarse de la elipse más pequeña. Se ve que se cumple la condición de no deslizamiento en el tejado del edificio $z = 0$, donde C_f cae a 0. Esto sucede más rápido hacia los costados del edificio $y = \pm 0.5$. En la tercera columna (plano XY) se aprecian bandas de C_f que cruzan según el eje y , estas se curvan en la dirección

aguas arriba al acercarse a los costados del edificio.

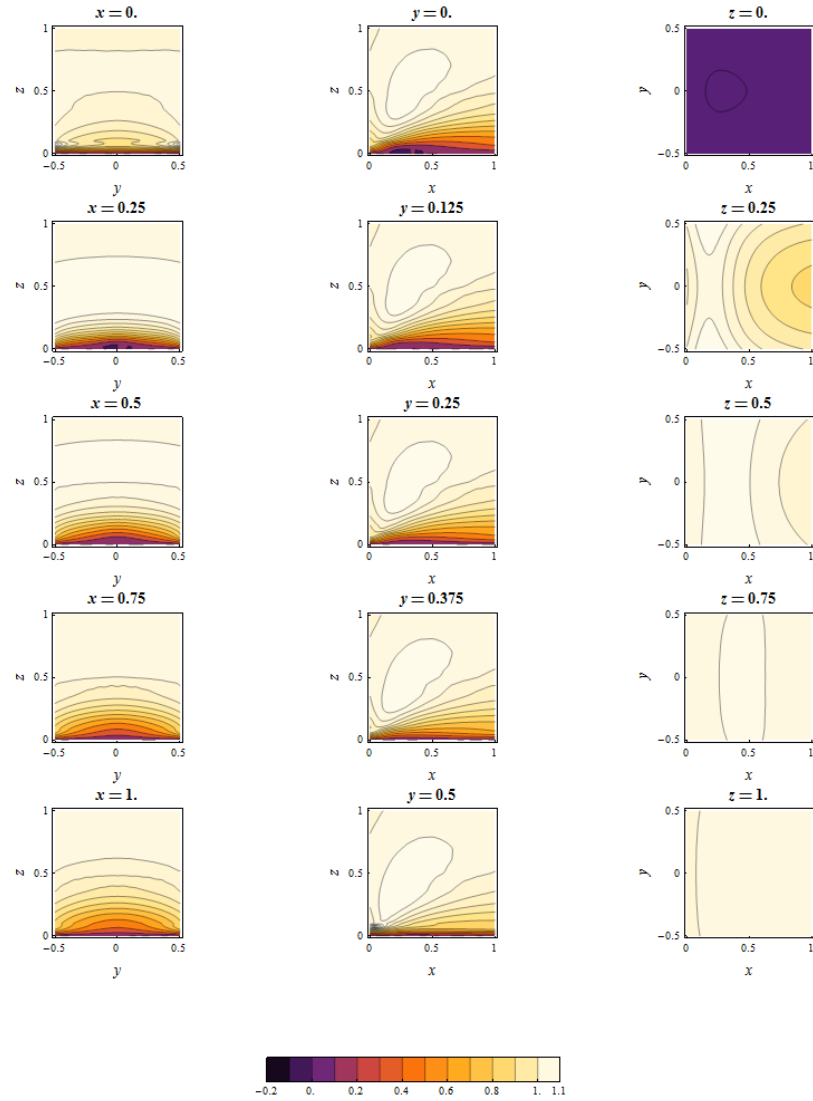


Figura 5.95: Contornos de factor de concentración por planos, caso 17: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 3$.

Caso 18: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 4$

En la Figura 5.96, en la primera columna se observan valores más altos de C_f hacia los costados del edificio $y = \pm 0.5$. En la segunda columna se puede ver que la zona de recirculación del flujo es más grande en este caso que en el anterior. Las estructuras elípticas son más grandes comparado con el caso anterior, los colores sugieren que se alcanzan menores valores de C_f pero con variaciones menos bruscas. En la tercera columna se aprecia que aparecen contornos, para valores bajos de x , cuya curvatura es en la dirección aguas abajo al alejarse de $y = 0$, de igual manera que para el caso

anterior.

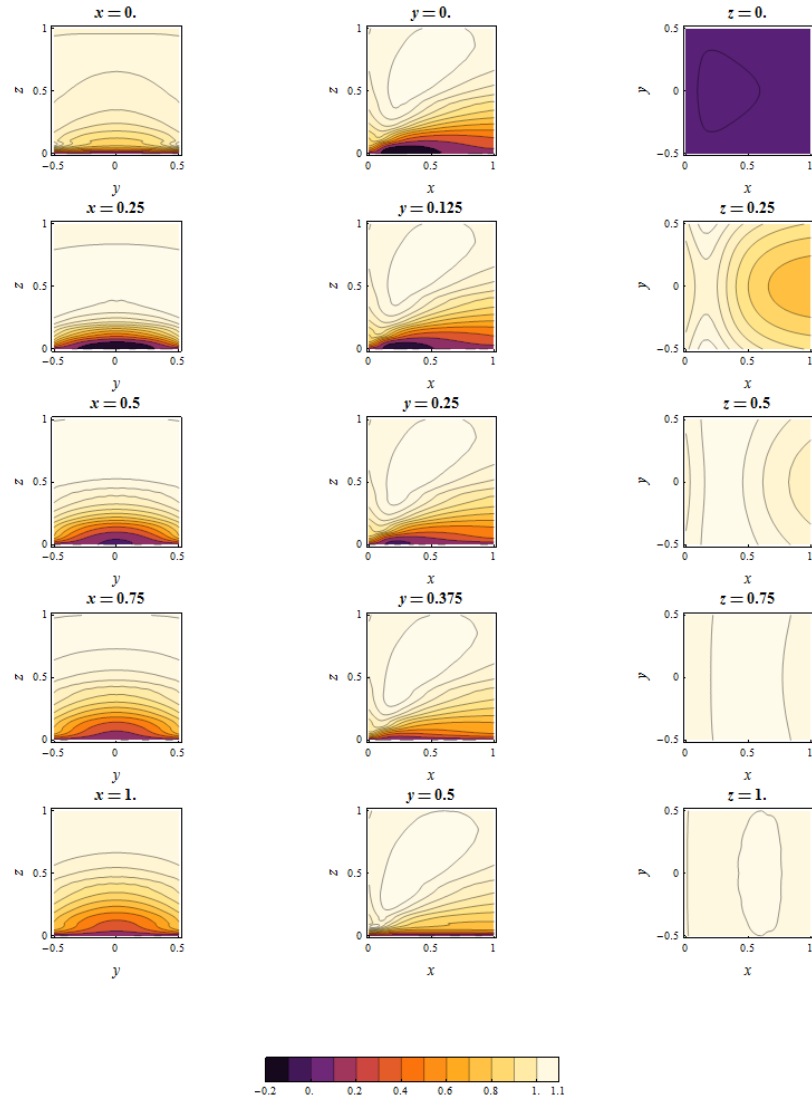


Figura 5.96: Contornos de factor de concentración por planos, caso 18: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 4$.

Caso 19: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 5$

En la Figura 5.97, en la primera columna se observan valores más altos de C_f hacia los costados del edificio $y = \pm 0.5$. En la segunda columna se puede ver que la zona de recirculación del flujo es más grande en este caso que en el anterior. Las estructuras elípticas son más grandes comparado con el caso anterior, los colores sugieren que se alcanzan menores valores de C_f pero con variaciones menos bruscas. En la tercera columna se aprecia que aparecen contornos, para valores bajos de x , cuya curvatura es en la dirección aguas abajo al alejarse de $y = 0$, de igual manera que para el caso

anterior.

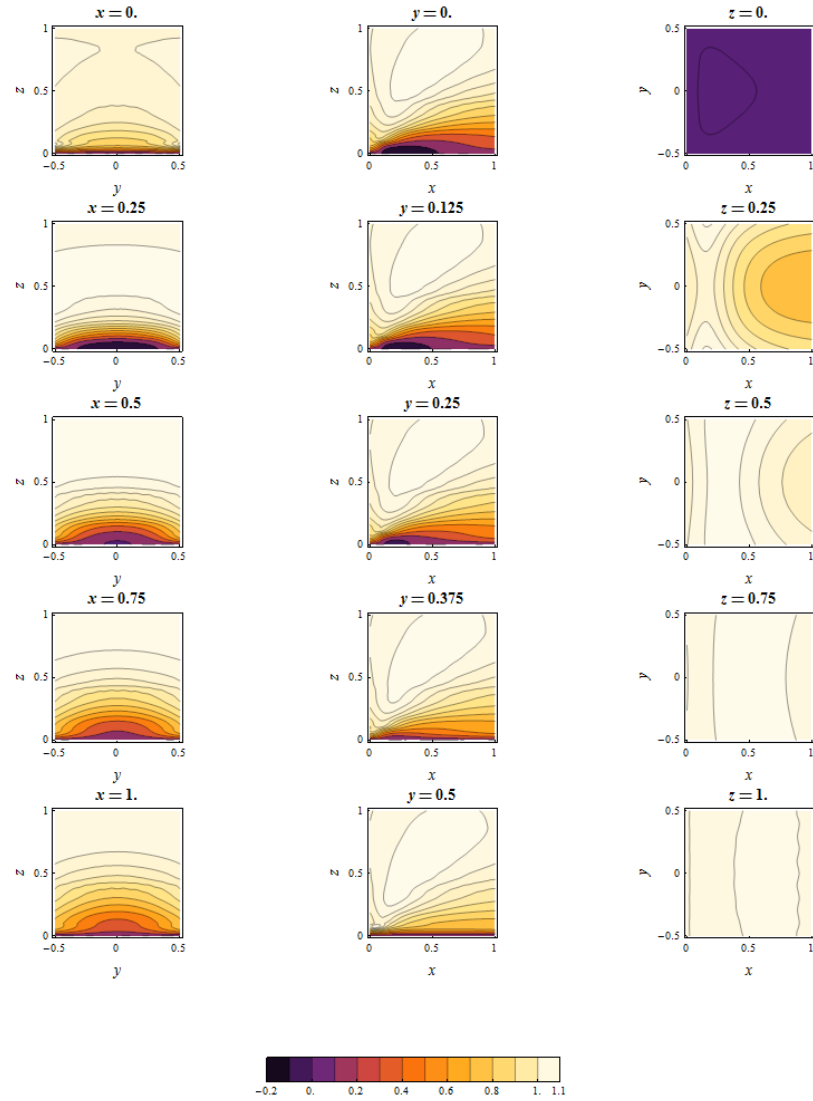


Figura 5.97: Contornos de factor de concentración por planos, caso 19: $a = 2$, $b = 0.5$, $c = 5$.

Caso 26: $a = 2$, $b = 2$, $c = 3$

En la Figura 5.98 se aprecia que la variabilidad del factor de concentración C_f en el espacio es mucho mayor que para el caso 17, ver Figura 5.95. La escala de colores también indica que se alcanzan valores mayores de C_f con una mayor separación entre edificios b para las mismas alturas de edificios a , c .

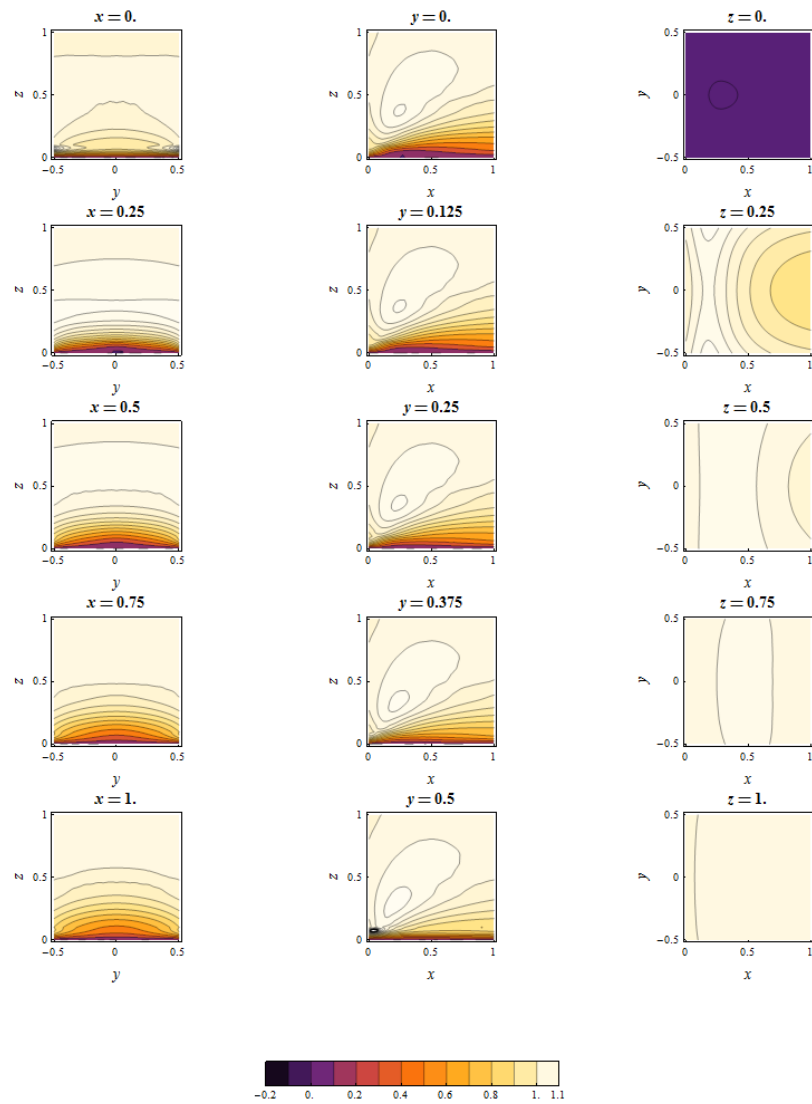


Figura 5.98: Contornos de factor de concentración por planos, caso 26: $a = 2$, $b = 2$, $c = 3$.

Caso 27: $a = 2$, $b = 2$, $c = 4$

En la Figura 5.99, en la primera columna se observan valores más altos de C_f hacia los costados del edificio $y = \pm 0.5$. En la segunda columna se puede ver que la zona de recirculación del flujo es más grande en este caso que en el anterior. Las estructuras elípticas son más grandes comparado con el caso anterior, los colores sugieren que se alcanzan menores valores de C_f pero con variaciones menos bruscas. En la tercera columna se aprecia que aparecen contornos, para valores bajos de x , cuya curvatura es en la dirección aguas abajo al alejarse de $y = 0$, de igual manera que para el caso anterior.

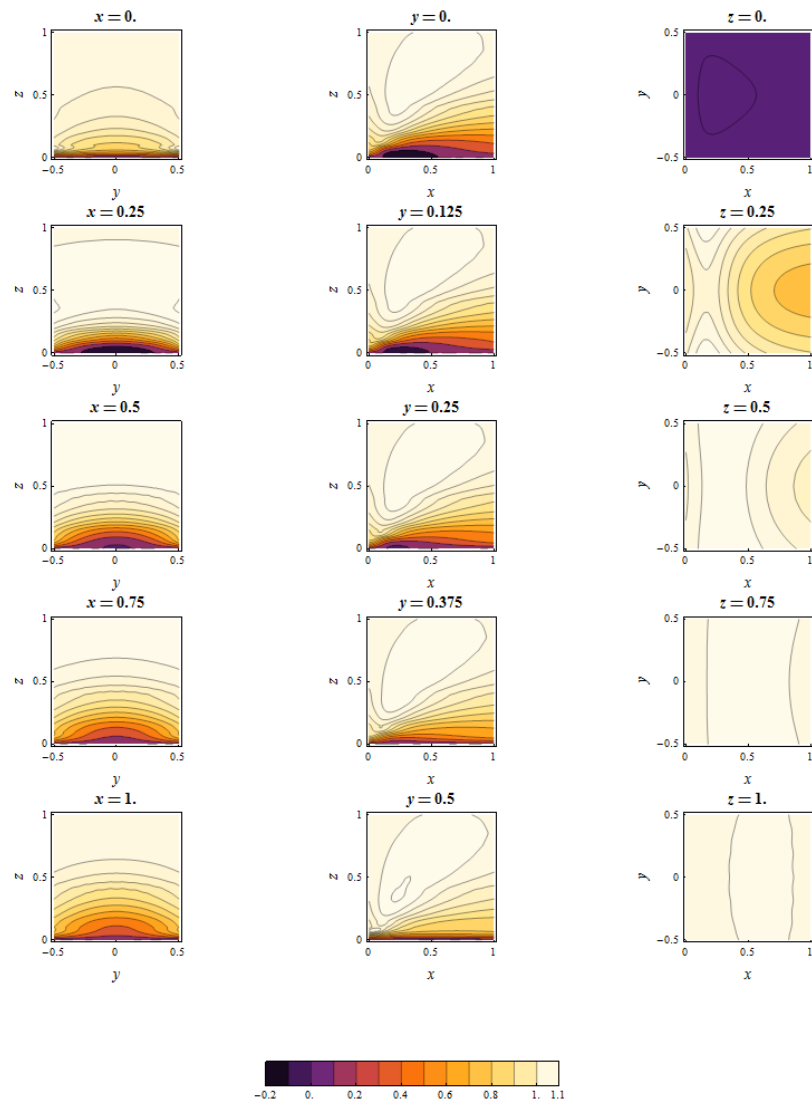


Figura 5.99: Contornos de factor de concentración por planos, caso 27: $a = 2$, $b = 2$, $c = 4$.

Caso 28: $a = 2$, $b = 2$, $c = 5$

En la Figura 5.100, en la primera columna se observan valores más altos de C_f hacia los costados del edificio $y = \pm 0.5$. En la segunda columna se puede ver que la zona de recirculación del flujo es más grande en este caso que en el anterior. Las estructuras elípticas son más grandes comparado con el caso anterior, los colores sugieren que se alcanzan menores valores de C_f pero con variaciones menos bruscas. En la tercera columna se aprecia que aparecen contornos, para valores bajos de x , cuya curvatura es en la dirección aguas abajo al alejarse de $y = 0$, de igual manera que para el caso anterior.

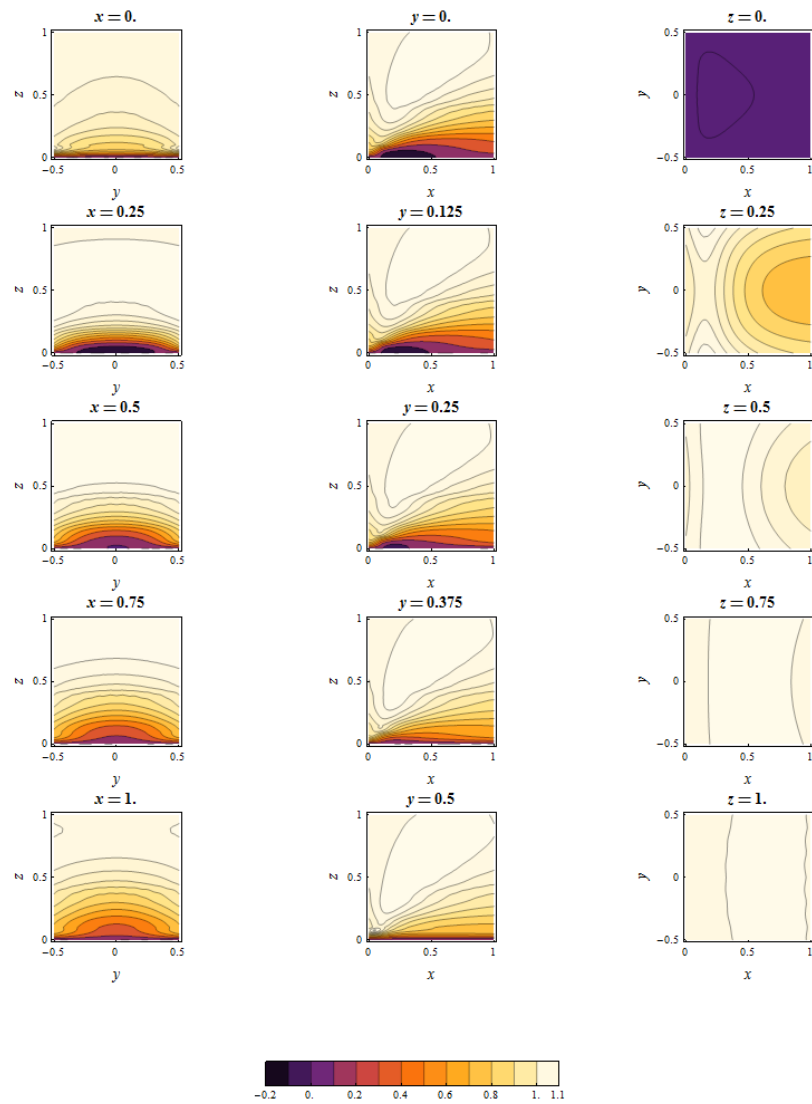


Figura 5.100: Contornos de factor de concentración por planos, caso 28: $a = 2$, $b = 2$, $c = 5$.

Caso 29: $a = 3$, $b = 0.5$, $c = 4$

La primera columna de la Figura 5.101 presenta contornos de C_f en el plano YZ . Estos forman bandas de C_f que varían con la altura z y se curvan hacia abajo al alejarse de $y = 0$ donde son más delgadas. En estos planos también se puede apreciar que a medida que se avanza en el eje x , el flujo varía cada vez menos. La segunda columna muestra los contornos en planos ZX . Las estructuras formadas asemejan elipses inclinadas una dentro de otra, donde C_f decae al alejarse de la elipse más pequeña. Se ve que se cumple la condición de no deslizamiento en el tejado del edificio $z = 0$, donde C_f cae a 0. Esto sucede más rápido hacia los costados del edificio $y = \pm 0.5$. En la tercera columna (plano XY) se aprecian bandas de C_f que cruzan según el eje y , estas se curvan en la dirección

aguas arriba al acercarse a los costados del edificio.

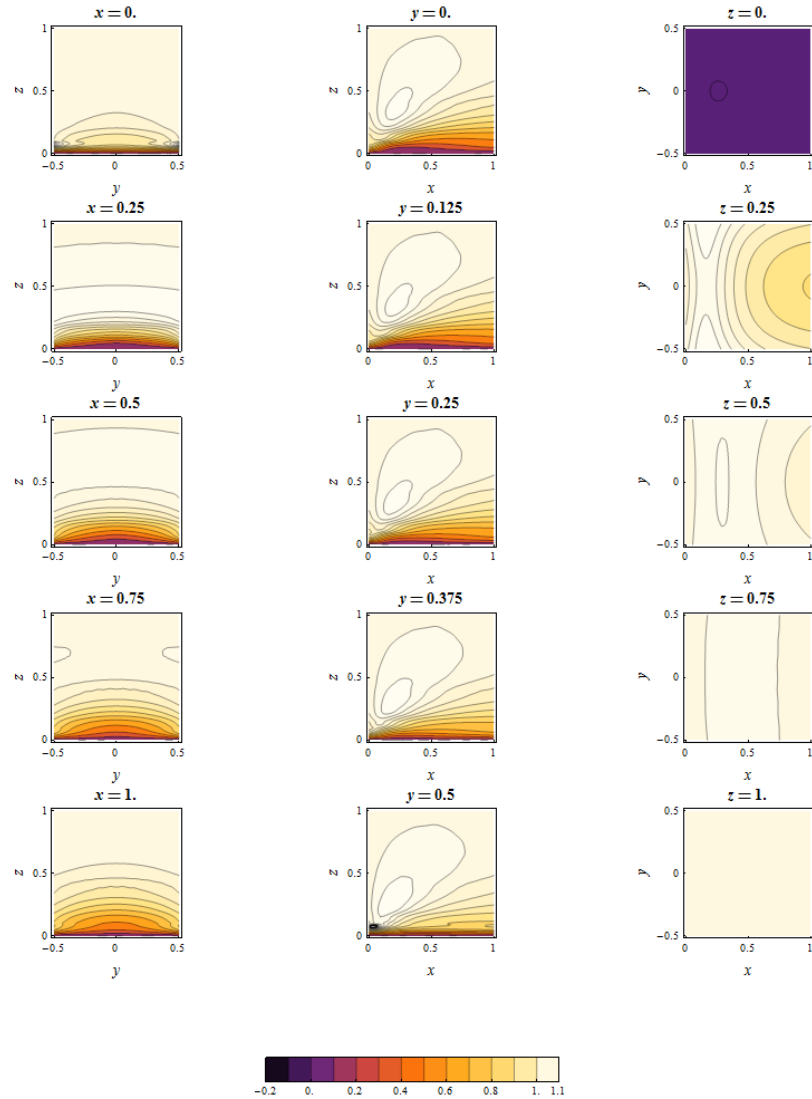


Figura 5.101: Contornos de factor de concentración por planos, caso 29: $a = 3$, $b = 0.5$, $c = 4$.

Caso 30: $a = 3$, $b = 0.5$, $c = 5$

En la Figura 5.102, en la primera columna se observan valores más altos de C_f hacia los costados del edificio $y = \pm 0.5$. En la segunda columna se puede ver que la zona de recirculación del flujo es más grande en este caso que en el anterior. Las estructuras elípticas son más grandes comparado con el caso anterior, los colores sugieren que se alcanzan menores valores de C_f pero con variaciones menos bruscas. En la tercera columna se aprecia que aparecen contornos, para valores bajos de x , cuya curvatura es en la dirección aguas abajo al alejarse de $y = 0$, de igual manera que para el caso

anterior.

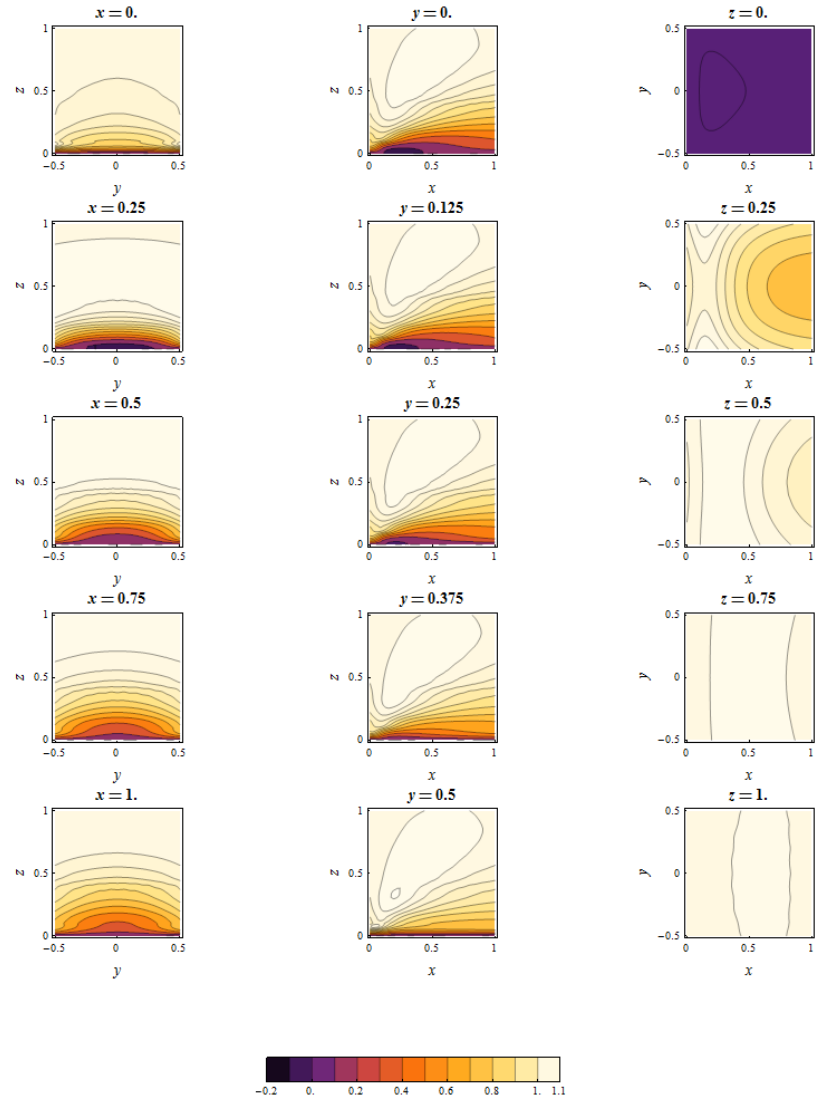


Figura 5.102: Contornos de factor de concentración por planos, caso 30: $a = 3$, $b = 0.5$, $c = 5$.

Caso 35 $a = 3$, $b = 2$, $c = 4$

En la Figura 5.103 no se aprecian diferencias significativas con respecto a el caso 29, ver Figura 5.101. Luego, para $a = 3$, $c = 4$ la separación entre edificios b tiene poca influencia sobre el factor de concentración y su distribución espacial.

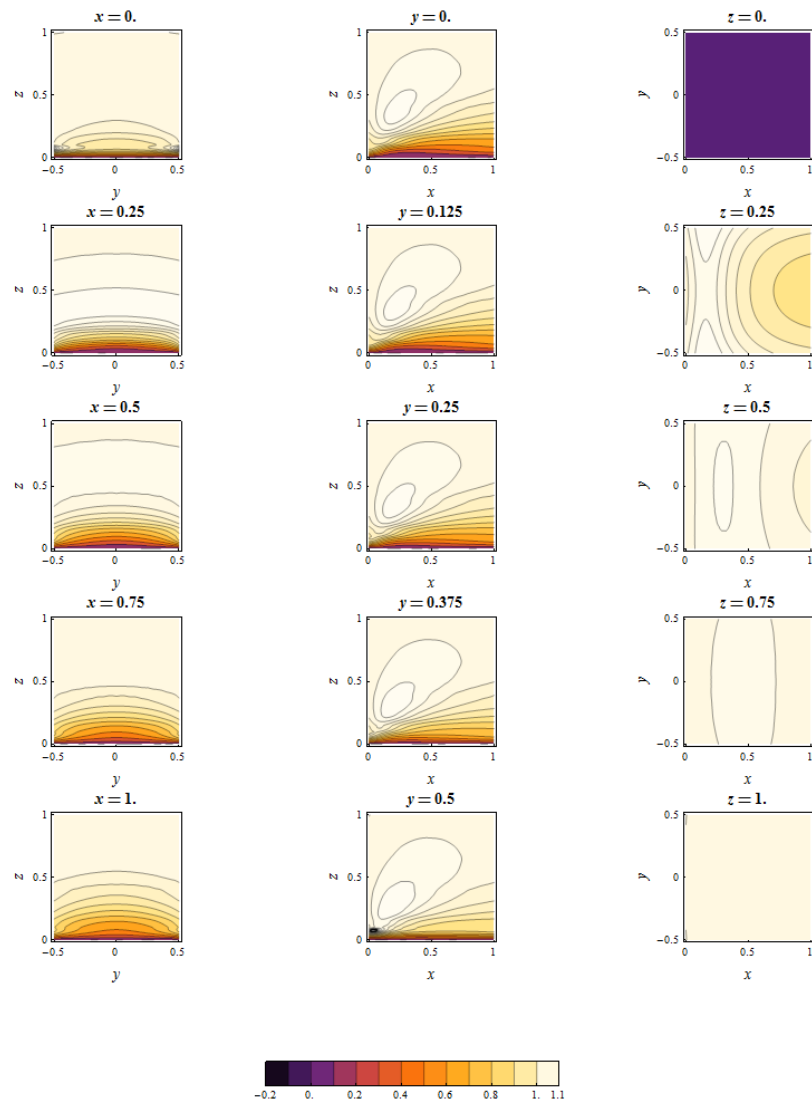


Figura 5.103: Contornos de factor de concentración por planos, caso 35: $a = 3$, $b = 2$, $c = 4$.

Caso 36: $a = 3$, $b = 2$, $c = 5$

En la Figura 5.104, en la primera columna se observan valores más altos de C_f hacia los costados del edificio $y = \pm 0.5$. En la segunda columna se puede ver que la zona de recirculación del flujo es más grande en este caso que en el anterior. Las estructuras elípticas son más grandes comparado con el caso anterior, los colores sugieren que se alcanzan menores valores de C_f pero con variaciones menos bruscas. En la tercera columna se aprecia que aparecen contornos, para valores bajos de x , cuya curvatura es en la dirección aguas abajo al alejarse de $y = 0$, de igual manera que para el caso anterior.

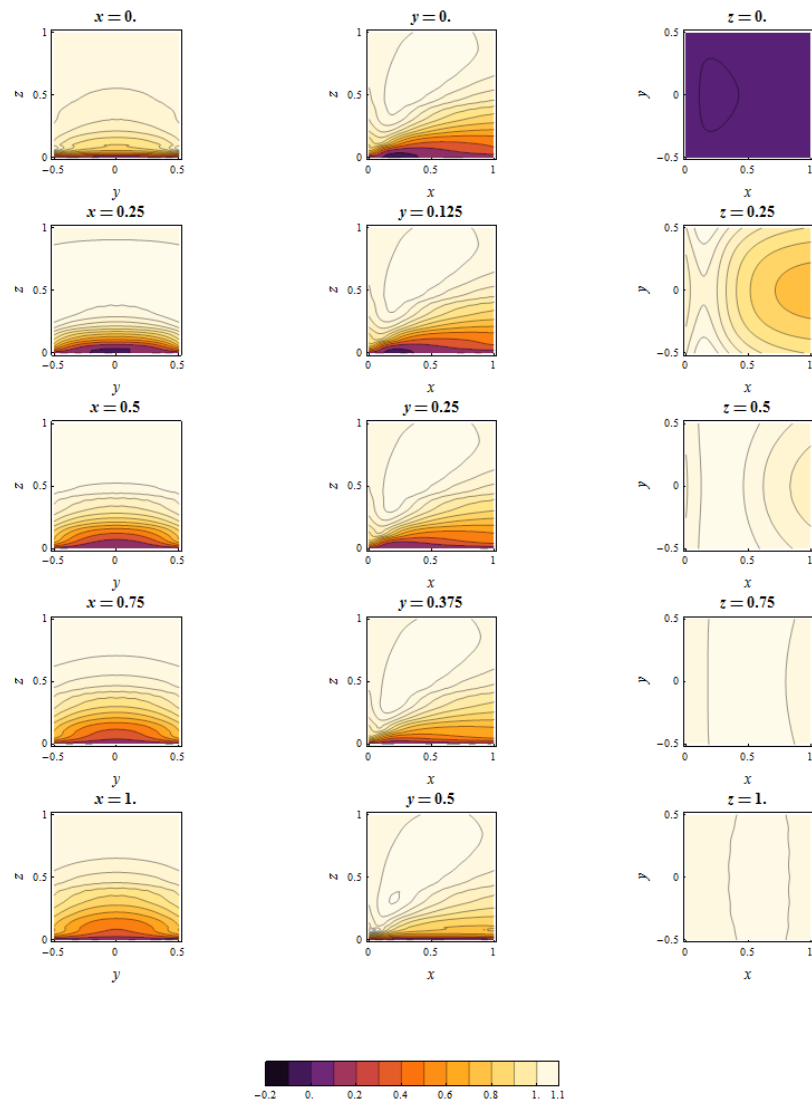


Figura 5.104: Contornos de factor de concentración por planos, caso 36: $a = 3$, $b = 2$, $c = 5$.

Caso 37: $a = 4$, $b = 0.5$, $c = 5$

La primera columna de la Figura 5.105 presenta contornos de C_f en el plano YZ . Estos forman bandas de C_f que varían con la altura z y se curvan hacia abajo al alejarse de $y = 0$ donde son más delgadas. En estos planos también se puede apreciar que a medida que se avanza en el eje x , el flujo varía cada vez menos. La segunda columna muestra los contornos en planos ZX . Las estructuras formadas asemejan elipses inclinadas una dentro de otra, donde C_f decae al alejarse de la elipse más pequeña. Se ve que se cumple la condición de no deslizamiento en el tejado del edificio $z = 0$, donde C_f cae a 0. Esto sucede más rápido hacia los costados del edificio $y = \pm 0.5$. En la tercera columna (plano XY) se aprecian bandas de C_f que cruzan según el eje y , estas se curvan en la dirección

aguas arriba al acercarse a los costados del edificio.

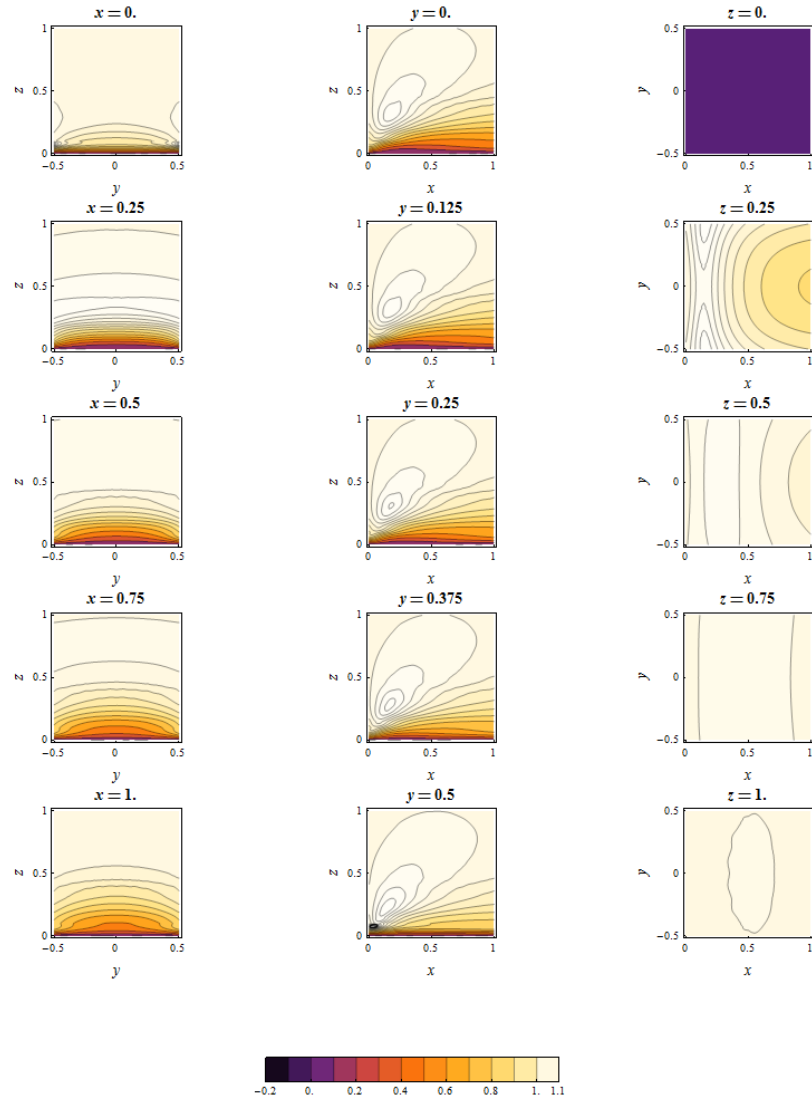


Figura 5.105: Contornos de factor de concentración por planos, caso 37: $a = 4$, $b = 0.5$, $c = 5$.

Caso 40: $a = 4$, $b = 2$, $c = 5$

En la Figura 5.106 no se aprecian diferencias significativas con respecto a el caso 37, ver Figura 5.105. Luego, para $a = 4$, $c = 5$ la separación entre edificios b tiene poca influencia sobre el factor de concentración y su distribución espacial.

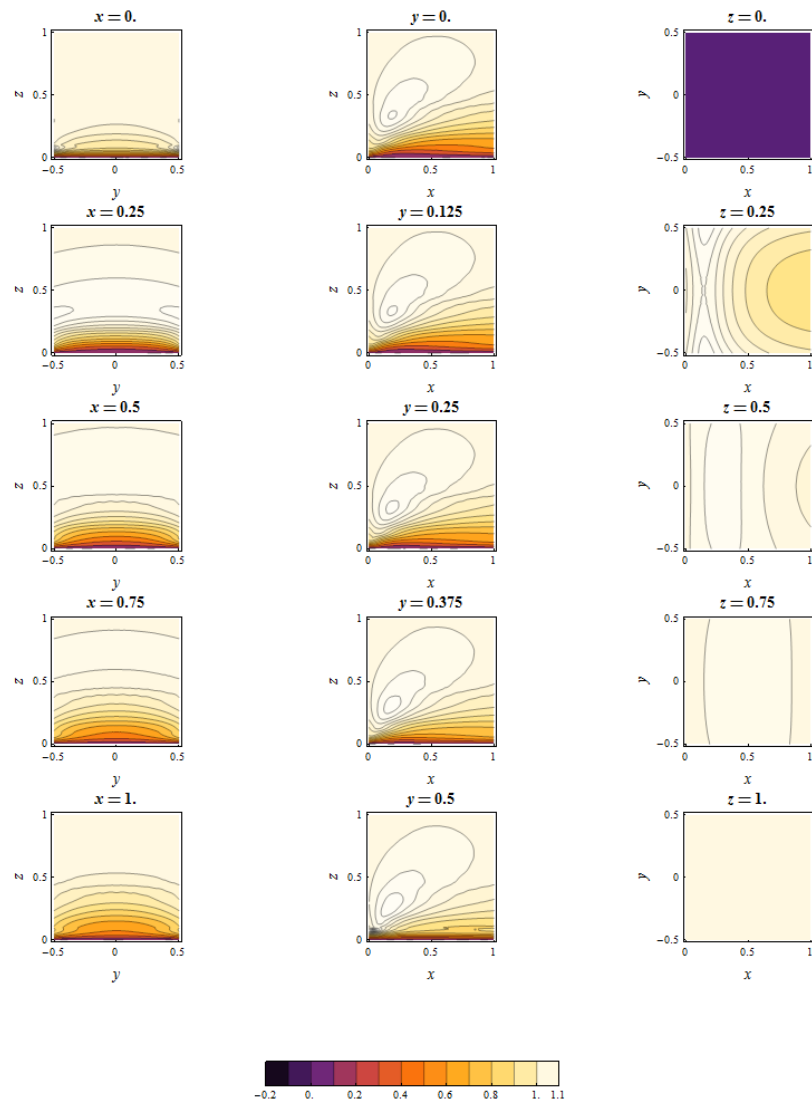
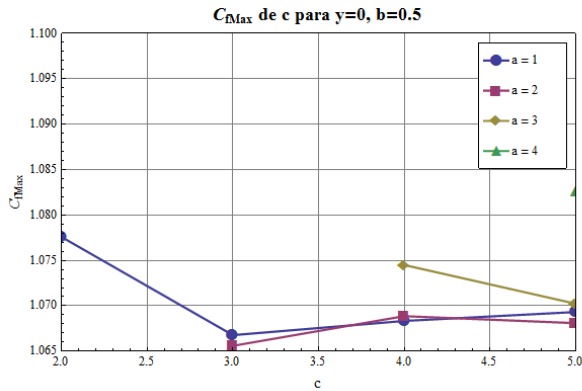


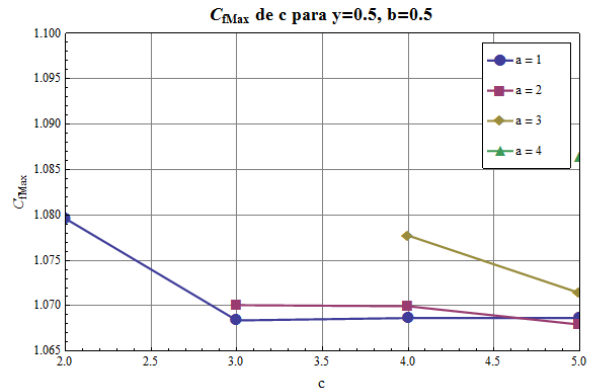
Figura 5.106: Contornos de factor de concentración por planos, caso 40: $a = 4$, $b = 2$, $c = 5$.

5.2.2. Factor de Concentración Máximo: Resultados Globales

Se calculó el factor de concentración máximo en planos correspondientes a diferentes valores de y para todos los casos de configuración urbana. En esta sección se grafican estos resultados para un posterior análisis. La Figura 5.107 muestra el comportamiento del C_{fMax} en función de la altura del edificio de interés c . Se puede ver que la tendencia general indica que se obtiene un mayor valor de C_{fMax} a medida que c disminuye. Si bien las diferencias entre el plano medio y el costado del edificio son mínimas, se aprecia un aumento de C_{fMax} con un mayor y .



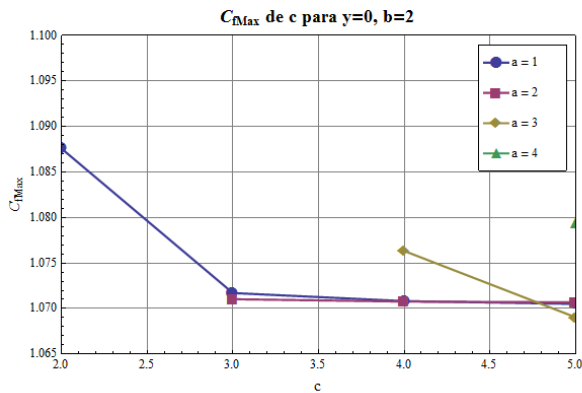
(a)



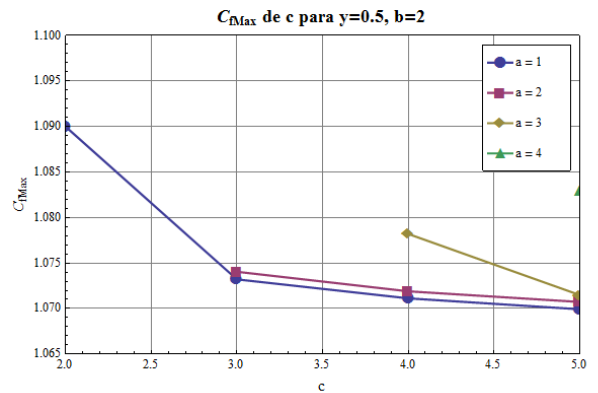
(b)

Figura 5.107: Factor de concentración máximo C_{fMax} en función de c para $b = 0.5$. (a) En el plano medio del edificio $y = 0$. (b) En un costado del edificio $y = 0.5$.

En la Figura 5.108 se observa un comportamiento similar para C_{fMax} , siguiendo la misma tendencia que en la figura anterior. Comparando con la Figura 5.107 se puede ver que el efecto de un aumento en la separación entre edificios b es un mayor valor de C_{fMax} para los valores más bajos de c .



(a)



(b)

Figura 5.108: Factor de concentración máximo C_{fMax} en función de c para $b = 2$. (a) En el plano medio del edificio $y = 0$. (b) En un costado del edificio $y = 0.5$.

La Figura 5.109 muestra el comportamiento del C_{fMax} en función de la altura del edificio aguas arriba del de interés a . Se puede ver que la tendencia general indica que se obtiene un mayor valor de C_{fMax} a medida que a crece. Si bien las diferencias entre el plano medio y el costado del edificio son mínimas, se aprecia un aumento de C_{fMax} con un mayor y .

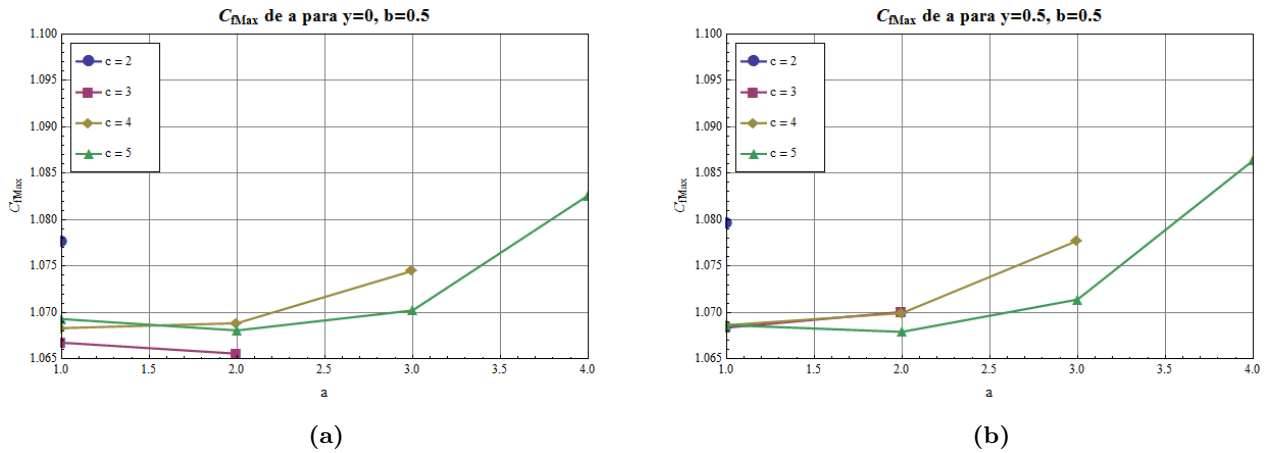


Figura 5.109: Factor de concentración máximo C_{fMax} en función de a para $b = 0.5$. (a) En el plano medio del edificio $y = 0$. (b) En un costado del edificio $y = 0.5$.

En la Figura 5.110 se observa un comportamiento similar para C_{fMax} siguiendo la misma tendencia que en la figura anterior. Comparando con la Figura 5.109 se puede ver que, el efecto de un mayor valor para la separación entre edificios b , es un leve aumento C_{fMax} para valores bajos de a y una leve disminución para valores altos de a .

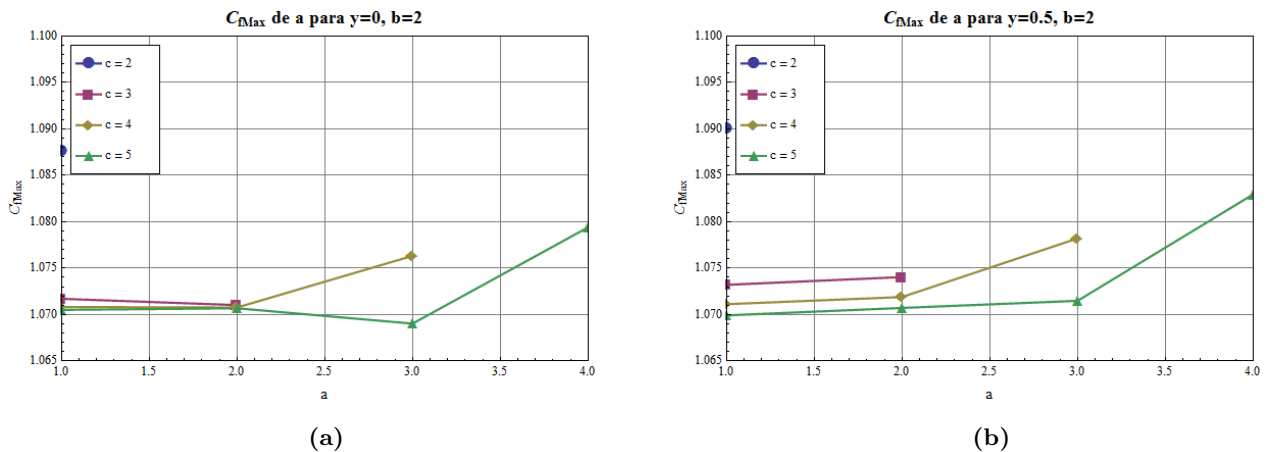


Figura 5.110: Factor de concentración máximo C_{fMax} en función de a para $b = 2$. (a) En el plano medio del edificio $y = 0$. (b) En un costado del edificio $y = 0.5$.

5.2.3. Análisis de Resultados

En esta sección se resume los resultados presentados para el comportamiento del factor de concentración sobre el edificio de interés. También se hace un análisis relacionando estas observaciones

con las apreciaciones hechas para los resultados de las simulaciones CFD. Primero se muestran contornos de C_f en diferentes secciones del espacio para los distintos casos de configuración urbana. Esto permite entender el comportamiento de C_f sobre el edificio de interés y ver como la distribución de obstáculos aguas arriba influye en su distribución espacial. Luego se presentan curvas del valor máximo del factor de concentración en función de los diferentes parámetros de descripción del entorno urbano para complementar el estudio del fenómeno.

Los contornos de C_f se muestran en tres columnas. La primera presenta vistas en planos YZ para x entre 0 y 1. Estos forman bandas de C_f que varían con la altura z y se curvan hacia abajo al alejarse de $y = 0$ donde son más delgadas. En estos planos también se puede apreciar que a medida que se avanza en el eje x , el flujo varía cada vez menos. La segunda columna muestra los contornos en planos ZX para y entre 0 y 0.5. Las estructuras formadas asemejan elipses inclinadas una dentro de otra, donde C_f decae al alejarse de la elipse más pequeña. Se ve que se cumple la condición de no deslizamiento en el tejado del edificio $z = 0$, donde C_f cae a 0. Esto sucede más rápido hacia los costados del edificio $y = \pm 0.5$. En la tercera columna se ven planos XY para z entre 0 y 1, se aprecian bandas de C_f que cruzan según el eje y , estas se curvan en la dirección aguas arriba al acercarse a los costados del edificio.

De las observaciones se puede inferir que, cuando el edificio de interés esta menos cubierto por el que se encuentra inmediatamente aguas arriba, C_f es menos variable en el espacio y sus valores más altos abarcan un volumen mayor. También se ve que en estos casos la zona de recirculación de flujo es más grande. Esto se puede explicar con el aumento en el ángulo de deflexión del flujo para edificios más descubiertos, que genera un aumento de tamaño en la burbuja de separación.

Las curvas de C_{fMax} muestran que en general el máximo del factor de concentración crece con a y decrece con c . Como conclusión de este comportamiento se puede extraer que mientras más cubierto se encuentre el edificio de interés, mayor será el valor de C_{fMax} encontrado. Esto es producto de que en estos casos el ángulo de deflexión del flujo es pequeño, luego el reacople sobre el tejado del edificio es más cercano al borde de ataque. La consecuencia de esto es un flujo acelerado más horizontal y por lo tanto mayores valores de C_f . Se puede agregar que si crece el parámetro b aumenta el factor de concentración máximo con la excepción de edificios cubiertos muy altos, en cuyo caso disminuye C_{fMax} levemente.

Según el análisis realizado en esta sección, se pueden hacer las siguientes afirmaciones cualitativas:

- En un edificio con un mayor porcentaje de cobertura, se obtendrá un factor de concentración que alcanzará valores más altos pero que decae rápidamente en el espacio.
- En un edificio descubierta, el factor de concentración será menos variable en el espacio y las zonas de flujo acelerado abarcarán un mayor volumen, sin embargo C_{fMax} será menor.

Con esto concluye el análisis para el comportamiento del factor de concentración sobre el edificio de interés.

5.3. Emplazamiento

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a los modelos matemáticos asociados a la definición de un emplazamiento adecuado para una turbina eólica urbana. Se explicita el proceso de selección de funciones para los modelos y la evaluación de la calidad del ajuste. Posteriormente se muestran los resultados globales y se analiza el comportamiento de los modelos matemáticos con la configuración urbana.

5.3.1. Modelamiento Matemático

Con el objetivo de definir un emplazamiento adecuado para turbinas eólicas sobre edificios, se buscan, para diferentes valores de y , las coordenadas X_c , Z_c del factor de concentración máximo C_{fMax} en el plano correspondiente. Esto se hace mediante un código usando *Wolfram Mathematica 8.0*. Para todos los casos de configuración urbana se calcula C_{fMax} y sus coordenadas X_c , Z_c en los planos $y = 0$ e $y = 0.5$. Estos resultados conforman los datos que serán ajustados X_{cData} , Z_{cData} y $C_{fMaxData}$. Como se presenta en el capítulo correspondiente a la metodología, se construyen los modelos matemáticos de la siguiente forma (usando notación indicial):

$$\Pi_{Model} = a^{l-1} b^{k-1} c^{j-1} y^{i-1} \lambda_{ijkl}^{\Pi} \quad (5.1)$$

Donde Π es la variable que se esta modelando, ya sea X_c , Z_c o C_{fMax} , λ^{Π} es el tensor de coeficientes polinomiales asociado a esta variable. Los índices i , j , k , l van desde 1 hasta sus límites I , J , K , L respectivamente. Estos límites definen el grado del polinomio asociado a cada parámetro a , b , c , y . Al aumentar el grado de los polinomios se obtiene un mejor ajuste de los datos pero a costo de incrementar la complejidad del modelo al agregar más coeficientes.

Para evaluar la calidad del ajuste de los modelos a los datos, se calculan el error cuadrático medio ECM y el coeficiente de determinación R^2 . Para seleccionar las funciones se itera variando los límites para los índices I , J , K , L y se compara la calidad del ajuste para cada caso.

Tabla 5.3: Calidad del ajuste para modelos matemáticos con diferentes funciones.

Límites				X_{cModel}		Z_{cModel}		$C_{fMaxModel}$	
I	J	K	L	R^2	ECM	R^2	ECM	R^2	ECM
3	2	2	2	0.9890	1.36×10^{-2}	0.9897	1.29×10^{-2}	0.9999	1.03×10^{-5}
3	3	2	3	0.9968	2.76×10^{-3}	0.9980	1.79×10^{-3}	0.9999	1.69×10^{-6}
3	3	3	3	0.9969	2.61×10^{-3}	0.9982	1.53×10^{-3}	0.9999	1.28×10^{-6}
3	4	2	4	0.9995	4.93×10^{-4}	0.9996	4.58×10^{-4}	0.9999	5.18×10^{-7}
3	4	3	4	0.9996	3.43×10^{-4}	0.9998	1.98×10^{-4}	0.9999	9.39×10^{-8}

En la Tabla 5.3 se muestra la calidad del ajuste para diferentes funciones. Estas funciones son

polinomios donde el límite I, J, K, L indica el grado -1 . Dada la simetría de los datos con respecto a $y = 0$, se escoge $I = 3$ lo que indica que las variaciones con este parámetro se modelan con un polinomio de segundo orden. Para mantener esta simetría en el modelo, se impone que todos los coeficientes asociados a términos lineales con y sean cero, es decir $\lambda_{2jkl} = 0$. Para los demás parámetros se itera aumentando el orden de los polinomios desde una aproximación lineal hasta una cúbica. Tomando en cuenta que b tiene una menor influencia sobre los datos, se consideran aproximaciones de menor grado para este parámetro.

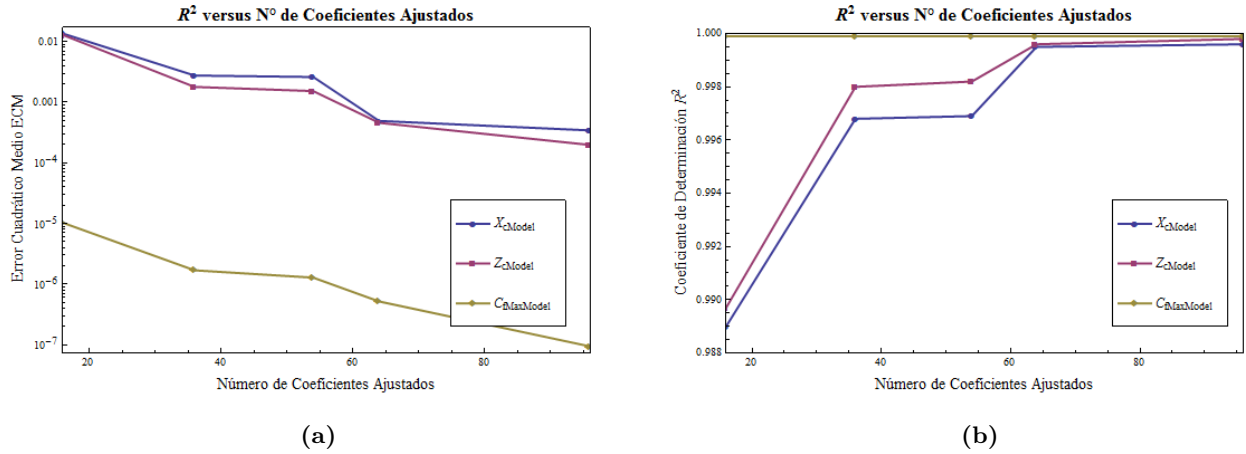


Figura 5.111: Calidad de los modelos matemáticos para X_c , Z_c , C_{fMax} versus el número de coeficientes ajustados. (a) Error cuadrático medio ECM . (b) Coeficiente de determinación R^2 .

En la Figura 5.111 se muestran los indicadores de calidad del modelo versus el número de coeficientes ajustados. En base a estos resultados, se escogen polinomios de tercer grado para a y para c , y de primer grado para b . Con esta selección los modelos cumplen con un $R^2 > 0.999$ y un $ECM < 10^{-4}$ ajustando 64 coeficientes. Si bien $C_{fMaxModel}$ cumple con estos criterios para una cantidad mucho menor de coeficientes ajustados, se utilizarán las mismas funciones para exigirle una mejor calidad a este modelo, ya que será importante para modelar el potencial energético en el capítulo siguiente.

En las Tablas 5.4, 5.5 y 5.6 se muestran los 64 coeficientes ajustados en los modelos matemáticos de X_c , de Z_c y de C_{fMax} respectivamente. No se encuentran en las Tablas los coeficientes para $i = 2$ porque son todos cero por construcción.

Tabla 5.4: Coeficientes ajustados para X_{cModel}

Coeficientes $\lambda_{ijkl}^{X_c}$		$k = 1$				$k = 2$			
		$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$
$i = 1$	$l = 1$	-0.960	0.975	-0.274	0.030	0.117	-0.032	-0.007	0.001
	$l = 2$	-0.129	0.167	-0.051	-0.001	-0.070	0.029	0.005	0.
	$l = 3$	0.021	0.036	0.	0.001	-0.045	0.005	0.	0.
	$l = 4$	-0.041	-0.001	0.	0.	-0.002	0.002	0.	0.
$i = 3$	$l = 1$	1.624	-0.962	0.311	-0.580	-0.602	0.231	0.001	-0.002
	$l = 2$	-0.700	0.020	0.118	0.006	0.309	-0.113	-0.026	0.002
	$l = 3$	-0.441	-0.049	-0.003	-0.004	0.199	-0.018	-0.002	0.002
	$l = 4$	0.100	0.017	0.002	-0.001	0.005	-0.009	-0.001	0.

Tabla 5.5: Coeficientes ajustados para Z_{cModel}

Coeficientes $\lambda_{ijkl}^{Z_c}$		$k = 1$				$k = 2$			
		$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$
$i = 1$	$l = 1$	-1.257	1.150	-0.268	0.026	0.297	-0.100	-0.007	0.002
	$l = 2$	0.007	0.148	-0.059	0.	-0.167	0.055	0.010	-0.002
	$l = 3$	0.063	0.026	-0.001	0.001	-0.084	0.014	0.002	-0.001
	$l = 4$	-0.043	-0.004	0.	0.	-0.009	0.004	0.001	0.
$i = 3$	$l = 1$	2.432	-0.148	-0.275	0.029	-1.636	0.765	-0.081	0.002
	$l = 2$	-2.635	0.72	0.088	-0.014	0.694	-0.172	-0.062	0.008
	$l = 3$	0.952	0.178	0.019	-0.008	0.362	-0.049	-0.008	0.004
	$l = 4$	-0.078	0.046	0.005	-0.001	0.027	-0.017	-0.002	0.001

Tabla 5.6: Coeficientes ajustados para $C_{fMaxModel}$

Coeficientes $\lambda_{ijkl}^{C_{fMax}}$		$k = 1$				$k = 2$			
		$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$
$i = 1$	$l = 1$	1.143	-0.074	0.020	-0.002	0.017	-0.009	0.002	0.
	$l = 2$	0.046	-0.019	0.004	0.	0.005	-0.002	0.	0.
	$l = 3$	-0.012	0.	0.001	0.	0.	-0.001	0.	0.
	$l = 4$	0.	0.	0.	0.	0.001	0.	0.	0.
$i = 3$	$l = 1$	-0.053	0.038	-0.008	0.	0.023	-0.014	0.003	0.
	$l = 2$	0.016	-0.001	-0.002	0.	-0.005	0.	0.	0.
	$l = 3$	0.007	-0.002	0.	0.	-0.001	0.001	0.	0.
	$l = 4$	0.003	0.	0.	0.	-0.002	0.	0.	0.

5.3.2. Resultados Globales

A partir de los modelos matemáticos, se construyen diagramas de emplazamiento. Estos muestran contornos de X_c o Z_c en función de las alturas de los edificios a y c . En los diagramas se diferencian por colores las iso-líneas para los valores extremos de la separación entre edificios b . Las figuras 5.112 y 5.113 presentan la distancia apropiada desde el borde de ataque X_c en el centro del edificio $y = 0$ y en el costado del edificio $y = 0.5$ respectivamente. Análogamente, las Figuras 5.114 y 5.115 muestran la altura adecuada sobre el tejado del edificio para $y = 0$ e $y = 0.5$ respectivamente.

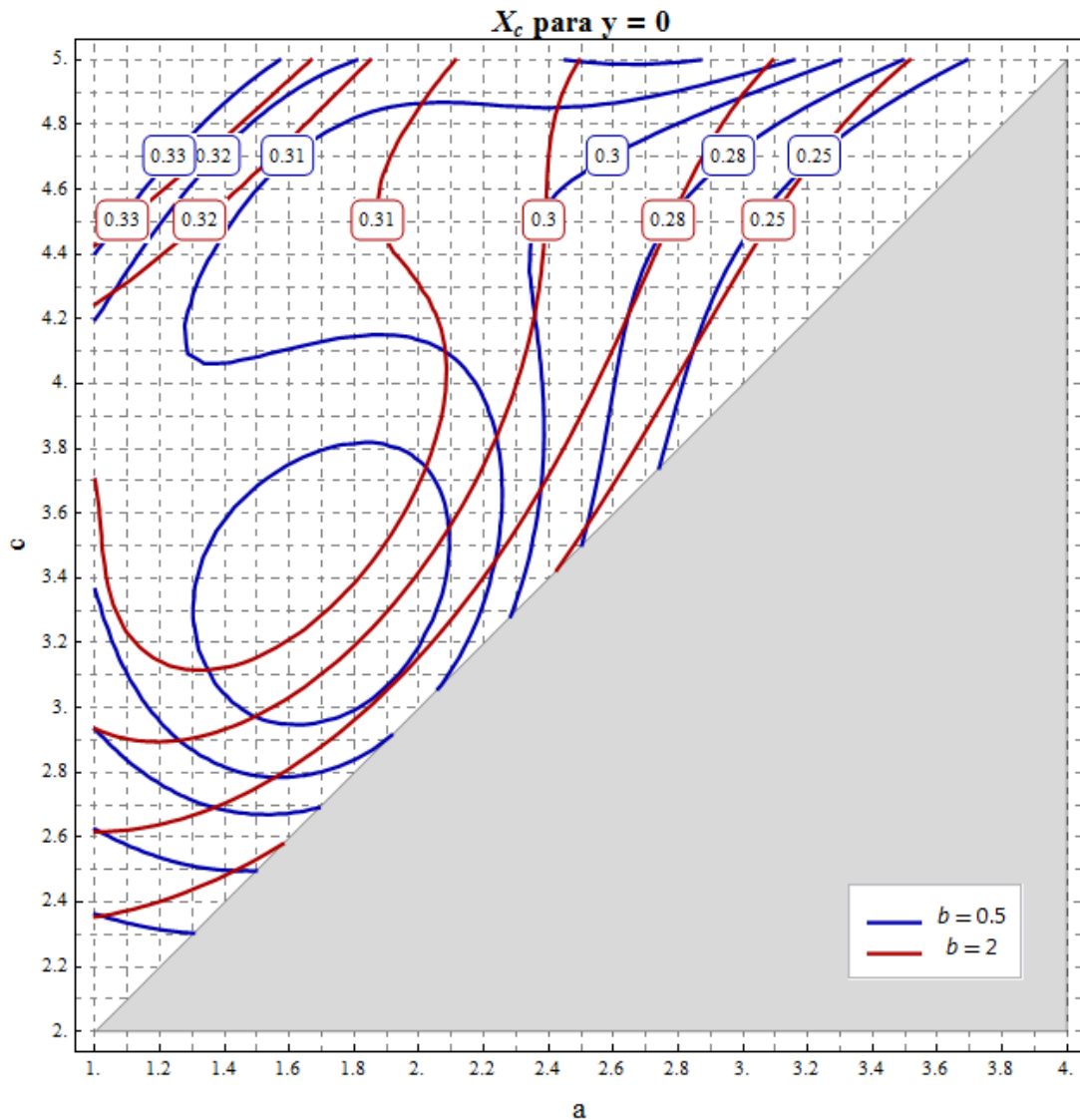


Figura 5.112: Diagrama de emplazamiento para turbinas eólicas sobre edificios. Distancia apropiada desde el borde de ataque X_c en el centro del edificio $y = 0$ en función de la configuración urbana a , b , c .

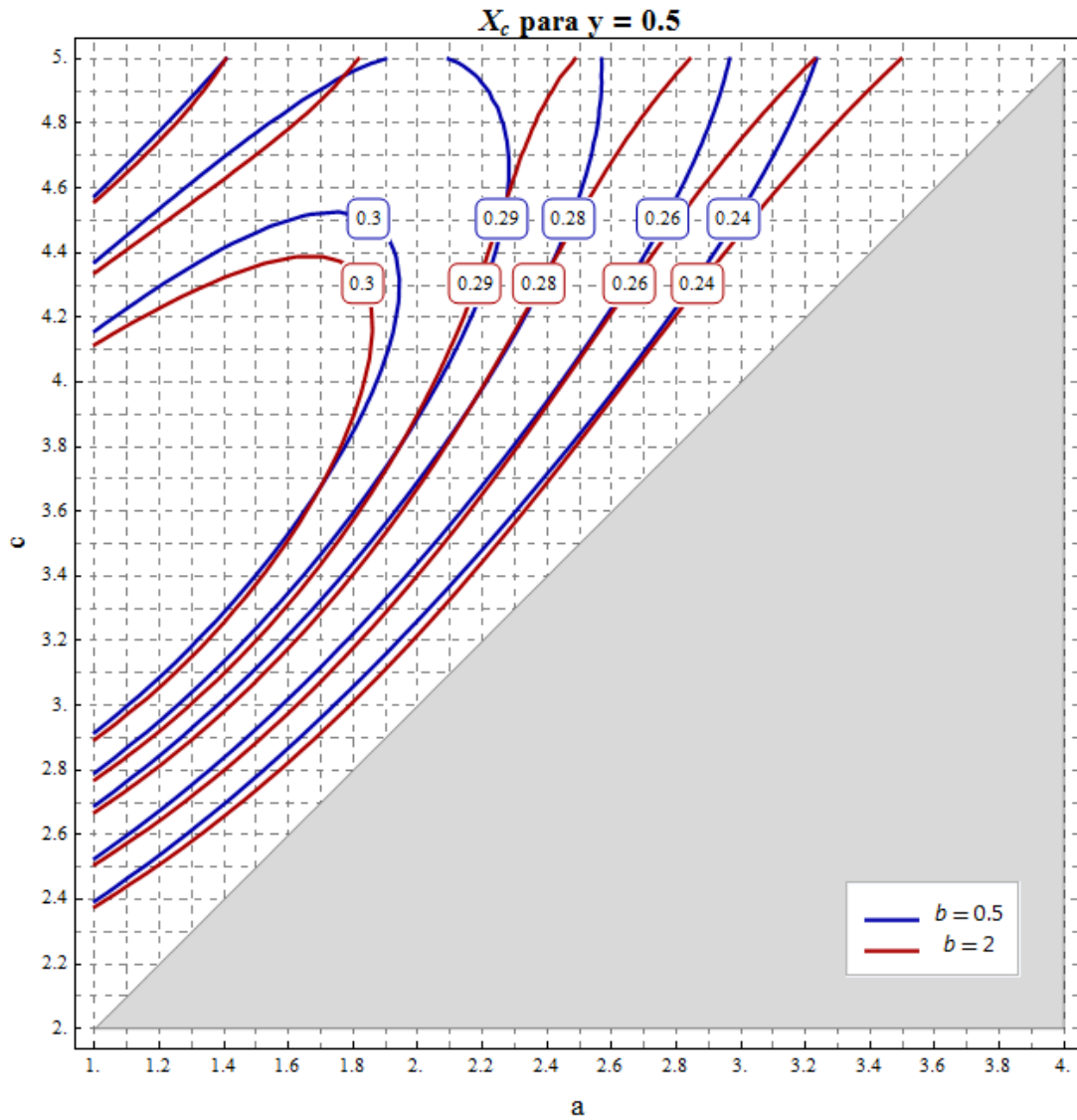


Figura 5.113: Diagrama de emplazamiento para turbinas eólicas sobre edificios. Distancia apropiada desde el borde de ataque X_c en el costado del edificio $y = 0.5$ en función de la configuración urbana a , b , c .

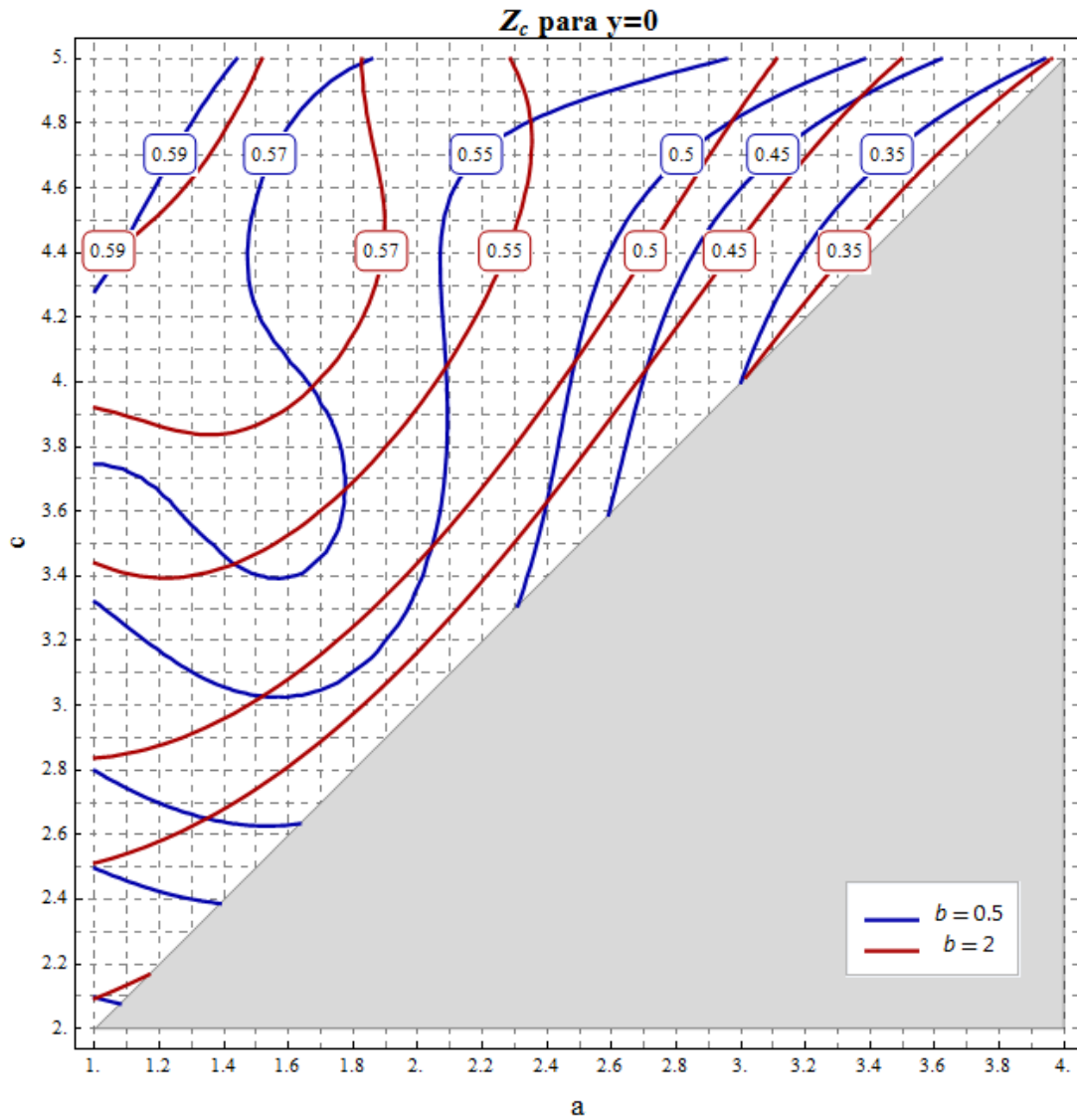


Figura 5.114: Diagrama de emplazamiento para turbinas eólicas sobre edificios. Altura apropiada desde el tejado Z_c en el centro del edificio $y = 0$ en función de la configuración urbana a , b , c .

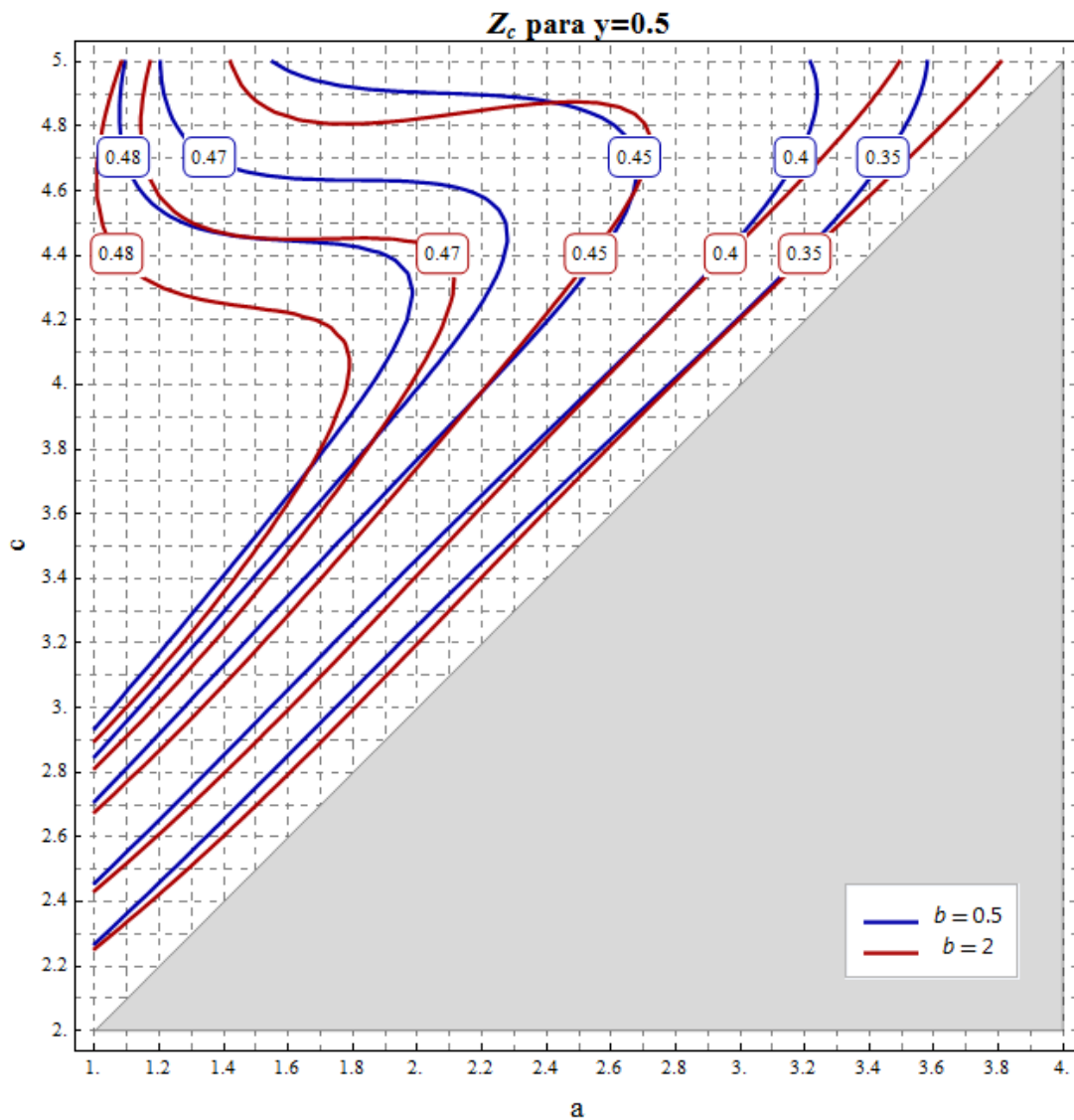


Figura 5.115: Diagrama de emplazamiento para turbinas eólicas sobre edificios. Altura apropiada desde el tejado Z_c en el costado del edificio $y = 0.5$ en función de la configuración urbana a , b , c .

5.3.3. Análisis de Resultados

En esta sección se resumen los resultados expuestos para el emplazamiento adecuado de turbinas eólicas sobre edificios. A partir de los resultados de las simulaciones CFD se exportan las soluciones para el factor de concentración y , utilizando el software *Wolfram Mathematica 8.0*, se calculan los valores máximos C_{fMax} y sus coordenadas X_c , Z_c en los planos $y = 0$ e $y = 0.5$. Estos datos se ajustan con polinomios dependientes de los parámetros de configuración urbana a , b , c y la posición en el eje y . El proceso de selección de funciones, consiste en la medición de la calidad de diferentes

modelos matemáticos mediante el error cuadrático medio ECM y el coeficiente de determinación R^2 . Se observa el comportamiento de estos indicadores versus la cantidad de coeficientes que fueron ajustados para cada modelo. Se escogen las funciones que conformen modelos matemáticos que requieran el ajuste del menor número de coeficientes posible y a la vez entreguen una calidad aceptable. Como criterio para la calidad del ajuste de los modelos a los datos, se pide: $ECM < 10^{-4}$, $R^2 > 0.999$. Luego las funciones seleccionadas asociadas a cada parámetro son un polinomio de primer grado para la separación entre edificios b , polinomios de tercer grado para las alturas a , c y una función cuadrática sin el término lineal para la coordenada y . Se muestran los coeficientes ajustados para cada modelo en las Tablas 5.4, 5.5 y 5.6.

Una vez que se tienen los modelos matemáticos se construyen diagramas de emplazamiento con el propósito de servir como una guía simple para el posicionamiento de una turbina eólica sobre un edificio dada la configuración urbana. Estos diagramas muestran la distancia horizontal desde el borde de ataque hasta la ubicación adecuada X_c y la altura de la ubicación adecuada sobre el tejado del edificio Z_c en función de las variables a , b , c , y .

Sobre los diagramas de emplazamiento, se realizan las siguientes observaciones:

- X_c varía poco, 0.24–0.33, en comparación con Z_c , 0.35–0.59.
- En el costado del edificio $y = 0.5$, la ubicación adecuada X_c , Z_c varía menos que en el centro del edificio $y = 0$.
- La separación b tiene una menor influencia sobre el emplazamiento adecuado hacia los costados del edificio.
- En general, en los edificios con menor cobertura, es decir, los que se encuentran más expuestos al flujo libre, X_c y Z_c aumentan.

Continuando con los análisis hechos en las secciones anteriores, se discute esta última observación. Es coherente que en un edificio de menor cobertura la ubicación del máximo factor de concentración se desplace hacia arriba y aguas abajo, puesto que existe un zona de recirculación más grande en estos casos. Esto implica que el flujo sobre la burbuja de separación tiene una componente vertical más importante que demora más en desvanecerse y por consecuencia retardando la máxima aceleración horizontal.

5.4. Potencial Energético

En esta sección se presenta el modelo matemático para el potencial energético PE y se detallan los resultados globales del comportamiento de esta variable. Posteriormente se hace el análisis correspondiente y las relaciones con las observaciones de secciones anteriores.

5.4.1. Modelamiento Matemático

Con el objetivo de crear un indicador de la calidad de un entorno urbano como concentrador de flujo se define el potencial energético PE . El detalle de esta definición se encuentra en el capítulo correspondiente a la metodología, para recordar se muestra la ecuación 5.2.

$$PE = \frac{\rho}{2D^2} \int_{Y-D/2}^{Y+D/2} \int_{z_{min}}^{z_{min}+D} C_f^3 dz dy \quad (5.2)$$

Donde Y es la posición en el eje y del centro de una turbina de dimension característica D . La densidad del aire es ρ y z_{min} corresponde a la altura de la base del rotor que se calcula como:

$$z_{min} = \begin{cases} Z_c - D/2 & \text{si } Z_c - D/2 > z^* \\ z^* & \text{si } Z_c - D/2 \leq z^* \end{cases} \quad (5.3)$$

En la ecuación 5.3, z^* es la altura por sobre el tejado del edificio a la cual se obtiene $C_f = 1$ en $y = Y$ para el caso específico de configuración urbana.

Según esta definición y a partir de los datos del CFD, se calcula el potencial energético PE_{Data} para valores adimensionales de D entre 0.1–0.8, equivalentes a 1–15m. Estos datos son ajustados en un modelo matemático de la forma:

$$PE_{Model} = \frac{\rho}{2} [(C_{fMax}^3 - 1) e^{-KD} + 1] \quad (5.4)$$

En la ecuación 5.4, K es el factor de decaimiento espacial del potencial energético, el cual es función de la configuración urbana y de la coordenada Y . Este corresponde a un polinomio construido de igual manera que los modelos matemáticos para X_c , Z_c y C_{fMax} en la sección anterior. En la Figura 5.116 se muestran el error cuadrático medio ECM y el coeficiente de determinación R^2 de PE_{Model} en función del número de coeficientes ajustados para modelar K .

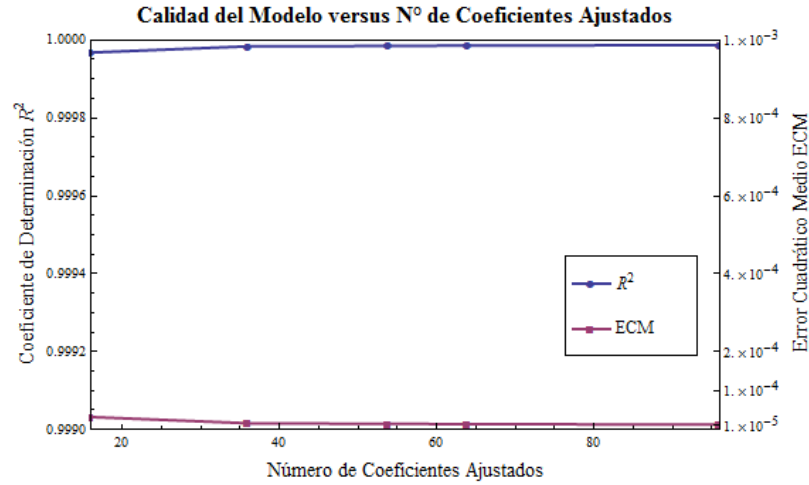


Figura 5.116: Error cuadrático medio y coeficiente de determinación de PE_{Model} versus el número de coeficientes ajustados para modelar K .

En la Figura 5.116 se observa que el modelo matemático es de calidad aceptable para un bajo número de coeficientes, ya que cumple con el criterio impuesto en la sección anterior: $ECM < 10^{-4}$ y $R^2 > 0.9999$. Por consiguiente, se escoge una función de 16 coeficientes para K , esta corresponde a productos de polinomios de primer grado de a , de b y de c con polinomios de segundo grado de y sin los términos lineales para imponer simetría con respecto a $y = 0$. Los coeficientes de este modelo matemático se presentan en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7: Coeficientes ajustados para K en PE_{Model}

Coeficientes λ_{ijkl}^K		$k = 1$		$k = 2$	
		$j = 1$	$j = 2$	$j = 1$	$j = 2$
$i = 1$	$l = 1$	0.790	-0.138	-0.094	0.019
	$l = 2$	-0.329	0.077	0.102	-0.021
$i = 3$	$l = 1$	-0.385	-0.011	0.219	-0.036
	$l = 2$	0.913	-0.153	-0.250	0.047

El error ϵ del modelo sobre los datos es calculado según la ecuación 5.5.

$$\epsilon = \frac{PE_{Model} - PE_{Data}}{PE_{Data}} \quad (5.5)$$

En la Figura 5.117 se muestra que el modelo matemático construido para el potencial energético tiene un error sobre los datos que nunca supera el 2%. Además, se observa que existe cierta periodicidad en los errores. Por la manera en que fueron ordenados los datos, se puede desprender que el modelo sobrestima el valor del potencial energético para valores intermedios de c y subestima PE para

valores extremos de c (acercándose a 2 o 5).

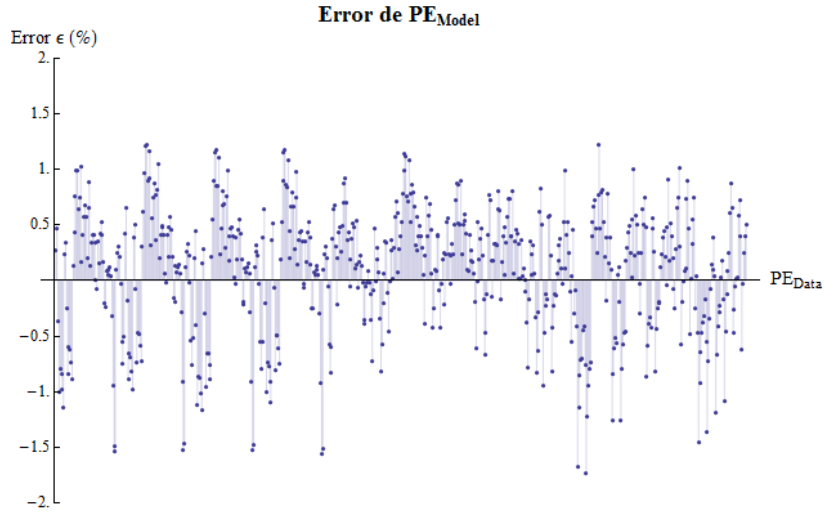


Figura 5.117: Error del modelo matemático construido para PE sobre los datos.

5.4.2. Resultados Globales

En esta sección se presentan los resultados para el modelamiento matemático del potencial energético PE . En primer lugar se muestra el comportamiento obtenido para el factor de decaimiento espacial K .

De la definición en la ecuación 5.2 se puede extraer que en el flujo libre ($C_f = 1$) el potencial energético es:

$$PE_{\infty} = \frac{\rho}{2} \quad (5.6)$$

Además, si el máximo valor para el factor de concentración es C_{fMax} , luego el máximo valor del potencial energético viene dado por:

$$PE_{Max} = \frac{\rho}{2} C_{fMax}^3 \quad (5.7)$$

Remplazando los términos de las ecuaciones 5.6 y 5.7 en el modelo matemático (ecuación 5.4) se obtiene la siguiente relación:

$$e^{-KD} = \frac{PE - PE_{\infty}}{PE_{Max} - PE_{\infty}} \quad (5.8)$$

En la ecuación 5.8 se puede interpretar el factor de decaimiento espacial como la tasa con que

disminuye el potencial energético desde su valor máximo hasta el del flujo libre. En la Figura 5.118 se muestra como cae PE al aumentar el largo característico adimensional de la turbina D .

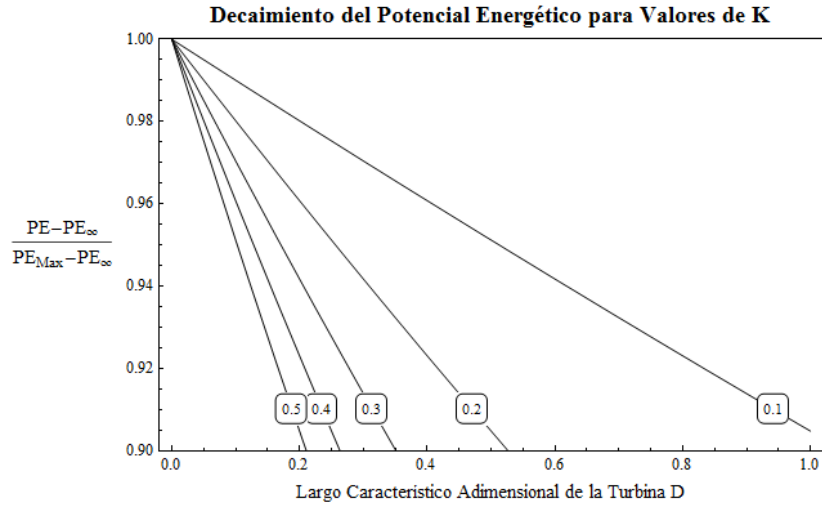


Figura 5.118: Decaimiento espacial del potencial energético para distintos valores de K .

Ahora que queda claro el efecto del factor de decaimiento espacial K , se presentan las Figuras 5.119 a la 5.122 donde se aprecia el comportamiento para esta variable obtenido con el modelamiento matemático.

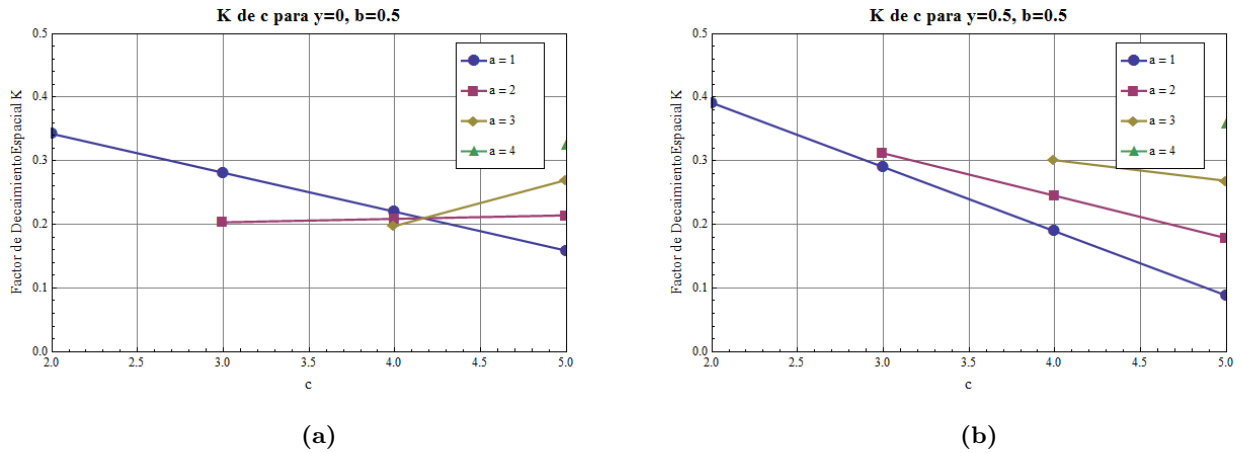
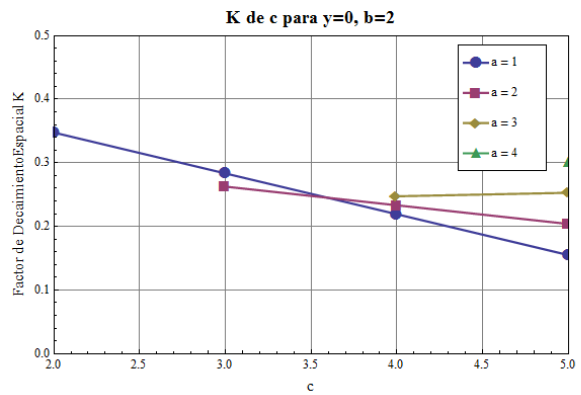
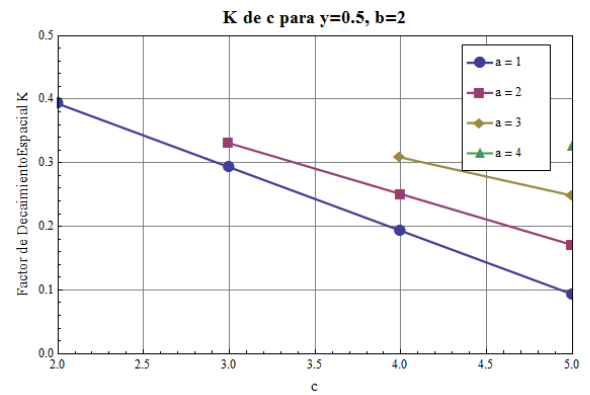


Figura 5.119: Factor de decaimiento espacial K en función de c para $b = 0.5$. (a) En el plano medio del edificio $y = 0$. (b) En un costado del edificio $y = 0.5$.

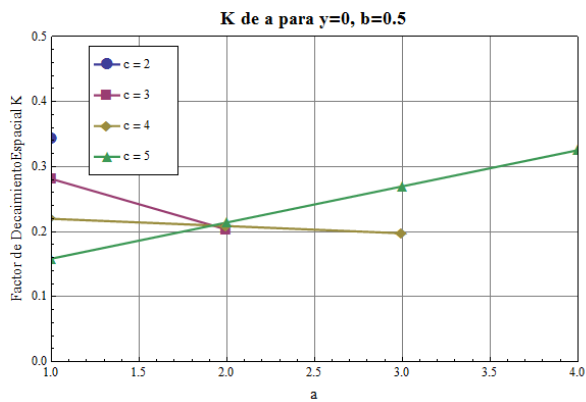


(a)

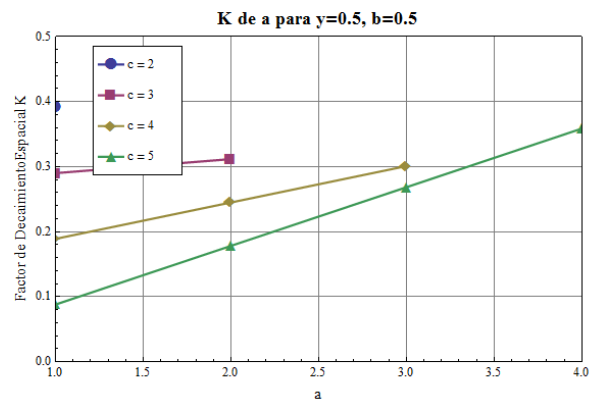


(b)

Figura 5.120: Factor de decaimiento espacial K en función de c para $b = 2$. (a) En el plano medio del edificio $y = 0$. (b) En un costado del edificio $y = 0.5$.



(a)



(b)

Figura 5.121: Factor de decaimiento espacial K en función de a para $b = 0.5$. (a) En el plano medio del edificio $y = 0$. (b) En un costado del edificio $y = 0.5$.

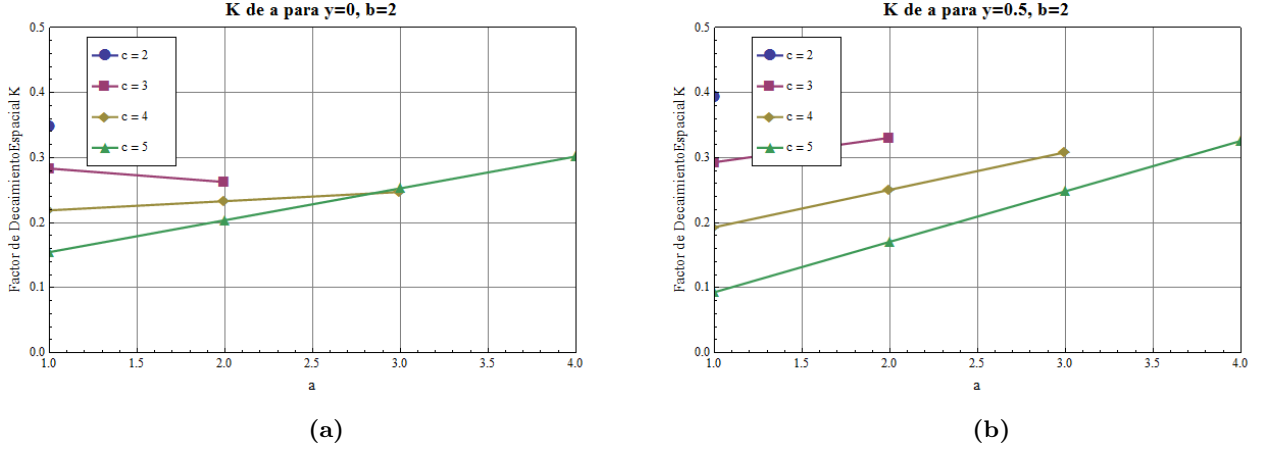


Figura 5.122: Factor de decaimiento espacial K en función de a para $b = 2$. (a) En el plano medio del edificio $y = 0$. (b) En un costado del edificio $y = 0.5$.

El comportamiento de PE_{Model} para $D = 0$ está determinado por la forma de C_{fMax} mostrado en la sección de correspondiente a los resultados del comportamiento del factor de concentración. Para ilustrar el rango de valores asumidos por el potencial energético se muestra la Tabla 5.8.

Tabla 5.8: Valores extremos de PE_{Model} y parámetros asociados:

	PE_{Model} (mínimo)	PE_{Model} (máximo)
Valor ($\frac{kg}{m^3}$)	0.719	0.790
a	1	1
b	0.5	2
c	3	2
y	0	0.5
D	0.75	0.05

Los valores de esta Tabla se calcularon minimizando y maximizando la función PE_{Model} sujeto a las restricciones correspondientes para el dominio de los datos PE_{Data} . Con estos resultados se puede afirmar que en los emplazamientos sugeridos se puede obtener entre 17.4–29 % más de potencia que en el flujo libre PE_{∞} dependiendo de la configuración urbana.

5.4.3. Análisis de Resultados

En esta sección se resume los resultados explicitados para el modelo matemático del potencial energético y la información extraída del mismo. Para la construcción de PE_{Model} se modela el factor de decaimiento espacial K como el producto entre polinomios de primer orden para a , b , c y polinomios de segundo orden para y sin los términos lineales para imponer simetría con respecto a $y = 0$. Se seleccionan estas funciones evaluando la calidad del modelo mediante el error cuadrático medio y el coeficiente de determinación que cumplen con el requisito $ECM < 10^{-4}$ y $R^2 > 0.9999$. Se presentan los 16 coeficientes ajustados para K y se muestra que el error del modelo matemático presenta un error $\epsilon < 2\%$ para todos los puntos de los datos.

Posteriormente, se explica la influencia del factor de decaimiento espacial K en PE_{Model} para poder interpretar los resultados. Seguido a esto se presentan figuras con el comportamiento de K en función de la configuración urbana. De estas se extrae que generalmente K aumenta si disminuye la altura del edificio de interés c , y si crece la altura del edificio inmediatamente aguas arriba a . Además, se ve que K es menos variable en el plano medio que en el costado del edificio y que la separación b tiene poca influencia sobre este. Este comportamiento es contrario a lo que se apreció para C_{fMax} en este mismo capítulo, conducta que era de esperarse dadas las observaciones hechas para los resultados del CFD. Producto de este análisis y según el rango de valores obtenidos para K en el modelamiento matemático (entre 0.09 y 0.39), se puede afirmar lo siguiente:

- En las configuraciones urbanas donde el edificio de interés presenta una mayor cobertura, el potencial energético decae más rápido en el espacio (K tiene un valor más alto).
- Dependiendo de la configuración urbana, el decaimiento espacial del PE puede ser hasta 4 veces más rápido.

Por último, se encuentran las configuraciones urbanas que maximizan y minimizan el potencial energético. Como se esperaba, el máximo se encuentra para un largo característico en el límite inferior ($D = 0.05$) en el costado de un edificio cubierto. El valor mínimo del potencial energético se encuentra para el valor máximo de $D = 0.75$ en el plano medio de un edificio relativamente descubierto. Adicionalmente, para efectos de este análisis se calcula la configuración urbana que presenta el mayor decaimiento espacial del potencial energético y se encuentra $a = 4$, $b = 0.5$, $c = 5$, $y = 0.5$. Como era de esperar se obtuvo una distribución donde el edificio de interés esta muy cubierto, lo que es coherente con el resto de las observaciones. Se evalúa PE_{Model} en esta configuración para cuantificar las variaciones entre el potencial energético para $D = 0.05$ y para $D = 0.75$ que corresponderían a turbinas de dimensiones características de $1m$ y $15m$ respectivamente. A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que:

- Dependiendo de la configuración urbana, se puede extraer entre 17.4–29% de potencia adicional del flujo libre.

- Entre configuraciones urbanas, una distribución de edificios favorable puede significar hasta un 9 % más de potencia disponible.
- Dada una configuración urbana, cambios en el dimensionamiento de la turbina eólica de $1m$ a $15m$ pueden significar pérdidas de hasta 4.8 % de potencia disponible por unidad de área.

Estas consideraciones pueden resultar ser críticas a la hora de evaluar un proyecto eólico-urbano.

Capítulo 6

Conclusiones

Este trabajo tuvo como motivación principal investigar el recurso eólico cerca de edificios en función de la configuración urbana. Esto se hace mediante simulaciones computacionales utilizando el método de volúmenes finitos con el software comercial *ANSYS Fluent 14.5*. Posteriormente se construyen modelos matemáticos para los resultados usando *Wolfram Mathematica 8.0*. En el comienzo de esta investigación se plantearon tres objetivos específicos claros:

1. Estudiar el comportamiento y los fenómenos físicos asociados a la fluidodinámica de un flujo de viento sobre un entorno urbano.
2. Investigar la dependencia entre la concentración de flujo sobre un edificio y la configuración de obstáculos aguas arriba de este.
3. Construir modelos matemáticos que definan un emplazamiento para turbinas eólicas sobre edificios y que permitan estimar el potencial energético asociado a dicha ubicación, dada una configuración urbana.

En base a estos objetivos se puede concluir lo siguiente:

- Cuando el flujo sobre un edificio se encuentra bloqueado en gran parte por un obstáculo inmediatamente aguas arriba, ocurren una serie de fenómenos físicos. Con respecto a un edificio descubierto, el punto de estancamiento sube, el ángulo de deflexión del flujo en el borde del edificio es menor y por lo tanto el tamaño de la burbuja de separación es menor.
- En edificios con menor cobertura, la concentración de flujo abarca una zona más grande del espacio pero alcanza valores más bajos que para edificios más protegidos.
- La concentración de flujo es mayor hacia los costados de un edificio.
- Una mayor separación con el obstáculo aguas arriba aumenta levemente la aceleración horizontal del flujo sobre el edificio de interés.

- La ubicación del máximo factor de concentración se desplaza en la dirección aguas abajo y hacia arriba a medida que disminuye el grado de cobertura del edificio de interés.
- La posición del máximo factor de concentración varía menos con la configuración urbana hacia los costados del edificio.
- En las configuraciones urbanas donde el edificio de interés presenta una mayor cobertura, el potencial energético decae más rápido en el espacio (K tiene un valor más alto).
- Dependiendo de la configuración urbana, el decaimiento espacial del potencial energético puede ser hasta 4 veces más rápido.
- Dependiendo de la configuración urbana, se puede extraer entre 17.4–29 % de potencia adicional del flujo libre.
- Entre configuraciones urbanas, una distribución de edificios favorable puede significar hasta un 9 % más de potencia disponible.
- Dada una configuración urbana, cambios en el dimensionamiento de la turbina eólica de $1m$ a $15m$ pueden significar pérdidas de hasta 4.8 % de potencia disponible por unidad de área.

En base a estas conclusiones se plantean las siguientes recomendaciones para trabajos a modo de continuación de este estudio:

- Incluir el efecto de la componente vertical de la aceleración en una nueva definición vectorial del factor de concentración de flujo.
- Hacer simulaciones con mayor resolución para encontrar el grado de cobertura óptimo, si el obstáculo aguas arriba y el edificio de interés son de la misma altura la concentración de flujo cae de manera drástica.
- Evaluar medidas de control de flujo para adelantar el reacople del flujo separado sobre el tejado del edificio para disminuir el tamaño de la zona de recirculación y así aumentar la aceleración vertical.
- Considerar más parámetros para la descripción del entorno urbano como edificios a los costados, de ancho variable o de diferentes formas.
- Estudiar el comportamiento de C_f y PE al variar la dirección predominante del viento, de manera que el flujo sea oblicuo a las caras del edificio.
- Diseñar un sistema para concentrar el flujo sobre edificios e investigar su factibilidad.
- Retroalimentar los modelos matemáticos utilizando mediciones de viento in-situ.

Estas futuras investigaciones son necesarias para lograr hacer de la tecnología eólica-urbana una opción de generación de energía eléctrica competitiva en el mercado.

Referencias

- [1] GWEC, “Global wind report –annual market update 2012,” tech. rep., Global Wind Energy Council, 2013.
- [2] L. Zhou and Y. Tian, “Impacts of wind farms on land surface temperature,” *Nature Climate Change*, vol. 2, pp. 539–543, 2012.
- [3] S. Mathew, *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer, 2006.
- [4] H. Beri and Y. Yao, “Numerical simulation of unsteady flow to show self-starting of vertical axis wind turbine using Fluent,” *Journal of Applied Science*, vol. 11, pp. 962–970, 2011.
- [5] H. Sutherland and D. Berg, “A retrospective of VAWT technology,” tech. rep., Sandia National Laboratories, 2012.
- [6] M. Bhutta and N. Hayat, “Vertical axis wind turbine—a review of various configurations and design techniques,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 1926–1939, 2012.
- [7] H. Riegler, “HAWT versus VAWT small VAWT find a clear niche,” *Refocus*, vol. 4, pp. 44–46, 2003.
- [8] S. Mertens, *Wind Energy in the Built Environment: Concentrator Effects of Buildings*. PhD thesis, Technische Universiteit Delft, 2006.
- [9] F. Balduzzi and A. Bianchini, “Microeolic turbines in the built environment: Influence of the installation site on the potential energy yield,” *Renewable Energy*, vol. 45, pp. 163–174, 2012.
- [10] H. Panofsky and J. Dutton, *Atmospheric Turbulence: Models and Methods for Engineering Applications*. Wiley-Interscience, 1983.
- [11] ESDU, “Strong winds in the atmospheric boundary layer: Esdu 82026,” tech. rep., Engineering Science Data Unit, 1982.
- [12] T. von Karman, “Mechanical similitude and turbulence,” tech. rep., 1930.
- [13] A. Townsend, *The Structure of Turbulent Shear Flow*. Cambridge University Press, 1956.

- [14] I. Castro and A. Robins, “The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 79, pp. 307–335, 1977.
- [15] G. van Bussel and S. Mertens, “Small wind turbines for the built environment,” in *The Fourth European & African Conference on Wind Engineering*, 2005.
- [16] J. D. Anderson, *Computational Fluid Dynamics: The Basics With Applications*. McGraw-Hill, 1995.
- [17] T. J. Chung, *Computational Fluid Dynamics*. Cambridge University Press, 2010.
- [18] Y. Yang and M. Gu, “New inflow boundary conditions for modelling the neutral equilibrium atmospheric boundary layer in computational wind engineering,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 97, pp. 88–95, 2009.
- [19] *ANSYS FLUENT Theory Guide*.
- [20] J. Franke and A. Hellsten, “Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment,” tech. rep., COST, 2007.
- [21] S. Norris and P. Richards, “Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models revisited,” in *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering*, 2010.
- [22] I. Abohela and N. Hamza, “Effect of roof shape, wind direction, building height and urban configuration on the energy yield and positioning of roof mounted wind turbines,” *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 1106–1118, 2013.
- [23] B. Blocken and T. Stathopoulos, “CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems,” *Atmospheric Environment*, vol. 41, pp. 238–252, 2007.
- [24] *ANSYS FLUENT User Guide*.
- [25] I. Abohela and N. Hamza, “Validating CFD simulation results: Wind flow around a surface mounted cube in a turbulent channel flow,” in *PLEA2012-28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an Environmentally Responsible Architecture*, 2012.