



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

ANÁLISIS DEL EMPLAZAMIENTO DE UN GENERADOR EÓLICO EN UNA VIVIENDA URBANA USANDO TÉCNICAS CFD.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

MARCO ANTONIO ENRÍQUEZ MILLÁN

PROFESOR GUÍA:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALVARO VALENCIA MUSALEM.
ALEJANDRO ORTIZ BERNARDIN.

SANTIAGO DE CHILE
2014

Resumen

Actualmente la energía eólica ha tenido un creciente auge debido a los grandes avances tecnológicos presentes estos últimos años y al aumento en el desarrollo de energías limpias y sustentables. A partir de lo anterior es que se genera el concepto de las turbinas eólicas aumentadas por edificios, las cuales aprovechan el potencial eólico que se ve afectado por los ambientes urbanos.

El estudio tiene como principal objetivo determinar criterios de emplazamiento de un generador eólico de pequeña escala en una vivienda urbana. Esto se realiza utilizando el método de volúmenes finitos mediante el software comercial ANSYS FLUENT 14.5, el cual simula un flujo de aire sobre una vivienda previamente definida.

Se define un coeficiente concentración de la velocidad del aire que muestre las zonas donde existe un aumento del recurso energético por efecto de la presencia de la vivienda.

A partir de los resultados obtenidos por la simulación realizada se aprecia que el flujo se separa, provocando zonas donde se aumenta la velocidad del aire debido a la presencia de la vivienda, además se realizan estudios en diferentes planos de la vivienda con el fin de analizar los efectos producidos para cada geometría, se concluye a partir de este análisis que las zonas de aumento de velocidad de flujo son mayores mientras más abrupto es el choque de la superficie con el viento.

Además se presentan los resultados de los factores de concentración de velocidad del aire, donde existe un aumento del 5% de la velocidad del viento alrededor de la vivienda, por causa exclusiva de su geometría.

Finalmente, este estudio concluye con la generación de los criterios de emplazamiento para turbinas eólicas sobre una vivienda urbana, dándole importancia a las zonas donde existe un mayor aprovechamiento del potencial eólico.

Agradecimientos

Agradecer a mis padres y hermanos por el apoyo incondicional que he tenido de su parte ya sea en temas académicos como personales, por la educación que me brindaron, los valores inculcados que me permiten ser la persona que soy actualmente. Gracias por ser los principales motivadores del camino que decidí recorrer como profesional y estar siempre a mi lado.

Agradecer a mi profe guía, Williams Calderón, por guiarme en este periodo de tiempo y sobre todo por ayudarme cuando más lo necesitaba, agradezco su infinita voluntad cuando no me daban los resultados esperados. También agradecer a los profesores Álvaro Valencia y Alejandro Ortiz por aceptar ser partícipes de mi comisión sin dudarlo un instante.

Agradecer al departamento de mecánica, a todos los miembros con quienes compartí y nunca dudaron en prestarme su ayuda, en especial en este último tiempo. Especial agradecimiento a Richard, Benjamín y Sebastián que me ayudaron a sacar adelante este trabajo.

Agradecer a todas las amistades que se formaron en este largo proceso, a la sección 6, al departamento 1305 y compañeros mecánicos que hicieron la vida universitaria más amena y llevadera. Un especial agradecimiento a mis queridos mecánicos; Cristóbal, Sebastián, Erick, Pablo, José, Oscar, Diego, Carlos, Rodolfo, Fernando, Sergio, Sven, Rodrigo, Thomas y al infiltrado Alfredo por todas las aventuras e historias que hemos pasado, por toda la buena onda entregada y por convertirse en una segunda familia para mí

Finalmente agradecer a Rocío, una mujer maravillosa que llegó en el momento más indicado a darme fuerza y amor para terminar este largo trayecto, que aún recién conociéndome ya me retaba y obligaba a rendir con las obligaciones académicas. Por ser mi pilar fundamental para seguir creciendo como persona junto a ella.

Tabla de contenido

Resumen.....	I
Agradecimientos.....	II
Tabla de contenido.....	III
Índice de tablas.....	V
Índice de ilustraciones.....	VI
1. Introducción.....	1
1.1. Motivación.....	1
2. Antecedentes Generales.....	2
2.1. Turbinas Eólicas.....	2
2.1.1. Turbinas Eólicas de Eje Horizontal.....	2
2.1.2. Turbinas Eólicas de Eje Vertical.....	3
2.2. Emplazamiento de Turbinas.....	5
2.3. Historial de Proyectos.....	6
2.4. Definición del Problema.....	7
2.5. Objetivos.....	7
2.5.1. Objetivo General.....	7
2.5.2. Objetivos Específicos.....	7
3. Antecedentes teóricos.....	8
3.1. Capa Límite Atmosférica.....	8
3.1.1. Perfil para baja rugosidad.....	8
3.1.2. Perfil para alta rugosidad.....	9
3.2. Independencia del Número de Reynolds.....	11
3.3. Potencial Eólico.....	12
3.4. Concentración de Flujo en Edificios.....	12
4. Simulaciones computacionales.....	14
4.1. Método de Volúmenes Finitos.....	14
4.2. Homogeneidad Horizontal de la Capa Límite Atmosférica.....	14
4.2.1. Modelo de Turbulencia.....	14
4.3. Consideraciones para Flujos en Ambientes Urbanos.....	16
4.3.1. Dimensiones del dominio.....	16

4.3.2.	Condiciones de Borde.....	17
4.3.3.	Mallado.....	20
4.3.4.	Criterio de Convergencia.....	22
5.	Metodología.....	23
5.1.	Definición del Problema.....	23
5.2.	Recurso Eólico.....	23
5.3.	Descripción de la Arquitectura.	25
5.4.	Dinámica de Fluidos Computacionales.....	26
5.4.1.	Definición del Dominio Computacional.	26
5.4.2.	Método de Solución.	28
5.4.3.	Condiciones de Borde.	29
5.4.4.	Mallado.....	31
5.4.5.	Homogeneidad Horizontal de la Capa Límite Atmosférica.	31
5.4.6.	Validación del Método de Solución.	31
5.4.7.	Visualización de Resultados.....	31
5.5.	Análisis de Resultados.	32
6.	Resultados.....	33
6.1.	Recurso Eólico.....	33
6.1.1.	Resultados del Explorador Eólico.....	33
6.1.2.	Resultados de la Estación Meteorológica.	34
6.1.3.	Análisis de Resultados.	34
6.2.	Resultados Computacionales.....	35
6.2.1.	Mallado.....	35
6.2.2.	Validación Homogeneidad Horizontal de la Capa Límite Atmosférica.....	38
6.2.3.	Validación Método de Solución.....	39
6.2.4.	Resultados de Simulaciones en Vivienda.	42
6.2.5.	Análisis de Resultados.	50
6.3.	Criterios de Emplazamiento.....	52
7.	Conclusiones.....	53
	Bibliografía.....	55

Índice de tablas

Tabla 2-1 Resumen línea investigativa.....	6
Tabla 3-1 Valores típicos del largo de rugosidad z_0 Fuente: [4]	9
Tabla 3-2 Valores típicos de los parámetros de la ley logarítmica con alta rugosidad. Fuente:[3].	10
Tabla 4-1 Valores de las constantes para modelo turbulencia $k - \epsilon$ Fuente: elaboración propia.	16
Tabla 4-2Valores de Skewness con su respectiva calidad de malla. Fuente: [14].	20
Tabla 5-1 Especificaciones de la estación meteorológica del DGF, U. de Chile. Fuente: [16].	24
Tabla 5-2 Resumen dimensiones geometría vivienda.	27
Tabla 5-3 Resumen de condiciones de borde.	30
Tabla 6-1 Resumen de los principales valores de la malla.	38
Tabla 6-2 Comparación entre los distintos largos específicos del fluido para diferentes fuentes. Fuente: [12].	41

Índice de ilustraciones

Ilustración 1-1 Potencia global eólica acumulada de 1996 a 2012. Fuente GWEC.	1
Ilustración 2-1. Turbina eólica de eje horizontal. Fuente: windpowernews.	2
Ilustración 2-2. Tipos de VAWTs. A la izquierda turbina tipo Savonius, centro turbina tipo Darrieus con perfiles oblicuos y derecha turbina tipo Darrieus con perfiles rectos.	3
Ilustración 2-3. Esquema Turbina eólica tipo Savonius. Fuente: Wikipedia.	4
Ilustración 2-4. Distintos tipos de Turbinas Eólicas tipo Darrieus. Fuente: ecosources.info.	4
Ilustración 2-5. Impresiones artísticas de BAWTs. De izquierda a derecha: sobre edificio, entre edificios con forma aerodinámica y a través del edificio. Fuente: [3].	5
Ilustración 3-1 Esquema del perfil de la velocidad horizontal promedio como función de la altura z. Fuente [3].	9
Ilustración 3-2 Esquema del perfil de la velocidad horizontal promedio en la capa límite atmosférica desarrollada sobre una ciudad. Fuente: [3].	10
Ilustración 3-3 Esquema que representa el efecto que tiene un obstáculo frente a un flujo. Fuente:[7].	12
Ilustración 4-1 Perfiles para condición de borde de entrada. Fuente: Matlab, elaboración propia.	18
Ilustración 4-2 Cuadrilateros y triángulos ideales y con altos valores de skewness. Fuente: [14].	20
Ilustración 4-3 Vectores utilizador para el cálculo de la calidad ortogonal de una celda. Fuente: [14].	21
Ilustración 5-1 Elevación vivienda a estudiar. Vista A. Fuente: Nicolás del Río.	25
Ilustración 5-2 Elevación vivienda a estudiar. Vista B. Fuente: Nicolás del Río.	26
Ilustración 5-3 Elevación vivienda a estudiar. Vista C. Fuente: Nicolás del Río.	26
Ilustración 5-4 Geometría de la vivienda. Vista 1. Fuente: ANSYS 14.5.	27
Ilustración 5-5 Geometría de la Vivienda. Vista 2. Fuente ANSYS 14.5.	27
Ilustración 5-6 Representación del dominio computacional. Fuente: ANSYS 14.5.	28
Ilustración 6-1 Obtención del recurso eólico promedio anual para una altura de 5.5m. Región Metropolitana. Fuente: explorador de energía eólica del Ministerio de Energía.	33
Ilustración 6-2 Gráfico del Recurso eólico promedio en Santiago año 2012.	34
Ilustración 6-3 Gráfico del Recurso eólico promedio en Santiago año 2013.	34
Ilustración 6-4 Esquema de la vivienda en el dominio computacional. Fuente: ANSYS 14.5.	36
Ilustración 6-5 Esquema mallado en el plano y-z. Fuente: ANSYS 14.5.	36
Ilustración 6-6 Esquema del mallado de la vivienda 1. Fuente: ANSYS 14.5.	37
Ilustración 6-7 Esquema del mallado de la vivienda 2. Fuente: ANSYS 14.5.	37
Ilustración 6-8 Esquema del mallado de la vivienda 3. Fuente: ANSYS 14.5.	37
Ilustración 6-9 Perfiles de entrada y salida dentro de un dominio vacío. Se nombran de izquierda a derecha: $u(z)$, $k(z)$ y $e(z)$. Fuente: Matlab, elaboración propia.	38
Ilustración 6-10 Líneas de corriente de velocidad del viento sobre un cubo para plano central (izquierda) y plano del suelo (derecha). Fuente:[12].	39
Ilustración 6-11 Resultados obtenidos para validación del método de solución. Plano central.	40
Ilustración 6-12 Resultados obtenidos para validación del método de solución. Plano referente al suelo.	41

Ilustración 6-13 Isosuperficie y contorno de velocidad para $C_v=1,05$ y $u^*=0,3$. Fuente: ANSYS 14.5.	43
Ilustración 6-14 Contorno del factor de concentración para el plano 1 con $u^*=0,3$. Fuente: ANSYS 14.5.	43
Ilustración 6-15 Contorno del factor de concentración para el plano 2 con $u^*=0,3$. Fuente: ANSYS 14.5.	44
Ilustración 6-16 Contorno del factor de concentración para el plano 3 con $u^*=0,3$. Fuente: ANSYS 14.5.	44
Ilustración 6-17 Contorno y vectores de velocidad para el plano 1 con $u^*=0,3$. Fuente: ANSYS 14.5.	45
Ilustración 6-18 Contorno y vectores de velocidad para el plano 2 con $u^*=0,3$. Fuente: ANSYS 14.5.	45
Ilustración 6-19 Contorno y vectores de velocidad para el plano 3 con $u^*=0,3$. Fuente: ANSYS 14.5.	46
Ilustración 6-20 Isosuperficie y contorno de velocidad para $C_v=1,05$ y $u^*=0,6$. Fuente: ANSYS 14.5.	47
Ilustración 6-21 Contorno del factor de concentración para el plano 1 con $u^*=0,6$. Fuente: ANSYS 14.5.	47
Ilustración 6-22 Contorno del factor de concentración para el plano 2 con $u^*=0,6$. Fuente: ANSYS 14.5.	48
Ilustración 6-23 Contorno del factor de concentración para el plano 3 con $u^*=0,6$. Fuente: ANSYS 14.5.	48
Ilustración 6-24 Contorno y vectores de velocidad para el plano 1 con $u^*=0,6$. Fuente: ANSYS 14.5.	49
Ilustración 6-25 Contorno y vectores de velocidad para el plano 2 con $u^*=0,6$. Fuente: ANSYS 14.5.	49
Ilustración 6-26 Contorno y vectores de velocidad para el plano 3 con $u^*=0,6$. Fuente: ANSYS 14.5.	50

1. Introducción

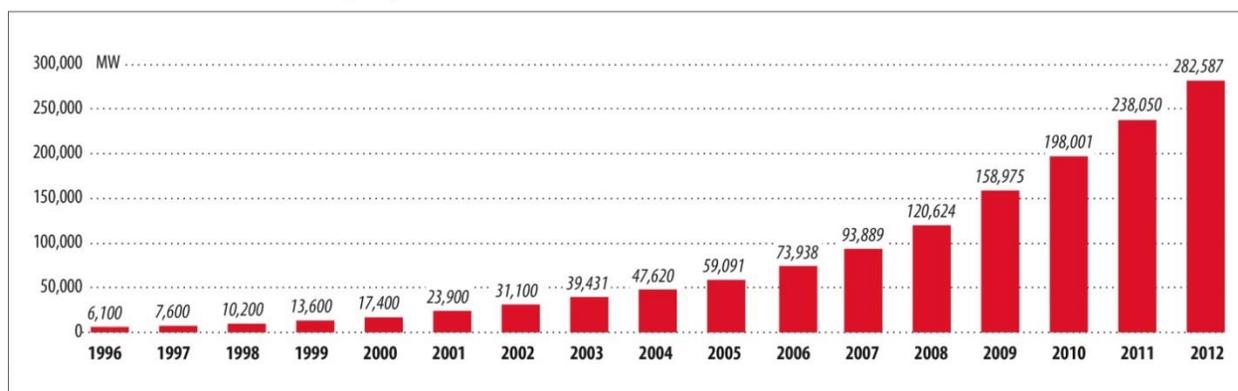
1.1. Motivación

Con el creciente aumento de la demanda energética mundial y la contaminación que conlleva la producción de esta, se provoca un auge en el desarrollo de fuentes de generación de energía limpia y renovable.

La energía eólica es una fuente alternativa de bajo impacto ambiental que puede ayudar a solucionar la problemática presente a nivel energético. Esta corresponde a la producción de energía eléctrica o mecánica, a partir de la energía cinética generada por efecto de las grandes corrientes de aire.

En la actualidad, la producción de energía eléctrica a partir de energía eólica ha tenido una gran alza debido a los grandes avances tecnológicos y a la relevancia que se le ha dado. A finales de 2012, la capacidad mundial de los generadores eólicos fue cercana a los 282GW. (Ver Ilustración 1-1)

Global Cumulative Installed Wind Capacity 1996-2012



Source: GWEC

Ilustración 1-1 Potencia global eólica acumulada de 1996 a 2012. Fuente GWEC.

2. Antecedentes Generales.

2.1. Turbinas Eólicas.

Una turbina eólica es un sistema mecánico que transforma la energía cinética del viento en energía mecánica, que puede ser usada directamente en trabajo útil o bien, ser transformada en energía eléctrica. A través de la historia esta energía mecánica se utilizaba para la molienda y el levantamiento de aguas, a partir del siglo XX se comenzó a utilizar turbinas para la generación de potencia eléctrica. Actualmente, se clasifican en dos grandes familias según la disposición de su eje, las turbinas de eje horizontal (HAWTs, Horizontal Axis Wind Turbine) y de eje vertical (VAWTs, Vertical Axis Wind Turbine).

2.1.1. Turbinas Eólicas de Eje Horizontal.

Las turbinas de eje horizontal son el tipo más conocido y en la que se han centrado más en su diseño e investigación, constituyen la mayoría de la capacidad eléctrica instalada actualmente. Su principal característica radica en que su eje de rotación se encuentra paralelo al suelo y a la dirección del viento (ver Ilustración 2-1).

En general, están compuestas por alabes (usualmente 3) con forma de perfiles alares, los cuales generan el torque y giro a partir del viento que pasa a través de ellos. Suelen estar ubicados a grandes alturas para un mejor aprovechamiento de las corrientes y evitar la presencia de turbulencias, debido a esto, se dificulta bastante la mantención de sus componentes [1]. Cabe destacar que la turbina debe estar orientada según la dirección del viento, ya que si no ocurre lo anterior, no se obtienen las potencias esperadas.



Ilustración 2-1. Turbina eólica de eje horizontal. Fuente: windpowernews.

2.1.2. Turbinas Eólicas de Eje Vertical.

Las turbinas eólicas de eje vertical se caracterizan por tener su rotor de forma perpendicular al piso, al igual que el vector de giro. A diferencia de las HAWTs, estas no necesitan estar ubicadas en altura, desaprovechando las grandes corrientes existentes, por lo que resulta más fácil su mantenimiento. Otro aspecto importante es que no necesitan ser direccionadas, ya que los álabes al estar en posición vertical aceptan vientos de cualquier dirección, además de que no generan altos niveles de ruido, lo que la hacen amigables para entornos urbanos. Como principales desventajas se encuentran los problemas de partida que posee, por lo que en ocasiones se necesitan de sistemas externos para entrar en funcionamiento. Además, poseen una menor eficiencia frente a turbinas de eje horizontal frente a iguales condiciones. [1]

Dentro de las turbinas de eje vertical existen dos grandes tipos: las de tipo Savonius y las de tipo Darrieus (ver Ilustración 2-2). A continuación se detallan las características de ambos.

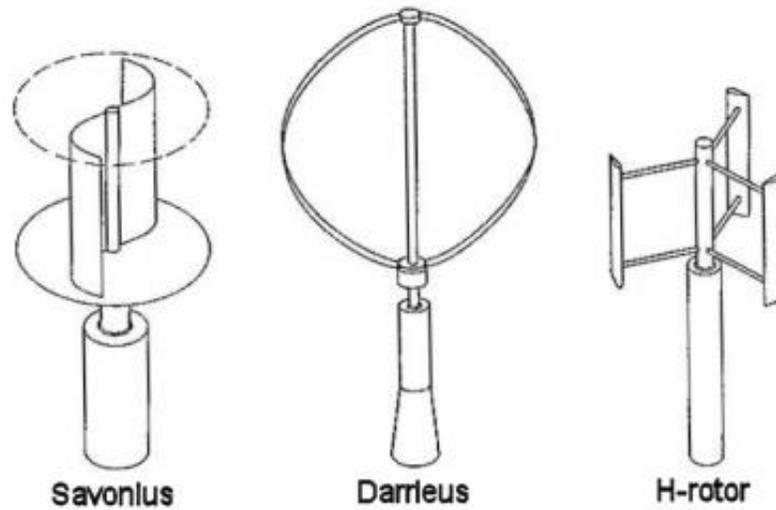


Ilustración 2-2. Tipos de VAWTs. A la izquierda turbina tipo Savonius, centro turbina tipo Darrieus con perfiles oblicuos y derecha turbina tipo Darrieus con perfiles rectos.

2.1.2.1. Turbinas Eólicas tipo Savonius.

Son turbinas de eje vertical que fueron inventadas por el ingeniero finlandés Sirgurd J Savonius. Funcionan gracias a la fuerza de arrastre que se ejerce sobre esta. La turbina Savonius se compone de dos cucharas o aspas unidas a un eje central (ver Ilustración 2-3). Dada su curvatura, las cucharas experimentan menor arrastre cuando se mueven en contra del viento, que cuando se mueven a favor de este. Debido a su tipo, la extracción de potencia que tiene es baja en comparación con turbinas movidas por sustentación. [2]

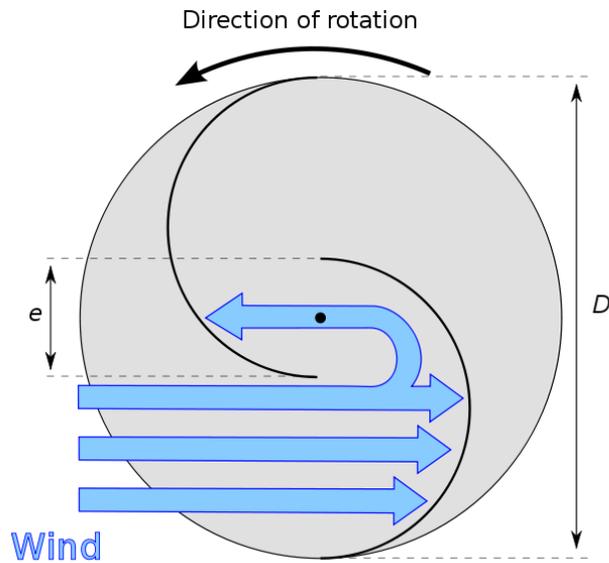


Ilustración 2-3. Esquema Turbina eólica tipo Savonius. Fuente: Wikipedia.

2.1.2.2. Turbinas Eólicas tipo Darrieus.

Las turbinas tipo Darrieus fueron patentadas por el ingeniero francés George Jean Marie Darrieus. Este tipo de turbinas giran gracias a la sustentación (lift) que genera su perfil en contacto con el fluido. Las turbinas tipo Darrieus poseen álabes en forma de perfiles alares, al igual que las turbinas de eje horizontal, pero estos se conectan a un eje vertical. Los álabes pueden ser rectos o curvos en forma de batidora de huevo (ver Ilustración 2-4) (también llamada troposkein, del griego “cuerda girante”), la cual fue la configuración original propuesta por Darrieus, aunque posteriormente propuso perfiles de álabes rectos reduciendo los esfuerzos flexionantes en estos. [2]

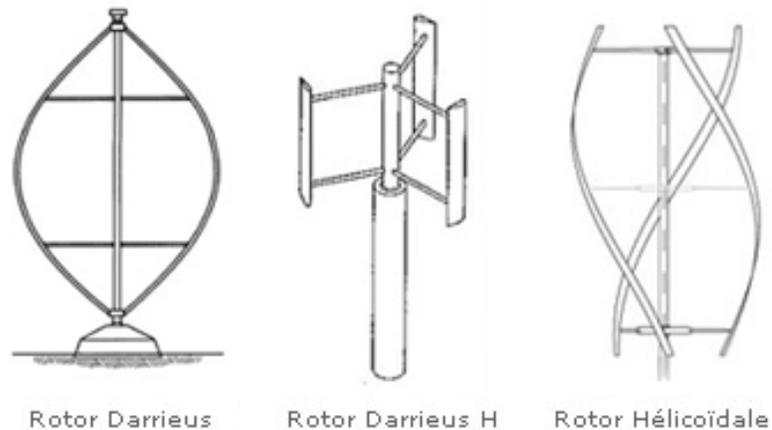


Ilustración 2-4. Distintos tipos de Turbinas Eólicas tipo Darrieus. Fuente: ecosources.info.

Teóricamente, estas turbinas podrían llegar a velocidades y eficiencias muy altas, incluso acercándose al límite de Betz, es decir, llegar a extraer la máxima energía cinética que proviene del viento. Existen pocos estudios relacionados con este tipo de turbinas debido a que en el pasado se realizaron experimentos con esta tecnología los cuales fallaron debido a fatiga. Hoy en día, se han construido varias turbinas Darrieus que han sido capaces de resistir las cargas por fatiga por lo que se ha vuelto al estudio de esta tecnología.

2.2. Emplazamiento de Turbinas

La velocidad promedio del viento en áreas rurales es considerablemente mayor que en espacios urbanos. Sin embargo, cerca de construcciones se pueden encontrar velocidades de viento muy alta, debido a la aceleración que toma el fluido al pasar por un obstáculo. Estas zonas donde la concentración de energía eólica es mayor, son sitios propicios para la instalación de turbinas eólicas. De esta idea, nace el concepto de las turbinas eólicas aumentadas por edificios (o BAWTs, por su nombre en inglés Building-Augmented Wind Turbine). [3]

Existen 3 configuraciones típicas de BAWTs (ver Ilustración 2-5), la cuales se distinguen a partir de su principio de operación aerodinámica:

- Turbina eólica en el tejado o por el borde del edificio.
- Turbina eólica entre edificios con forma aerodinámica.
- Turbina eólica a través del edificio

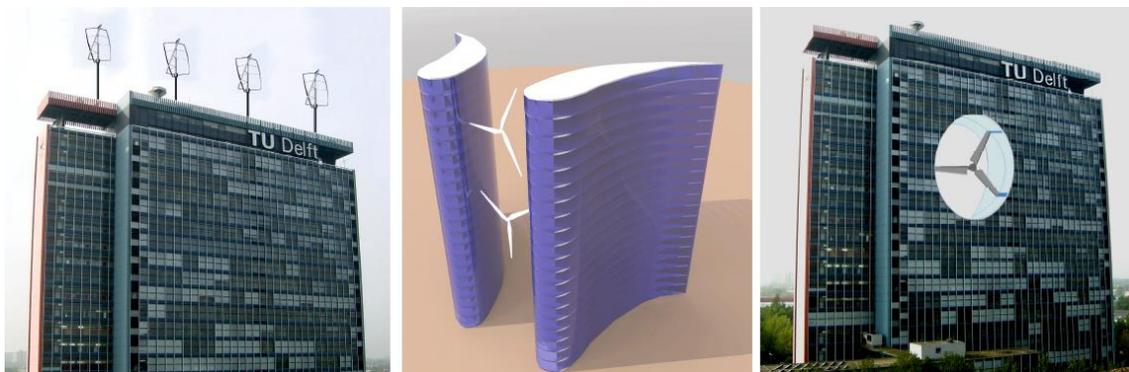


Ilustración 2-5. Impresiones artísticas de BAWTs. De izquierda a derecha: sobre edificio, entre edificios con forma aerodinámica y a través del edificio. Fuente: [3].

En el presente sólo se considerará la opción de turbinas eólicas cerca (tejado o borde) de la construcción debido a que las otras alternativas no se pueden aplicar a viviendas urbanas ya que estas ya existen y no cumplen con los requisitos necesarios para su implementación.

2.3. Historial de Proyectos

Dentro del departamento de Ingeniería civil mecánica de la Universidad de Chile se ha desarrollado un programa de diferentes investigaciones en torno a las energías renovables no convencionales, específicamente el estudio de turbinas eólicas de eje vertical de pequeña y mediana escala para micro-generación.

Esta línea investigativa comenzó hace sólo dos años y ya cuenta con un total de cuatro investigaciones terminadas (ver Tabla 2-1), el presente corresponde a la quinta investigación de la línea. Hoy en día, la investigación de las turbinas eólicas de eje vertical no está acabada, por lo que se continúan generando temas de investigación al respecto.

A continuación se presentan los temas que hasta la fecha están terminados con sus respectivos autores y año de titulación.

Tabla 2-1 Resumen línea investigativa.

Título	Autor	Año de titulación
Desempeño aerodinámico de turbinas eólicas de eje vertical en función de temperatura de superficie de álabe.	Celso Rangel Thomaz Junior	2012
Emplazamiento de turbinas eólicas urbanas y potencial energético disponible según la distribución de edificaciones.	Benjamín Herrmann Priesnitz	2014
Determinación de cargas y momentos aerodinámicos en el álabe de una turbina eólica tipo Darrieus de pequeña escala.	Diego Sepúlveda Ávila	2014
Diseño estructural de una turbina de eje vertical de bajo costo para aplicaciones urbanas.	Pablo Apaoblaza Augsburger	2014

Además el departamento cuenta con un prototipo de una turbina eólica de eje vertical realizada a bajo costos con materiales domésticos, el cual está en proceso de pruebas. Se propone una versión final de este con los mismos materiales y con mejoras en el sistema de sujeción y generación.

2.4. Definición del Problema

El problema a resolver en este trabajo de título es encontrar regiones de concentración de flujo en una vivienda urbana para la elaboración de criterios de emplazamiento de un aerogenerador. Esto consiste en realizar simulaciones, mediante el método de volúmenes finitos, del flujo de viento sobre una vivienda en particular, con ello se estudia la velocidad del viento alrededor de esta y se determinan las zonas de aumento de concentración a partir de un factor previamente definido. Finalmente se realiza un estudio de los resultados obtenidos para determinar criterios generales de emplazamiento, que permitan la instalación de aerogeneradores en cualquier vivienda urbana, sin importar su geometría.

2.5. Objetivos

A continuación se presentan tanto objetivos generales como específicos para el desarrollo de este trabajo de título.

2.5.1. Objetivo General.

El objetivo general es realizar un análisis fluido dinámico para determinar criterios de emplazamiento de un generador eólico de eje vertical de pequeña escala en una vivienda urbana.

2.5.2. Objetivos Específicos.

Para hacer efectivo el objetivo principal, es necesario tener y cumplir con los siguientes objetivos específicos, los cuales son:

- Definición de un coeficiente analítico para determinar regiones de mayor potencial energético.
- Obtención del campo de velocidades a partir de simulaciones computacionales sobre una vivienda en particular.
- Implementación del coeficiente analítico sobre los resultados obtenidos y posterior análisis.

3. Antecedentes teóricos

3.1. Capa Límite Atmosférica.

La capa límite atmosférica, o también llamada capa atmosférica planetaria, corresponde a la capa de atmósfera más baja y su comportamiento se ve influenciado directamente por la superficie de la tierra. En esta sección ocurre la transferencia de calor desde la superficie al fluido, además su existencia requiere grandes cambios verticales en los grandes flujos, desde grandes velocidades hasta valores de prácticamente cero debido a la fricción presente en la superficie terrestre, provocando así que el fluido sea predominantemente turbulento. [4]

3.1.1. Perfil para baja rugosidad.

La turbulencia mecánica es la principal fuerza impulsora en la capa límite atmosférica para una velocidad media de viento de 6m/s a 10 m de altura. A partir de esta velocidad, el efecto turbulento predomina en la capa límite atmosférica y los efectos de la temperatura pueden no ser tomados en cuenta. [3]

Se 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.

En la ecuación (3.1) se presenta $u(z)$ como la velocidad promedio a la altura z , u_o es la velocidad de fricción, κ es la constante de von Kármán que es tomada como $\kappa = 0,4$, z es la altura sobre la pared y z_o corresponde a la longitud de rugosidad de la superficie. El término referente a la velocidad de fricción u_o se relaciona con el esfuerzo de corte en el suelo τ_w y la densidad del fluido ρ mediante la ecuación (3.2).

$$u(z) = \frac{u_o}{\kappa} \ln \frac{z}{z_o} \quad z \geq z_o \quad (3.1)$$

$$u_o = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.2)$$

De esta forma $u(z)$ es aplicable a partes donde el flujo se encuentra cercano a la pared, se ha usado generalmente para el cálculo de del perfil de velocidad promedio de la capa límite atmosférica, esto sólo es válido para alturas de hasta 150m con vientos fuertes.[4]

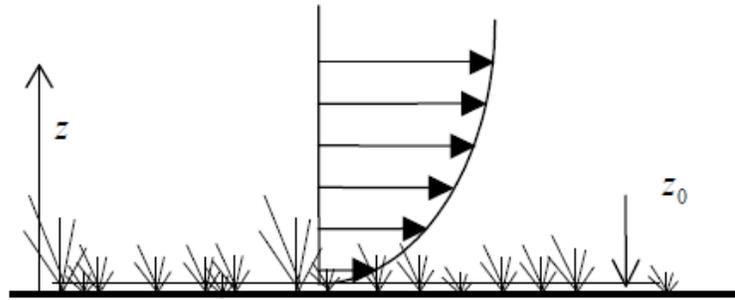


Ilustración 3-1 Esquema del perfil de la velocidad horizontal promedio como función de la altura z . Fuente [3].

El parámetro z_0 representa el tamaño de los torbellinos en la superficie. Claramente, entre más áspero es el suelo, más grandes serán los torbellinos, por lo que z_0 es una medida de rugosidad de la superficie. Por lo general los valores se toman a partir de mediciones realizadas y estos van desde los 0,01cm en el agua o hielo hasta a los varios metros en caso de casas edificios. Este valor no sólo depende de la altura de los obstáculos, sino que también de la separación de estos. En la Tabla 3-1 se entrega una lista de valores típicos de largo de rugosidad z_0 . [4]

Tabla 3-1 Valores típicos del largo de rugosidad z_0 Fuente: [4]

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

3.1.2. Perfil para alta rugosidad

Para modelar la capa límite atmosférica sobre una ciudad es necesario modificar la ley logarítmica para considerar la alta rugosidad presente. 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 Ilustración 3-2).

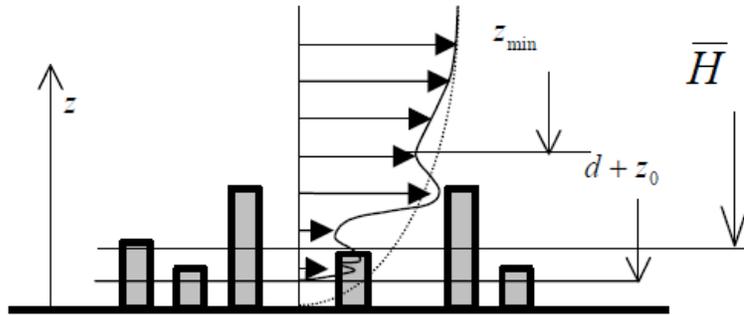


Ilustración 3-2 Esquema del perfil de la velocidad horizontal promedio en la capa límite atmosférica desarrollada sobre una ciudad. Fuente: [3].

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

$$u(z) = \frac{u_o}{\kappa} \ln \frac{z - d}{z_o} \quad z \geq z_{min} \quad (3.3)$$

La ecuación (3.3) sirve para estimar la velocidad del viento muy por sobre los elementos urbanos, para velocidades cercanas el comportamiento es más complejo y se requiere de un enfoque diferentes. En la Tabla 3-2 se muestran valores típicos de los parámetros para la ley logarítmica con alta rugosidad. [3]

Tabla 3-2 Valores típicos de los parámetros de la ley logarítmica con alta rugosidad. Fuente:[3].

Parámetro	Valor típico para una ciudad (m)
\bar{H}	25
d	23
z_0	0,8
z_{min}	35

La ecuación (3.3) y la Tabla 3-2 se deben utilizar con especial cuidado. Se basan en ecuaciones semi-empíricas y muy básicas para modelar la complejidad de los fenómenos físicos de un flujo en un ambiente urbano. Su uso es bastante restringido.

3.2. 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 y se define de la siguiente manera:

$$Re = \frac{\rho u_{\infty} D}{\mu} \quad (3.4)$$

En la ecuación (3.4), 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. Para valores bajos del número de Reynolds se dice que las fuerzas viscosas dominan por sobre las fuerzas inerciales, en cambio para número de Reynolds altos se dice que las fuerzas inerciales dominan por sobre las viscosas.

A. Townsend [5] sugirió que un flujo turbulento, donde los efectos térmicos y de Coriolis no son importantes, las estructuras encontradas son similares para números de Reynolds suficientemente altos. La viscosidad tiene muy poco efecto sobre el comportamiento global del movimiento del fluido, por la dominancia de las fuerzas inerciales. Las excepciones son las siguientes:

- Estructuras turbulentas pequeñas involucradas en 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”, donde se determinó que para números superiores a 30.000 no ocurren cambios en las estructuras del flujo.

En el ambiente a estudiar, se tiene que la densidad del aire es de $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$, su viscosidad dinámica es $\mu = 1,789 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$ y las velocidades del viento varían desde $1 - 10 \text{ m/s}$. Luego, considerando un valor de $D = 1 \text{ m}$ tenemos que el número de Reynolds toma un valores de entre $6,8 \times 10^4 - 6,8 \times 10^5$, valores por encima de la condición de similaridad.

3.3. Potencial Eólico.

En la literatura sobre energía eólica, se pueden encontrar diferentes fórmulas para cálculo del potencial eólico en las cuales todas toman como punto de partida la consideración de la potencia que puede ser obtenida del viento por una turbina, mediante la siguiente ecuación (3.5):

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3.5)$$

Donde P es la potencia en Watts, ρ es la densidad del aire en kg/m^3 , A es el área de estudio en m^2 y v es la velocidad del viento en m/s . [6]

Se puede observar que la potencia es directamente proporcional al área de barrido del rotor, lo que explica las grandes dimensiones de las turbinas hoy en día. La velocidad del viento elevada al cubo afecta directamente a la potencia, lo que lo convierte en el factor más relevante de analizar para aprovechamiento de potencia, asimismo, la velocidad del viento depende de varios factores.

3.4. Concentración de Flujo en Edificios.

Cuando el flujo de viento se encuentra con un obstáculo este lo esquivo provocando con ello una alteración local alrededor del edificio. Se genera un desprendimiento de la capa límite aguas arriba y sobre el edificio y una zona de vórtices aguas abajo, a partir de esto, se generan zonas de recirculación alrededor del obstáculo [7]

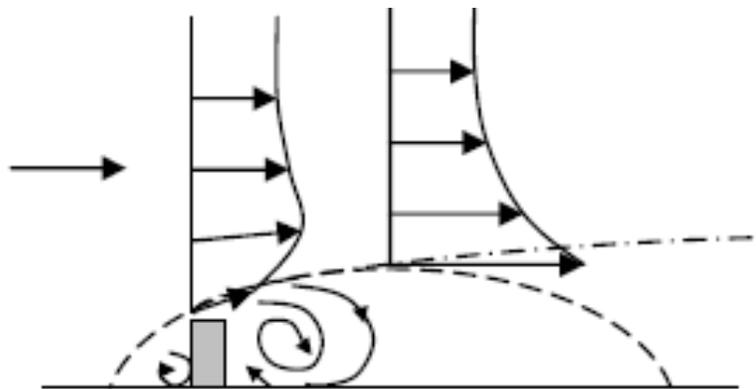


Ilustración 3-3 Esquema que representa el efecto que tiene un obstáculo frente a un flujo. Fuente:[7].

El obstáculo actúa como un concentrador de flujo, provocando variaciones en la velocidad del flujo libre independiente del número de Reynolds [3]. Esta concentración

se puede cuantificar definiendo un factor de concentración de viento C_v , el cual relaciona la velocidad del flujo en la zona con la velocidad del fluido libre a la altura correspondiente.

$$C_v = \frac{u}{u_\infty} \quad (3.6)$$

Se define la ecuación (3.6), donde u es la velocidad local afectada por el edificio y u_∞ representa la velocidad del flujo libre a la altura correspondiente, la cual puede ser calculada a partir de la ecuación (3.1).

4. Simulaciones computacionales

4.1. Método de Volúmenes Finitos.

El método de volúmenes finitos resuelve los fenómenos físicos dominantes la dinámica de fluidos. Esto quiere decir que se intenta resolver las ecuaciones para cada magnitud física presente en el problema, para ello, se debe tomar un dominio de control y se divide en múltiples volúmenes no traslapados. Luego se resuelve la ecuación de transporte para cada volumen de control.

La ecuación (4.1) corresponde a la ecuación integral de transporte para un volumen de control. Describe todos los mecanismos de transporte de una propiedad física ϕ en un fluido de densidad ρ . El primer término de la izquierda representa las variaciones temporales de ϕ dentro del volumen de control (VC), el siguiente 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 la superficie de control y el último término representa al término de fuente, que corresponde a la integral de campo de S_ϕ en el volumen de control.

$$\frac{\delta}{\delta t} \iiint_{VC} (\rho\phi) dV + \iint_{SC} (\rho\vec{v}) \cdot d\vec{S} = \iint_{SC} (\Gamma_\phi \vec{\nabla}\phi) \cdot d\vec{S} + \iiint_{VC} S_\phi dV \quad (4.1)$$

El método discretiza la ecuación (4.1) para cada volumen finito generando un sistema de ecuación por cada volumen de control. Ajustando buenas condiciones de borde y condiciones iniciales para el caso transiente se pueden obtener buenas aproximaciones que luego por medio de interpolación se puede extender a todo el dominio. [8]

4.2. Homogeneidad Horizontal de la Capa Límite Atmosférica.

Para modelar flujos en ambientes urbanos, es importante lograr modelar en CFD la llamada homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica (HHABL por sus siglas en inglés, Horizontal Homogeneity of the Atmospheric Boundary Layer) [9]. Esto significa, en otras palabras, que los perfiles de flujo que se imponen en la entrada, tales como la velocidad y la energía cinética turbulenta deben mantenerse a través de un dominio sin presencia de obstáculos.

4.2.1. Modelo de Turbulencia.

El modelo de turbulencia $k - \epsilon$ estándar y sus variantes es el modelo más utilizado en la ingeniería del viento computacional (CWE por sus siglas en inglés, Computational

Wind Engineering) [9]. La ecuación tridimensional del modelo de turbulencia $k - \epsilon$ estándar está dado por:

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho k) + \frac{\delta}{\delta x_j}(\rho k u_j) = \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \left(\frac{\delta k}{\delta x_j} \right) \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (4.2)$$

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho \epsilon) + \frac{\delta}{\delta x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \left(\frac{\delta \epsilon}{\delta x_j} \right) \right] + C_{1\epsilon} \left(\frac{\epsilon}{k} \right) P_k - C_{2\epsilon} \rho \left(\frac{\epsilon^2}{k} \right) \quad (4.3)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, k y ϵ son la energía cinética turbulenta y su tasa de disipación respectivamente. P_k es la producción de energía cinética turbulenta, la cual se expresa como:

$$P_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \left(\frac{\delta u_j}{\delta x_i} \right) \quad (4.4)$$

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\delta u_i}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \left(\frac{\delta u_k}{\delta x_k} \right) \right) \delta_{ij} \quad (4.5)$$

En la ecuación (4.4) tenemos que u_j y u'_j son la velocidad media y sus fluctuaciones en la dirección x_j respectivamente. La ecuación (4.5) representa la hipótesis de Boussinesq para modelar los esfuerzos de Reynolds $-\rho \overline{u'_i u'_j}$. La velocidad turbulenta en el modelo $k - \epsilon$ estándar viene dada por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \left(\frac{k^2}{\epsilon} \right) \quad (4.6)$$

Las ecuaciones (4.2), (4.3) y (4.6) poseen 5 constantes ajustables C_μ , σ_k , σ_ϵ , $C_{1\epsilon}$ y $C_{2\epsilon}$. Los valores de estas constantes fueron obtenidos a partir de ajustes experimentales para un amplio espectro de flujos turbulentos. A continuación se presenta en la Tabla 4-1 un resumen que denota los valores que son entregados por defecto por el Software ANSYS FLUENT que son válidas para un gran espectro de flujos turbulentos, como lo son capa límite, capas de mezcla y jets turbulentos. Además se muestran los valores ajustados para que se cumpla de mejor manera la condición de HHABL realizado por Yang et al. [9]

Tabla 4-1 Valores de las constantes para modelo turbulencia $k - \epsilon$ Fuente: elaboración propia.

Constante	Valor por defecto	Valor según Yang et al [9]
C_μ	0,09	0,028
σ_k	1	1,67
σ_ϵ	1,3	2,51
$C_{1\epsilon}$	1,44	1,5
$C_{2\epsilon}$	1,92	1,92

4.3. Consideraciones para Flujos en Ambientes Urbanos.

4.3.1. Dimensiones del dominio.

Para realizar una simulación numérica del flujo de aire en un ambiente urbano es importante que las dimensiones del dominio computacional no interfieran las condiciones de borde con los efectos de las estructuras en el fluido. Es necesario además lograr la homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica. Se recomienda la utilización de cuboides, cuyo tamaño depende exclusivamente del área que se desea representar y las extensiones del dominio. [10]

4.3.1.1. Extensión vertical del dominio.

La extensión vertical debe ser lo suficientemente alta para no modificar el flujo sobre la vivienda, ya que la mayoría de las condiciones de borde que se usan en la parte superior no permiten la salida de fluido. Se sugiere una extensión vertical que depende de la tasa de bloqueo, donde el bloqueo se define como la relación del área proyectada del obstáculo en la dirección del flujo a la sección del dominio transversal al flujo, que varía entre $4H$ y $10H$, donde H es la altura máxima del obstáculo [10]. Además, considerando la homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica (HHABL) se debe tener una extensión vertical tal que el perfil de viento, obtenido en la ecuación (3.1), quede totalmente desarrollado.

4.3.1.2. Extensión lateral del dominio.

Esta distancia determina la separación entre las paredes del dominio paralelas a la dirección del flujo y el área urbana que se desea modelar. La extensión del dominio debe ser escogida para cumplir con el porcentaje de bloqueo máximo requerido. Para casos en donde la extensión lateral es mucho más grande que la altura, el bloqueo también debe estar por debajo del máximo permitido, similar a la relación correspondiente a la extensión vertical del dominio. [10]

4.3.1.3. Extensión del dominio en la dirección del flujo

Esta extensión del dominio se debe dividir en dos regiones, la primera región es la aproximación del fluido (aguas arriba) y la segunda es la estela (aguas abajo). Para la primera región la extensión depende de si se conoce o no la forma del perfil desarrollado de la capa límite atmosférica. Si los perfiles no son conocidos, debe dejarse una separación de $8H$ entre la entrada del dominio y el área de estudio. Si se tienen los perfiles, basta con una distancia de $2H$ si el porcentaje de bloqueo de bajo. Para la extensión aguas abajo se recomienda una distancia de $15H$ para que se restablezca el flujo luego de la estela, esto se debe porque generalmente se usa una condición de salida de flujo desarrollado. [10]

4.3.2. Condiciones de Borde

Las condiciones de borde representan la influencia de los alrededores que se han cortado por el dominio computacional. La determinación de las condiciones es muy importante para obtener buenos resultados computacionales, ya que estas determinan en gran medida las soluciones del interior del dominio. A menudo, las condiciones de contorno no son totalmente conocidos, por lo tanto, estos límites deben estar lo suficientemente lejos de la región de interés para que la solución no se vea contaminada por las aproximaciones realizadas. [10]

4.3.2.1. Condición de borde de entrada.

La condición de borde de entrada es fundamental, ya que en esta se imponen los perfiles de velocidad, energía cinética de turbulencia y la tasa de disipación turbulenta, tales que se cumpla la condición de la homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica (HHABL). Los perfiles de entrada deben permanecer invariantes para un dominio sin obstáculos.

La velocidad del viento $u(z)$ viene dada por la forma del perfil de capa atmosférico para ambientes rurales, vista en la ecuación (3.1), desplazada para que $z=0$ coincida con el cero del dominio.

$$u(z) = \frac{u_0}{\kappa} \ln \frac{z + z_0}{z_0} \quad (4.7)$$

Para los perfiles de energía cinética de turbulencia $k(z)$ y tasa de disipación turbulenta $\epsilon(z)$ se usan las siguientes expresiones:[9] [11]

$$k(z) = \frac{u_0^2}{\sqrt{C_\mu}} \sqrt{C_1 \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) + C_2} \quad (4.8)$$

$$\epsilon(z) = \frac{u_0^3}{\kappa(z + z_0)} \sqrt{C_1 \ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right) + C_2} \quad (4.9)$$

En las ecuaciones (4.8) y (4.9), C_1 y C_2 son constantes que se deben ajustar junto con las demás constantes del modelo de turbulencia $k - \epsilon$ estándar. Para los valores propuestos por Yang et al [9] las constantes se ajustan a:

$$C_1 = -0,17$$

$$C_2 = 1,62$$

Con estos valores se entregan las condiciones de entrada necesarias para que se cumpla la HHABL [9] [11] [12]. A continuación en la Ilustración 4-1 se presentan los perfiles de entrada para $u_0 = 0,5$.

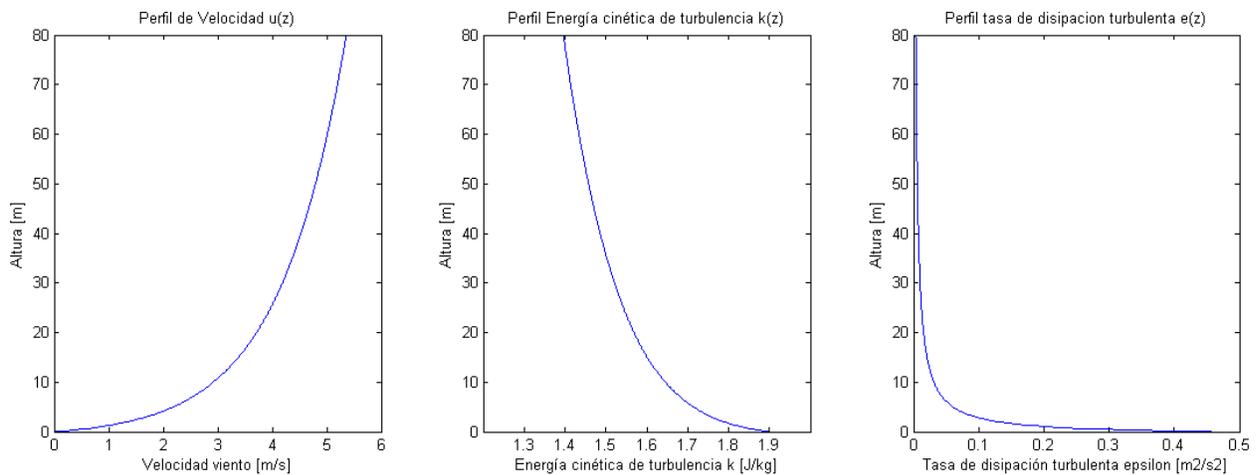


Ilustración 4-1 Perfiles para condición de borde de entrada. Fuente: Matlab, elaboración propia.

4.3.2.2. Condición de borde de suelo.

La condición de borde que representa el suelo es la condición de pared sin deslizamiento [10], esto quiere decir que no hay paso de fluido y que la velocidad de esta debe ser cero en todas sus componentes al estar en contacto con el suelo. Para simular los efectos de rugosidad presentes en las cercanías del suelo se deben cumplir 4 requerimientos de manera simultánea [13], estos son:

1. La resolución vertical del mallado cerca del suelo del dominio computacional debe ser lo suficientemente alta.

2. Se debe cumplir la homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica en todo el dominio computacional.
3. Una distancia z_p desde el centro de la primera cara hasta el suelo del dominio debe ser mayor que la altura de rugosidad k_s ($y_p > k_s$).
4. Finalmente, se debe conocer la relación entre el largo de rugosidad k_s y la altura de rugosidad aerodinámica z_0 .

Se puede apreciar que tanto el punto 1 como el 3 se contraponen, por lo que se debe utilizar el menor tamaño de malla tal que $y_p > k_s$. El punto 2 se cumple a partir del tamaño del dominio y las demás condiciones de borde existentes. Finalmente la relación del punto 4 se presenta en la ecuación (4.10).

$$k_s = \frac{9,793z_0}{C_s} \quad (4.10)$$

Donde C_s es una constante que varía entre 0 y 1. Se escoge $C_s = 0,75$ para facilitar el cálculo y ayudar al requisito del punto 3 [13].

4.3.2.3. Condición de borde superior.

La condición de borde del cielo que permite conseguir un buen modelamiento del HHABL es la condición de deslizamiento libre, ello permite el deslizamiento libre del fluido pero no así, el paso de flujo entre la pared. Cabe destacar que la altura del dominio debe ser tal, que el perfil de viento esté totalmente desarrollado a la hora de imponer esta condición de borde, para no incurrir en errores [10].

4.3.2.4. Condición de borde lateral.

Para la condición de borde lateral se utiliza la condición de simetría. Esta condición fuerza un flujo paralelo al dominio, haciendo desaparecer las velocidades normales a la superficie. Es necesario que la extensión lateral sea lo suficientemente grande para que la condición de simetría no afecte los resultados de la geometría a estudiar [10].

4.3.2.5. Condición de borde salida.

La condición de salida que se impone en el dominio corresponde a salida de flujo, la cual anula las derivadas de todas las variables, desarrollando completamente el perfil. Es importante que la condición de borde aguas abajo se encuentre lo más alejado del área de estudio, para que la condición impuesta no afecte la estela que deja el obstáculo y no incurrir a errores [10].

4.3.3. Mallado

Para la selección de un correcto mallado es necesario definir los siguientes parámetros.

4.3.3.1. Skewness

El Skewness es una de las medidas principales que determinan la calidad de la malla. Determina que tan cercana es una cara al ideal, ya sea equilátera o equiangular. [14]

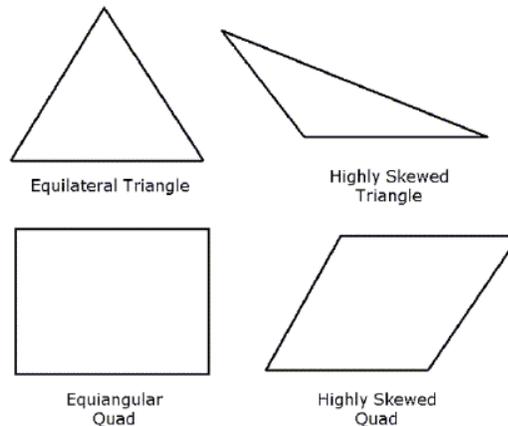


Ilustración 4-2 Cuadriláteros y triángulos ideales y con altos valores de skewness. Fuente: [14].

A continuación se presenta una tabla con una lista de rangos de skewness y su correspondiente calidad de malla.

Tabla 4-2 Valores de Skewness con su respectiva calidad de malla. Fuente: [14].

Valores de Skewness.	Calidad de malla.
1	Degenerada
0,9 – < 1	Mala
0,75 – 0,9	Pobre
0,5 – 0,75	Justa
0,25 – 0,5	Buena
> 0 – 0,25	Excelente
0	Equilátero

A partir de la Tabla 4-2 se indica que para valores 0 el mallado tiene la mejor calidad, es totalmente equilátero, mientras que para valores de 1 la malla tienen la peor calidad.

El valor de skewness se calcula de dos maneras las cuales son:

- Basado en volúmenes equiláteros
- Basado en la desviación de un ángulo equilátero normalizado.

Para el cálculo en 3D principalmente se utiliza la primera manera, el cual está definido por: [14]

$$Skewness = \frac{\text{Tamaño de celda óptimo} - \text{Tamaño de celda}}{\text{Tamaño de celda óptimo}} \quad (4.11)$$

En la ecuación (4.11), el tamaño de celda óptimo corresponde al tamaño de una celda equilátera con el mismo circunradio.

4.3.3.2. Calidad Ortogonal

La calidad ortogonal consiste en una de las medidas métricas más importantes para evaluar la calidad de una malla junto con el skewness. Esta se calcula utilizando el vector normal de la cara, el vector que va desde el centroide de la celda al centroide de cada una de las celdas adyacentes y el vector que va desde el centroide de la celda a cada una de las caras [14].

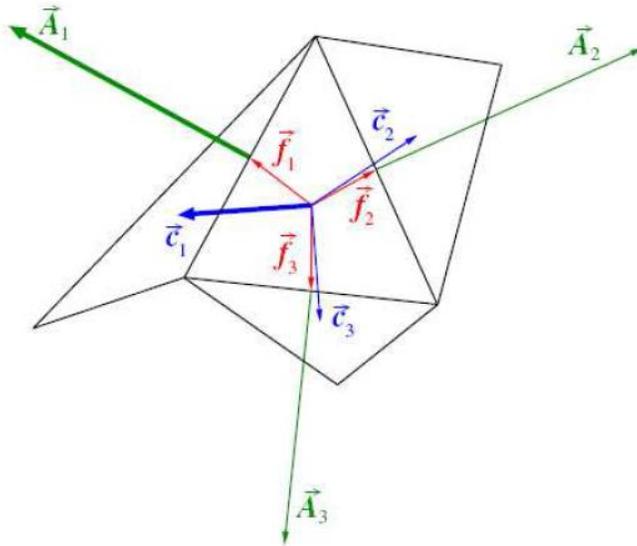


Ilustración 4-3 Vectores utilizado para el cálculo de la calidad ortogonal de una celda. Fuente: [14].

La calidad ortogonal de una celda se calcula como el valor máximo de una de las siguientes expresiones para cada cara.

$$\frac{|\vec{A}_i \vec{f}_i|}{|\vec{A}_i| |\vec{f}_i|} \quad (4.12)$$

En la ecuación (4.12), \vec{A}_i representa al vector normal a la cara y \vec{f}_i es el vector que va desde el centroide de la celda al centroide de la cara.

$$\frac{\vec{A}_i \vec{c}_i}{|\vec{A}_i| |\vec{c}_i|} \quad (4.13)$$

En la ecuación (4.13), \vec{A}_i es el vector normal a la cara y \vec{c}_i es el vector que va desde el centroide de la celda hasta el centroide de las celdas adyacentes que comparten caras.

4.3.4. Criterio de Convergencia

La mayoría de los programas computacionales usan métodos iterativos para resolver sistemas de ecuaciones algebraicas. A partir de una estimación inicial de las variables estas se recalculan en cada una de las iteraciones hasta que llegan a un error especificado por el usuario. Estos errores corresponden a los residuos de las ecuaciones que deben tender a cero y por lo general esto sucede a partir de la primera iteración. En aplicaciones industriales se usa un criterio de 0,001 típicamente, el cual es demasiado alto para que la solución converja. Se recomienda la disminución de este criterio en al menos 4 órdenes de magnitud. Además se debe tener un control de las variables estudiadas, ya que si estas permanecen constantes o varían en torno a un punto es porque la solución puede haber alcanzado la convergencia.[10]

5. Metodología.

En este capítulo se procede a detallar la metodología de este trabajo de investigación. Se presenta la definición del problema y a continuación se explicita cada uno de los pasos realizados. Primeramente se explica el método por el cual se obtiene el recurso eólico referencial para las simulaciones, luego se presenta en detalle la descripción de la arquitectura utilizada para finalmente pasar a detallar la simulación computacional. Se explica y detalla los parámetros utilizados en el dominio de trabajo y las condiciones de borde, luego se detalla el procedimiento para la modelación matemática. Finalmente se explican los métodos de validación y el trabajo de los resultados obtenidos.

5.1. Definición del Problema.

En el presente trabajo de título se busca estudiar la fluidodinámica del viento en entornos urbanos mediante simulaciones computacionales, con el objetivo de encontrar regiones de alto potencial energético en las cercanías de una vivienda en particular.

Se utiliza el software comercial ANSYS Fluent 14.5 para realizar las simulaciones de un fluido sobre una vivienda. Se realizan simulaciones para un flujo tridimensional, estacionario y sin presencia de transferencia de calor. Para la turbulencia se utiliza el modelo $k - \epsilon$ modificado, según lo especificado en el capítulo 4, para describir el entorno urbano y cumplir con la homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica. Se realizan dos casos con diferentes velocidades de viento, para cada caso se realiza un posterior estudio en donde, utilizando el factor de concentración de viento denominado C_v , se determinan las regiones de mayor potencial energético.

Una vez obtenidas estas regiones se puede efectuar un trabajo de extrapolación de resultados utilizando las características que posee la vivienda determinada con el fin de extender los resultados a futuras viviendas que compartan parte de la geometría estudiada en este trabajo de título.

5.2. Recurso Eólico.

La obtención del recurso eólico se basa en el estudio de dos diferentes fuentes de investigación presentes en la Región Metropolitana de Santiago.

La primera fuente de datos a consultar es el explorador de energía eólica que posee el Ministerio de Energía del país, este es una plataforma virtual elaborada en conjunto con el departamento de Geofísica de la Universidad de Chile gracias al convenio de cooperación y Transferencia entre el Ministerio de Energía y la Universidad de Chile y con el apoyo adicional de la Agencia de Cooperación Internacional Alemana (GIZ).

Este modelo de explorador eólico difunde información de viento basada en la simulación numérica de la atmósfera con un avanzado modelo de mesoescala llamado WRF (del inglés Weather Research and Forecasting). El WRF es un modelo tipo no-hidrostático que resuelve las ecuaciones primitivas que controlan la circulación atmosférica, presenta el estado de la atmósfera en una grilla tridimensional en términos de 10 variables fundamentales. La resolución del modelo viene dado por el tamaño de esta grilla y para el caso de Chile es de un kilómetro. [15]

La segunda fuente de obtención corresponde a la estación meteorológica del departamento de Geofísica (DGF) de la Universidad de Chile, ubicada en Blanco Encalada 2002, Santiago. Esta estación registra datos en un intervalo de tiempo de $D = 15min$, dentro de los datos registrados se pueden encontrar; temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, presión barométrica, precipitación, magnitud del viento promedio, dirección del viento y magnitud del viento instantáneo. En la Tabla 5-1 se muestran las especificaciones de la estación meteorológica en cuanto a instrumentación.

Tabla 5-1 Especificaciones de la estación meteorológica del DGF, U. de Chile. Fuente: [16].

Variable	Instrumento	Marca/ Modelo	Observaciones
Temperatura del aire (°C)	Higro-termómetro de estado sólido	CS-500 Campbell Sci.	Se reporta valor promedio dentro de último intervalo de registro
Humedad relativa (%)	Higro-termómetro de estado sólido	CS-500 Campbell Sci.	Se reporta valor promedio dentro de último intervalo de registro.
Radiación solar (w/m^2)	Piranómetro silicon	LI200X Campbell Sci.	Se reporta valor promedio dentro de último intervalo de registro.
Presión atmosférica (hPa)	Barómetro estado sólido	PTA-127 Vaisala	Se reporta valor promedio dentro de último intervalo de registro.
Precipitación (mm)	Pluviómetro de vascula	TE525mm Texas Instruments	Se reporta valor acumulado en el intervalo de registro.
Viento (Magnitud en m/s, dirección en grados sex.)	Anemómetro + veleta	03001 Wind Sentry Wind Set, Young.	Se reporta valor promedio dentro de último intervalo de registro.
	Almacenamiento y procesamiento inicial de datos	Data-logger CR10X-2M, Campbell SCI	

5.3. Descripción de la Arquitectura.

Con el fin de que la arquitectura estudiada en este trabajo de título entregue valores verídicos y estos permitan buenos análisis, es necesario que la vivienda cumpla con dos requisitos.

- Ubicada en la Región Metropolitana de Santiago, Chile.
- Vivienda de dos pisos en donde la superficie construida de la primera planta sea mayor a la superficie construida de la planta superior.

Bajo estas necesidades, es contactada la oficina de arquitectura interdisciplinar Nicolás del Río M. Sc. Arq. arquitectos asociados, ubicada en Santa Beatriz #170 oficina 602, Providencia, Santiago. Esta oficina tiene como principal foco de interés el cruce que produce la eficiencia de recursos en el diseño arquitectónico y su relación con el medio ambiente.

Nicolás del Río, arquitecto y fundador de la empresa, presenta un proyecto a remodelación que cumple con los requisitos necesarios para ser el recurso arquitectónico buscado para el análisis.

La vivienda a estudiar está ubicada en Brasilia #1261, Vitacura, Santiago, y posee las características de que la superficie construida en la planta inferior es mayor a la superficie construida en la planta superior. En las Ilustración 5-1, Ilustración 5-2 e Ilustración 5-3 se puede apreciar las elevaciones de la vivienda a estudiar.

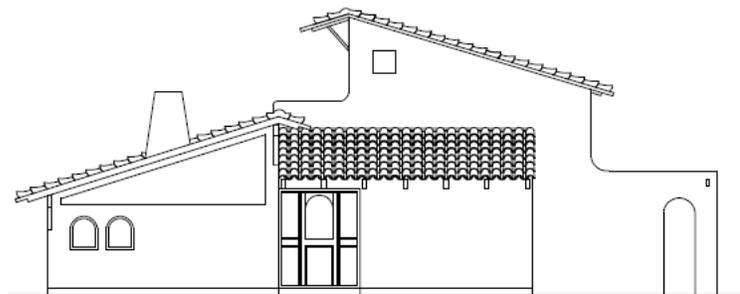


Ilustración 5-1 Elevación vivienda a estudiar. Vista A. Fuente: Nicolás del Río.

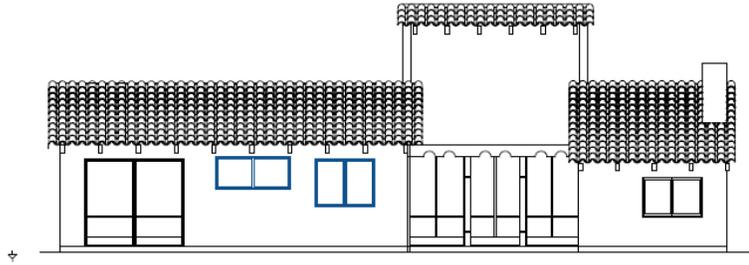


Ilustración 5-2 Elevación vivienda a estudiar. Vista B. Fuente: Nicolás del Río.

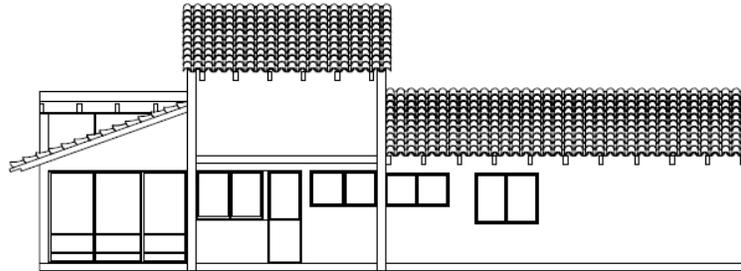


Ilustración 5-3 Elevación vivienda a estudiar. Vista C. Fuente: Nicolás del Río.

5.4. Dinámica de Fluidos Computacionales.

En esta sección se presenta la metodología utilizada para realizar la simulación computacional en el software comercial ANSYS FLUENT 14.7. Esto engloba la definición y dimensionamiento del dominio computacional, la selección del método resolutorio (ecuaciones gobernante), definición de las condiciones de borde impuestas, definición y estudio del mallado del dominio, validación del método de solución y por último el trabajo de los resultados obtenidos.

5.4.1. Definición del Dominio Computacional.

Se realiza el dominio computacional siguiendo lo presentado en el Capítulo 4.3.1 en donde se destacan las 3 dimensiones más importantes de la geometría del problema; alto, largo y ancho de la vivienda a estudiar (ver Ilustración 5-4 e Ilustración 5-5). Las dimensiones del dominio se presentan en la Tabla 5-2.

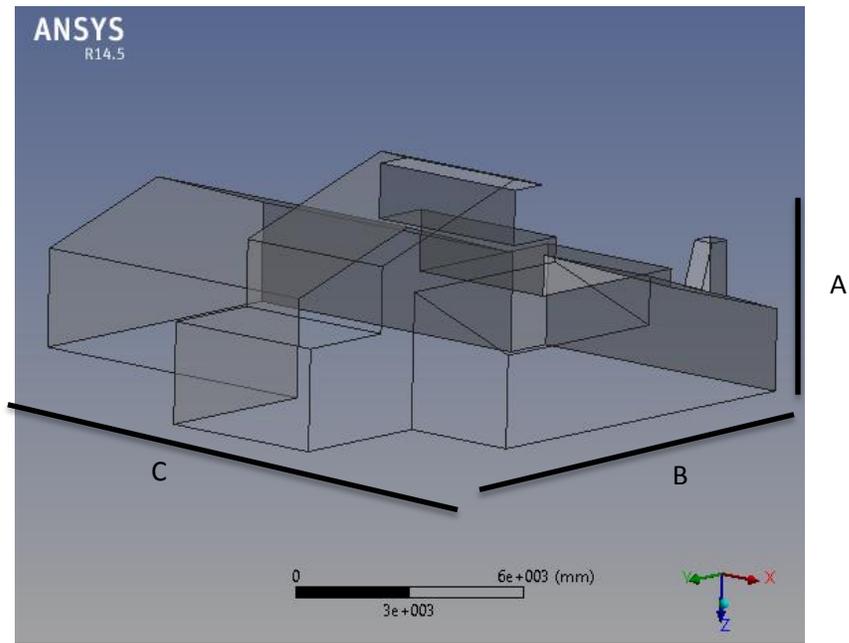


Ilustración 5-4 Geometría de la vivienda. Vista 1. Fuente: ANSYS 14.5.

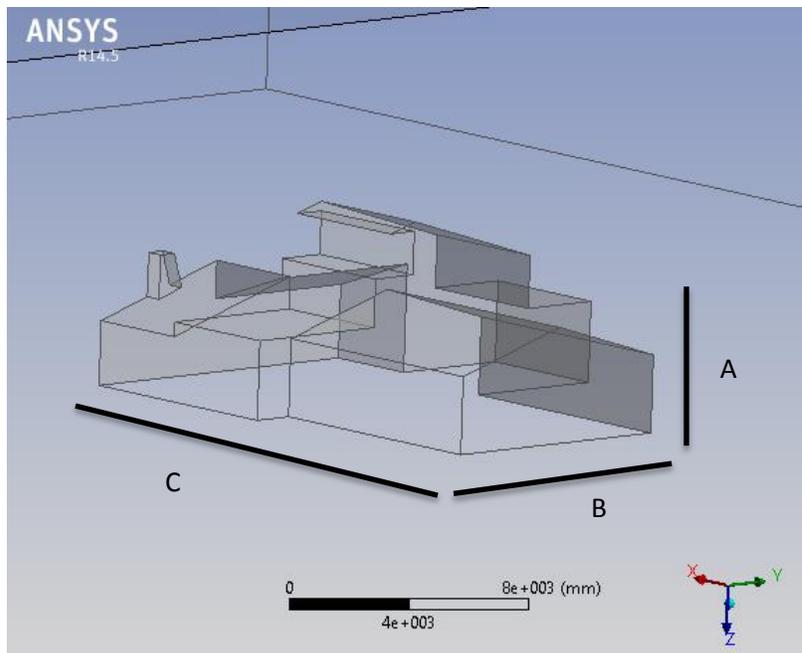


Ilustración 5-5 Geometría de la Vivienda. Vista 2. Fuente ANSYS 14.5.

Tabla 5-2 Resumen dimensiones geometría vivienda.

Dimensión	Medida (mm)
Alto (A)	6150
Largo (B)	14800
Ancho (C)	16700

Luego se define el dominio a partir de los datos como se muestra en la Ilustración 5-6.

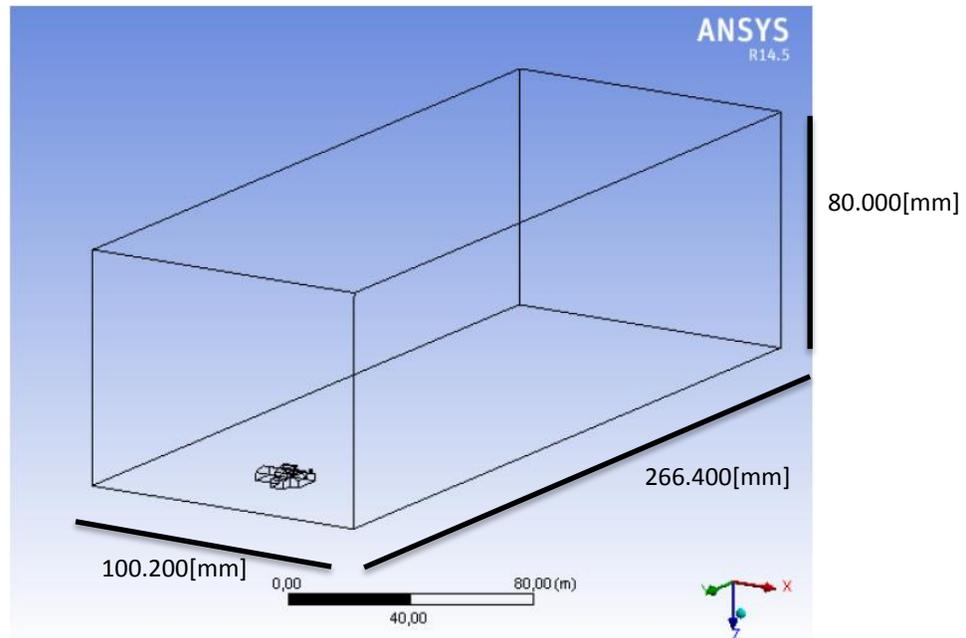


Ilustración 5-6 Representación del dominio computacional. Fuente: ANSYS 14.5.

Para la extensión vertical del dominio computacional se toma en cuenta que a los 80 metros el perfil de viento impuesto se encuentra totalmente desarrollado, por lo que es posible cumplir con lo explicitado en la sección 3. Para la extensión lateral del dominio se deja un espaciado de 2,5 veces el ancho total de la vivienda ya que nuevamente se presenta un bloqueo inferior al 3%.

Para definir la extensión aguas arriba del flujo de control se toma en consideración que se conoce por completo el perfil aerodinámico presente en el ambiente, por lo que sólo es necesario dejar un espaciado de dos veces el largo de la vivienda. Para el sector agua abajo, se sigue la recomendación expuesta anteriormente de una distancia de quince veces el largo de la vivienda para que el perfil vuelva a restablecerse.

5.4.2. Método de Solución.

Se utiliza el método de volúmenes finitos para la resolución de los problemas mediante el uso del software comercial ANSYS FLUENT 14.5. La física será aproximada como el modelo de un flujo incompresible, estacionario, sin transferencia de calor y en ausencia de fuerzas externas.

$$\frac{\delta u_i}{\delta x_i} = 0 \quad (5.1)$$

$$\rho u_j \left(\frac{\delta u_i}{\delta x_j} \right) = \frac{\delta p}{\delta x_i} + \rho g_i + \frac{\delta \tau_{ij}}{\delta x_j} \quad (5.2)$$

Las ecuaciones (5.1) y (5.2) gobiernan el problema, ambas están escritas con notación indicial. La primera corresponde a la conservación de masa y la segunda corresponde a la conservación de momento para x_i donde $i = (1,2,3)$. La expresión de τ_{ij} corresponde al tensor de esfuerzo que viene dado por:

$$\tau_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\delta u_i}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\frac{\delta u_k}{\delta x_k} \right) \delta_{ij} \right] - \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (5.3)$$

Para la ecuación (5.3) la primera parte corresponde al esfuerzo viscoso, mientras que el segunda parte corresponde al esfuerzo turbulento, donde el término u'_i es la fluctuación de la velocidad con respecto a la media.

La turbulencia es ajustada a partir del modelo $k - \epsilon$ el cual está descrito en el capítulo 4. Los valores del modelo son obtenidos a partir del trabajo de Yang et al., ver Tabla 4-1 e Ilustración 4-1.

Finalmente el criterio de convergencia está dado por la obtención de residuos de un orden de 10^{-5} de todas las variables, para obtener así mejores resultados.

5.4.3. Condiciones de Borde.

Las condiciones de borde utilizadas son las que se recomiendan en la sección 4. En la entrada del dominio se entregan los perfiles de viento $u(z)$, la energía cinética de turbulencia $k(z)$ y su disipación $\epsilon(z)$.

$$u(z) = \frac{u_0}{\kappa} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (5.4)$$

$$k(z) = \frac{u_0^2}{\sqrt{C_\mu}} \sqrt{C_1 \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) + C_2} \quad (5.5)$$

$$\epsilon(z) = \frac{u_0^3}{\kappa(z + z_0)} \sqrt{C_1 \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) + C_2} \quad (5.6)$$

Las ecuaciones (5.4), (5.5) y (5.6) son los perfiles anteriormente descritos en la sección 4, donde z_0 es escogido dependiendo según la rugosidad del suelo del dominio, u_0 tiene diferentes valores dependiendo de la velocidad del viento estudiada en el recurso eólico.

Las condiciones de borde lateral son impuestas como simetría y el cielo del dominio está representado como una pared con deslizamiento libre. La condición de salida del dominio queda como salida de flujo, donde las derivadas de todas las componentes normales son cero, esto se cumple cuando los perfiles están totalmente desarrollados.

El suelo y las paredes de la vivienda son modelados como paredes sin deslizamiento y rugosidad. Para el cálculo de rugosidad se debe determinar el valor de z_0 , para ello se consideran dos valores de esta, una para el suelo del dominio y otra para la pared de la vivienda. Esto se realiza con el fin de poder modelar una mayor rugosidad lejos de la zona de interés ya que, en ambientes urbanos, la rugosidad es calculada de manera explícita. Es con esto que se usar valores de $z_0 = 0,03m$ y $z_0 = 0,0003m$ para suelo y pared respectivamente.

$$k_s = \frac{9.793z_0}{C_s} \quad (5.7)$$

La ecuación (5.7) muestra la relación que existe entre la altura de rugosidad aerodinámica z_0 y el largo de rugosidad k_s presentada anteriormente en la sección 4. Para facilitar los cálculos se toma $C_s = 1$ y con ello se obtienen los valores de rugosidad tanto para el suelo como para las paredes de la vivienda y estos son $k_{s_{suelo}} = 0,4m$ y $k_{s_{pared}} = 0,4cm$ respectivamente.

En la Tabla 5-3 se presenta un resumen de las condiciones de borde utilizadas en la simulación.

Tabla 5-3 Resumen de condiciones de borde.

Superficie	Condición de borde
Entrada	Perfiles desarrollados de $u(z)$, $k(z)$ y $\epsilon(z)$
Salida	Salida de fluido.
Cielo	Pared con deslizamiento libre
Suelo	Pared sin deslizamiento $k_s = 0,4m$ y $C_s = 0,75$
Vivienda	Pared sin deslizamiento $k_s = 0,4cm$ y $C_s = 0,75$
Lateral	Simetría.

5.4.4. Mallado.

Se siguen las indicaciones descritas en el capítulo 4, se escoge un mallado preferentemente con elementos hexaédricos. La única restricción de tamaño se sitúa en la zona del suelo de modo que se cumpla el requerimiento de que el mallado sea lo suficientemente pequeño pero no tenga un valor menor a la altura de rugosidad. Por lo tanto, la altura del primer nodo del mallado y_p debe ser mayor a la altura de rugosidad k_s por lo tanto la altura de la primera celda debe ser mayor a $0,8m$. Luego, el tamaño de malla que se extiende en la superficie del suelo y que cumple con la restricción impuesta toma un valor de $1,5m$.

Se deben considerar además, los valores recomendados de *skewness* y de calidad ortogonal para asegurar una buena calidad en el mallado. Se recomienda que para el valor máximo que debe tomar el *skewness* es de 0,8, mientras que el valor mínimo que puede tomar la calidad ortogonal es del 0,2. Cumpliendo tales valores se puede decir que la calidad de la malla es aceptable para realizar simulaciones y que los resultados no se vean influenciados por la malla.

5.4.5. Homogeneidad Horizontal de la Capa Límite Atmosférica.

Se realizan simulaciones computacionales sobre un dominio vacío siguiendo las mismas recomendaciones presentadas en el capítulo 4. Tanto sus dimensiones como las condiciones de borde son impuestas bajo las recomendaciones anteriormente descritas. Se comparan los perfiles de $u(z)$, $k(z)$ y $\epsilon(z)$ (ecuaciones 4.4, 4.5 y 4.6) tanto en la entrada como en la salida del dominio, de esta manera se comprueba la existencia de homogeneidad horizontal en la capa límite atmosférica.

5.4.6. Validación del Método de Solución.

Para la validación del método de solución se realiza una simulación computacional de un flujo sobre un cubo en donde se miden tres diferentes largos de recirculación. Estos valores se comparan con resultados de otros autores [12] [17], mediciones in-situ y resultados experimentales.

5.4.7. Visualización de Resultados.

Una vez realizadas las simulaciones computacionales en el dominio de estudio se realiza un procesamiento de datos para la visualización del coeficiente de concentración de viento alrededor de la vivienda, para ello se define una variable correspondiente al coeficiente de concentración c_v como se define en la ecuación (5.8).

$$C_v = \frac{u}{u_\infty} \quad (5.8)$$

La visualización se realiza a partir de iso-superficies para valores de c_v determinados en todo el dominio.

5.5. Análisis de Resultados.

Finalmente, se procede a realizar un análisis de los resultados obtenidos en la simulación con el objetivo de determinar criterios de emplazamiento de un generador eólico de eje vertical de pequeña escala en viviendas urbanas. Estos criterios tienen como fin aprovechar el aumento del potencial energético eólico provocado por la vivienda para el mayor aprovechamiento en la turbina eólica. Los criterios establecidos en este documento son de carácter general, lo cual permite la extrapolación de estos para viviendas de diferente geometría a la estudiada.

6. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para el recurso eólico, simulaciones computacionales y el comportamiento del factor de concentración de flujo. Además se realiza un análisis para cada sección para luego definir los criterios de emplazamiento que se proponen en este documento.

6.1. Recurso Eólico.

En esta sección se presentan los resultados del estudio del recurso eólico para la Región Metropolitana los cuales fueron explicados en la sección 5.2. En primera instancia será presentado el estudio realizado a partir del explorador eólico del Ministerio de Energía y luego se presenta el estudio a partir de la estación meteorológica del departamento de geofísica de la Universidad de Chile.

6.1.1. Resultados del Explorador Eólico.

A continuación se presenta la Ilustración 6-1 con los resultados obtenidos por el explorador eólico del Ministerio de Energía que muestra el promedio anual de la velocidad del viento para 5,5 metros de altitud.

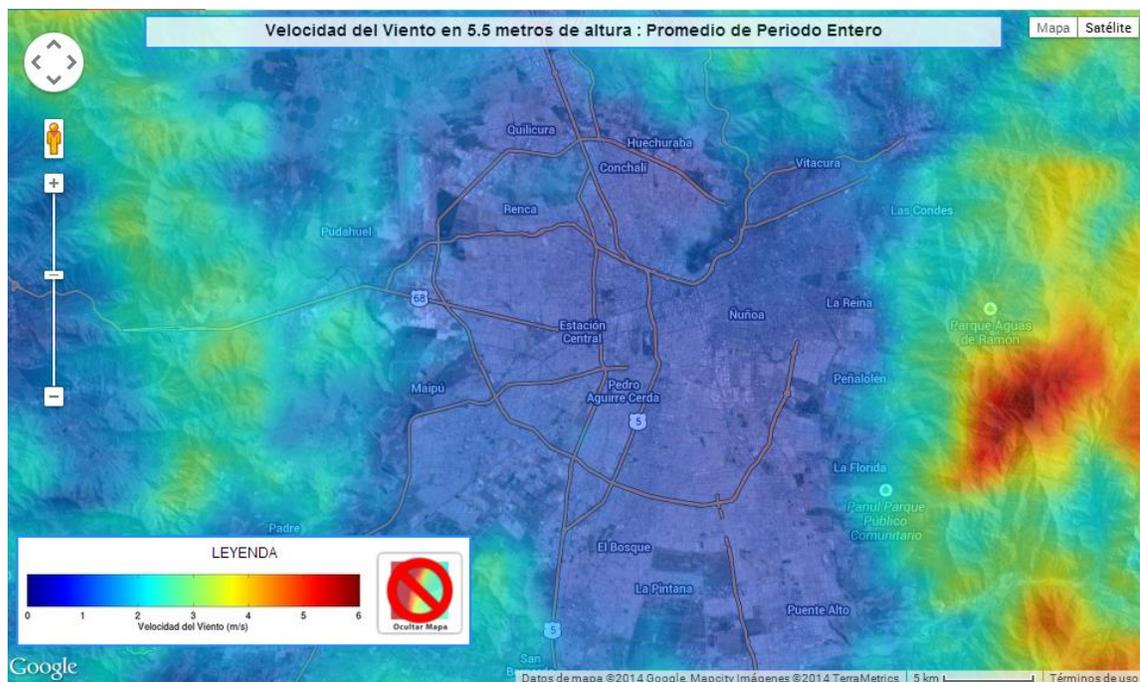


Ilustración 6-1 Obtención del recurso eólico promedio anual para una altura de 5.5m. Región Metropolitana. Fuente: explorador de energía eólica del Ministerio de Energía.

6.1.2. Resultados de la Estación Meteorológica.

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de los datos obtenidos por la estación meteorológica del departamento de geofísica de la Universidad de Chile (DGF), se obtuvo registro de la velocidad del viento cada 15 minutos para 2 años. Estos valores son trabajados y graficados con el software Matlab R2008b entregando los siguientes gráficos.

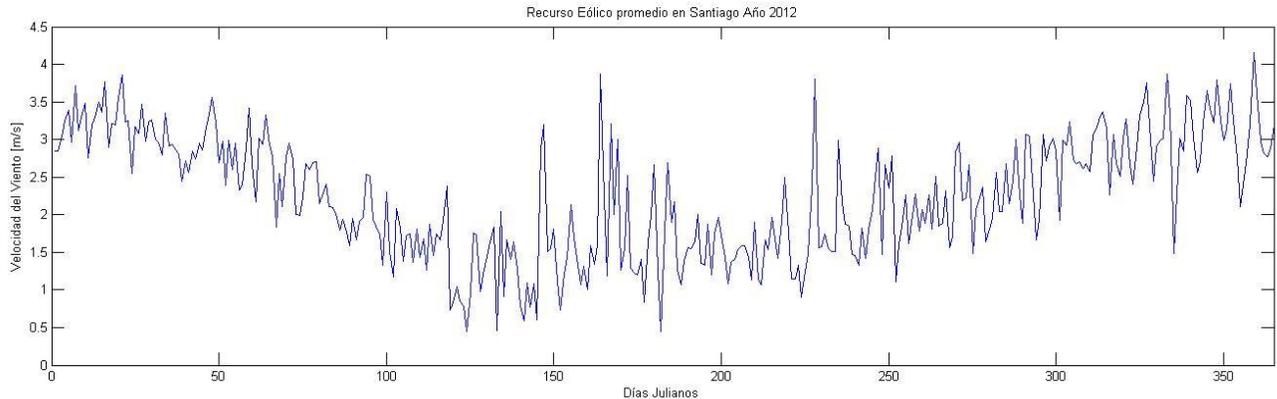


Ilustración 6-2 Gráfico del Recurso eólico promedio en Santiago año 2012.

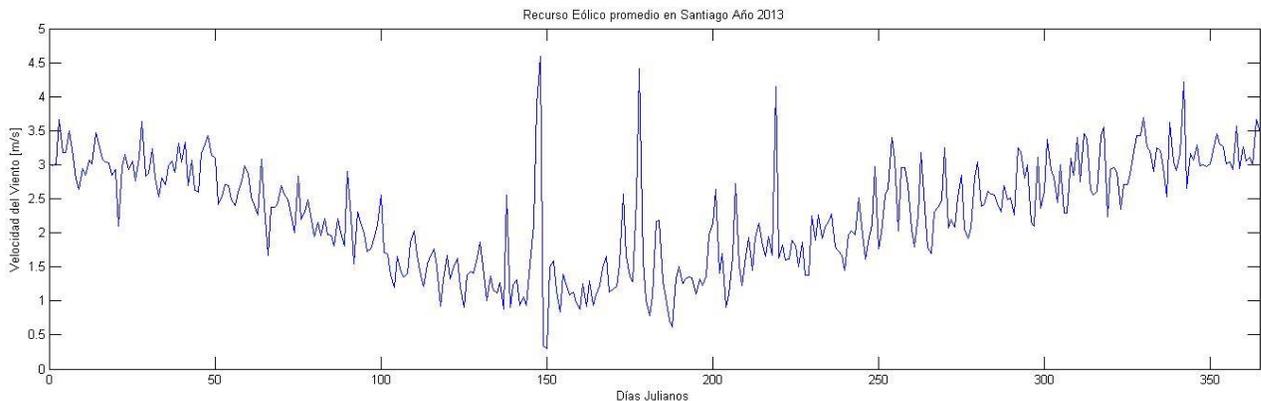


Ilustración 6-3 Gráfico del Recurso eólico promedio en Santiago año 2013.

6.1.3. Análisis de Resultados.

A partir de los datos obtenidos por cada método, se puede apreciar que existen grandes diferencias entre uno y el otro debido a la forma de medición que tiene cada uno. Mientras que el explorador eólico posee obtiene los valores del recurso a través de modelos matemáticos que dependen exclusivamente de la geometría del terreno, los

resultados de la estación meteorológica son obtenidos de manera in-situ pero exclusivas para el lugar donde se realiza el estudio.

Como es posible apreciar en la Ilustración 6-1 el promedio anual de la velocidad del viento en la Región Metropolitana es un valor extremadamente bajo. Las razones de este resultado se deben exclusivamente al método matemático que utiliza el explorador y la mala resolución que posee para realizar estudios de mediana y pequeña escala como lo es el estudio de entornos urbanos. Se concluye que el explorador eólico es una buena herramienta para obtener una primera aproximación del recurso eólico para estudio de grandes territorios no urbanizados tomando en cuenta alturas superiores a las necesarias para este estudio en particular.

A partir de los datos obtenidos por la estación meteorológica del DGF y los gráficos expuestos a través de la Ilustración 6-2 e Ilustración 6-3 se puede determinar la fluctuación anual que tiene la velocidad del viento en un punto en específico de la ciudad de Santiago. Los datos obtenidos representan de mejor manera el cálculo del recurso eólico en ambientes urbanos, ya que la medición, al ser in-situ, se ve afectada por la disposición del entorno. Cabe destacar que es casi imposible poder lograr que dos lugares de una ciudad tengan el mismo recurso eólico, debido a la disposición arbitraria de edificaciones que incluso puede variar con el tiempo, es posible determinar aproximaciones que permitan acercarse al recurso eólico de un punto a partir de mediciones cercanas a este. Se concluye entonces que la estación meteorológica del DGF entrega mejores resultados del recurso eólico de la Región Metropolitana, permitiendo obtener rangos de velocidades para el estudio de la vivienda que tiene por objetivo este trabajo de título.

6.2. Resultados Computacionales.

A continuación se presentan los resultados computacionales realizados con el software comercial ANSYS 14.5. En esta sección se incluyen los resultados referentes al mallado utilizado en el dominio, la validación de la homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica, la validación del método de solución a utilizar y los resultados de la simulación en la vivienda estudiada además del respectivo análisis de los datos obtenidos.

6.2.1. Mallado.

El mallado fue realizado en el módulo ANSYS Meshing incluido en ANSYS 14.5. Se utilizó una malla principalmente con elementos hexaédricos tal y como se indicó en el capítulo 5. Se fijó el tamaño de la malla que está en contacto con el suelo del dominio a un valor de 1,5 metros. El mallado está caracterizado por realizarse bajo el método *patch independent* que consiste en la construcción del mallado que comienza desde la

geometría de estudio hacia el exterior, obteniendo así, mejores resultados. Además la malla presenta una refinación en la zona de la vivienda con elementos de menor tamaño, se utilizó un tamaño fijo de 0,1m.

A continuación se presentan diferentes esquemas del mallado realizado para el dominio computacional tales como esquema de la posición de la vivienda (Ilustración 6-4), esquema del mallado en el plano y-z (Ilustración 6-5) y esquemas ampliados de la malla en zonas específicas de la vivienda (Ilustración 6-6, Ilustración 6-7 e Ilustración 6-8).

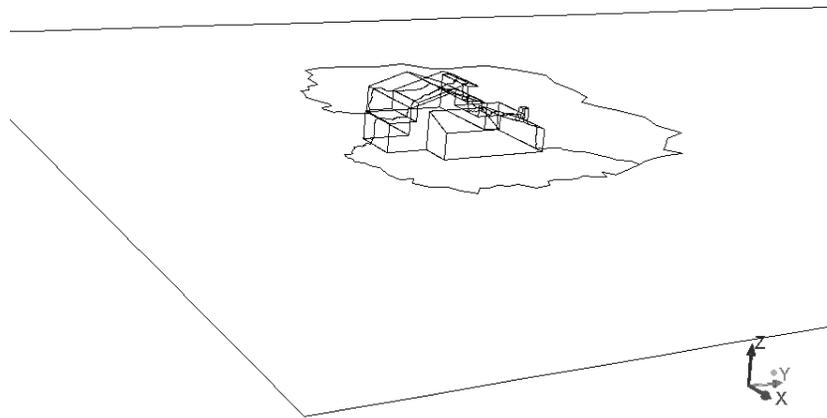


Ilustración 6-4 Esquema de la vivienda en el dominio computacional. Fuente: ANSYS 14.5.

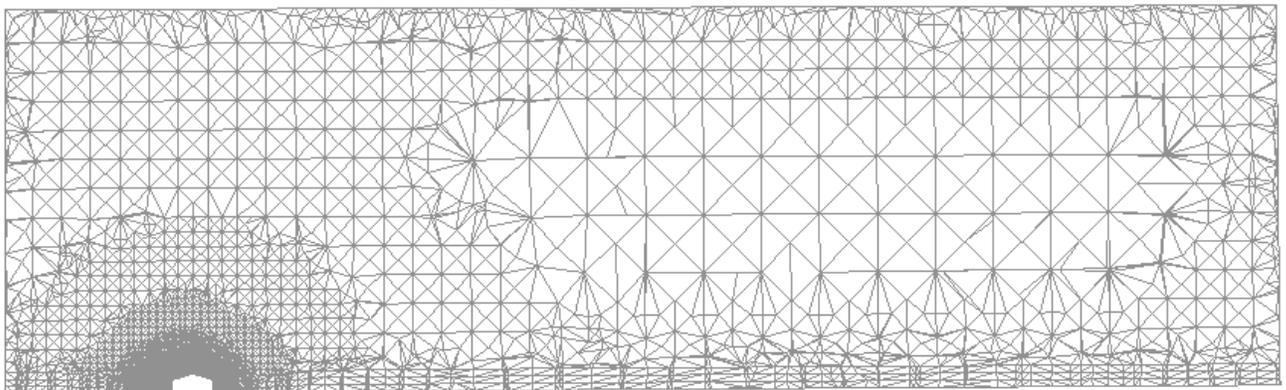


Ilustración 6-5 Esquema mallado en el plano y-z. Fuente: ANSYS 14.5.

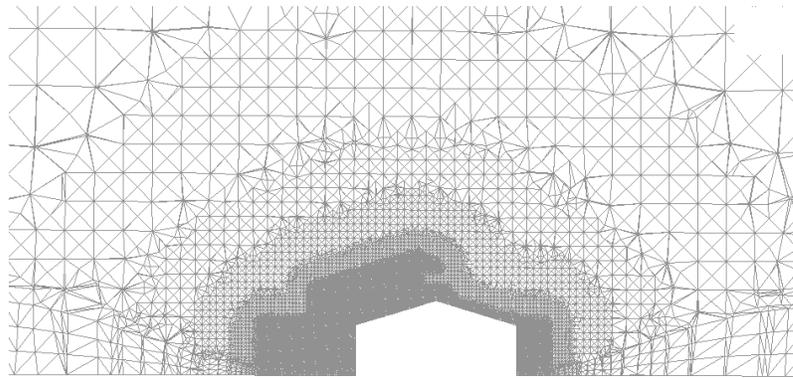


Ilustración 6-6 Esquema del mallado de la vivienda 1. Fuente: ANSYS 14.5.

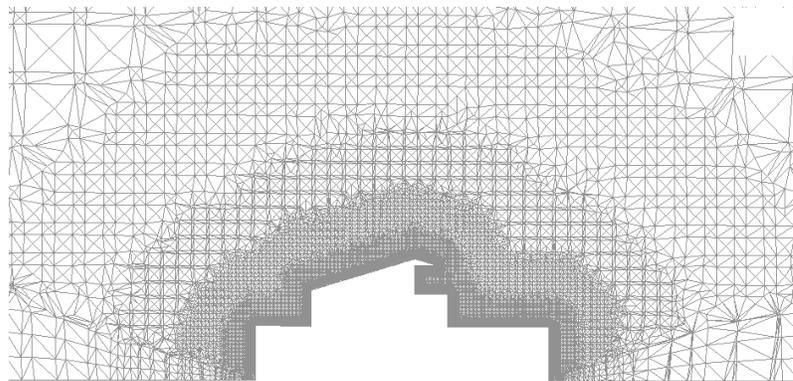


Ilustración 6-7 Esquema del mallado de la vivienda 2. Fuente: ANSYS 14.5.

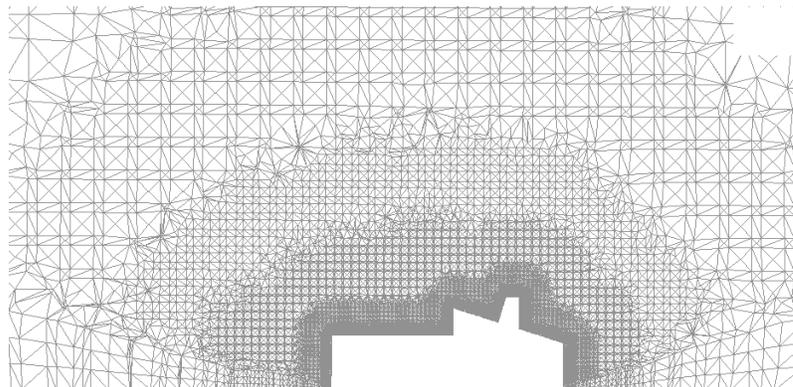


Ilustración 6-8 Esquema del mallado de la vivienda 3. Fuente: ANSYS 14.5.

Tabla 6-1 Resumen de los principales valores de la malla.

Medida	Valor
Número de Nodos.	855.369
Número de Elementos.	4.762.270
Skewness promedio.	0,15
Skewness máximo.	0,7
Calidad Ortogonal promedio.	0,9
Calidad Ortogonal mínimo.	0,33

En la Tabla 6-1 se presentan los principales valores que presenta el mallado, cabe mencionar la gran cantidad de elementos que posee este, lo que dificulta posibles estudios de malla debido a las dimensiones del entorno y el nivel de precisión que se necesita en la vivienda. Se pueden notar además los parámetros establecidos en las secciones anteriores que determinan una buena calidad de malla, estos son el valor de *skewness* máximo que posee un valor de 0,7 el cual se encuentra por debajo del valor sugerido 0,8. Para el caso de la calidad ortogonal, el valor mínimo obtenido es de 0,33, mientras que el requerido era de 0,2. Por lo tanto se puede concluir la buena calidad de la malla a partir de lo sugerido en el manual del software ANSYS. [14]

6.2.2. Validación Homogeneidad Horizontal de la Capa Límite Atmosférica.

Para la validación de la homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica se realiza una simulación sobre un dominio vacío donde se imponen los perfiles de entrada anteriormente descritos, luego se comparan los perfiles tanto en la entrada como en la salida.

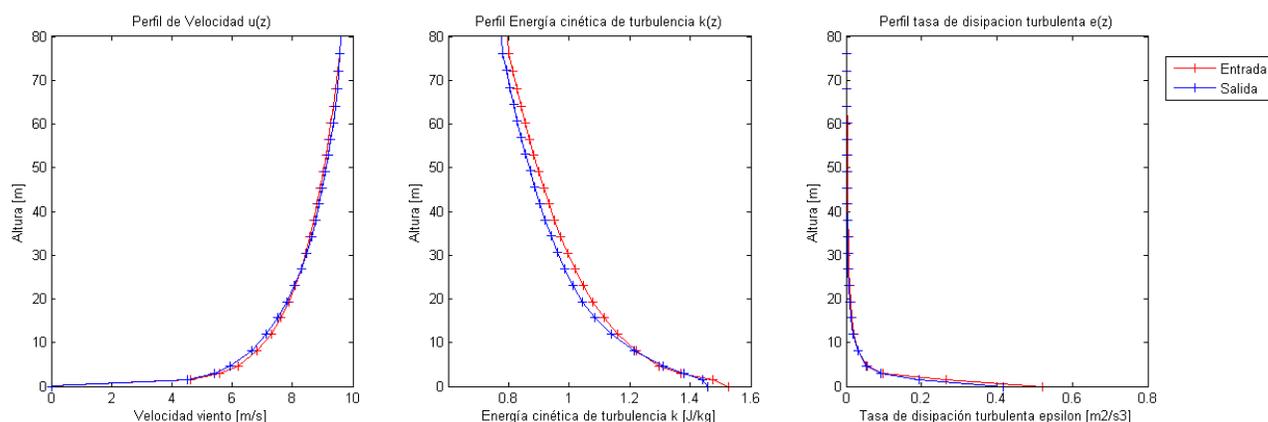


Ilustración 6-9 Perfiles de entrada y salida dentro de un dominio vacío. Se nombran de izquierda a derecha: $u(z)$, $k(z)$ y $\epsilon(z)$. Fuente: Matlab, elaboración propia.

En la Ilustración 6-9 se muestran los perfiles de entrada y salida para la velocidad $u(z)$, energía cinética de turbulencia $k(z)$ y tasa de disipación turbulenta $\epsilon(z)$. Se puede verificar que las curvas coinciden para entrada y salida, salvo para la energía cinética de turbulencia la cual presenta un leve desplazamiento por sobre los 10 metros y zona del suelo. Se concluye por lo tanto, que si se cumple la homogeneidad horizontal de la capa límite atmosférica utilizando los ajustes explicitados en la sección 4.

6.2.3. Validación Método de Solución.

Con el fin de validar el método de solución se realiza una simulación computacional de un fluido sobre un cubo. Los parámetros utilizados para esta simulación son exactamente los mismos que se usan para realizar el estudio de la vivienda. A partir de los datos obtenidos se realiza una comparación de las principales longitudes del flujo a partir de datos obtenidos en túneles de viento, resultados in-situ y recopilación bibliográfica de otros autos. Toda esta información es obtenida a partir del trabajo de I. Abohela [12].

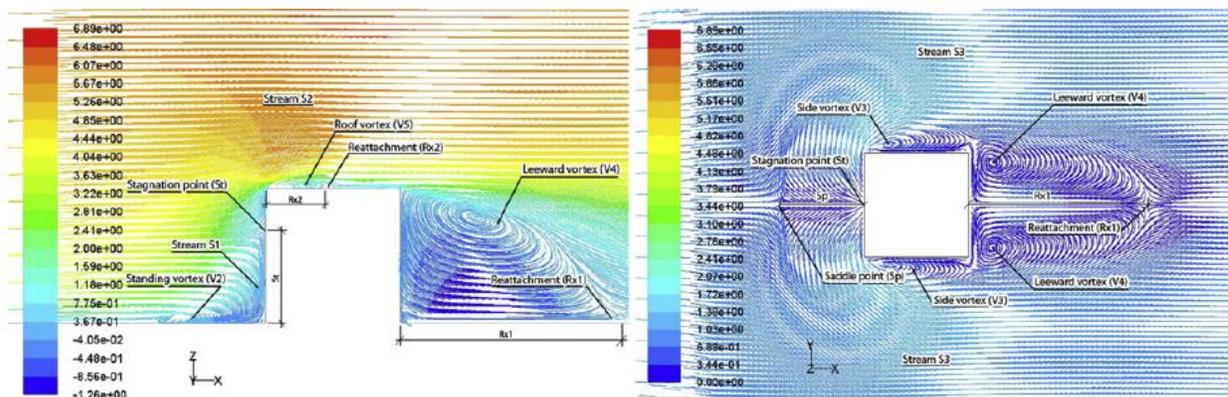


Ilustración 6-10 Líneas de corriente de velocidad del viento sobre un cubo para plano central (izquierda) y plano del suelo (derecha). Fuente:[12].

En la Ilustración 6-10 se muestra el comportamiento del flujo sobre el cubo. Se pueden apreciar cuatro zonas de desviación del flujo, la primera aparece al frente del cubo y desvía el flujo hacia abajo (S_1), la segunda zona se encuentra sobre la cara superior del cubo (S_2), las dos regiones restantes se encuentran a cada costado del cubo (S_3). La desviación de la corriente principal ocurre en el punto de máxima presión aguas arriba del cubo, en el punto de estancamiento (S_t). Debido a la presencia del cubo se separa el flujo, pero existe un punto de reacople aguas abajo del obstáculo (R_x1). Además el flujo se separa a causa de la esquina superior de la cara frontal del cubo, se produce el reacople de este fenómeno en la cara superior del obstáculo (R_x2). A causa de las separaciones y reacoplamientos del flujo es que se forman recirculaciones en las

mismas zonas donde se encuentran tales efectos. Se forma un vórtice aguas arriba del obstáculo (V_2), que comienza donde el flujo se separa, el punto silla (S_p), se generan dos vórtices a los costados (V_3), dos aguas abajo (V_4) y una recirculación sobre la cara superior del cubo (V_5). Para validar el método de solución se comparan los largos del punto silla S_p , el punto de estancamiento S_t y las distancias de reacople de flujo R_{x1} y R_{x2} .

A continuación se presenta la Ilustración 6-11 e Ilustración 6-12 con los resultados obtenidos a partir de la simulación realizada.

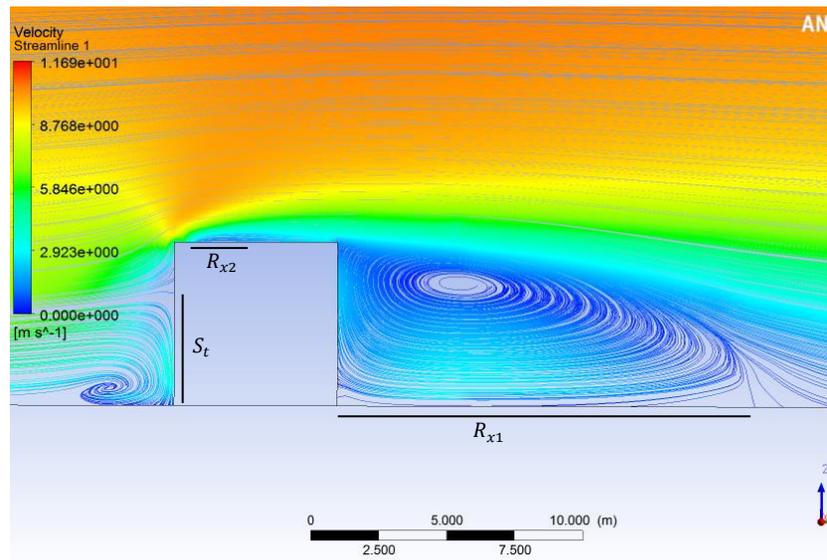


Ilustración 6-11 Resultados obtenidos para validación del método de solución. Plano central.

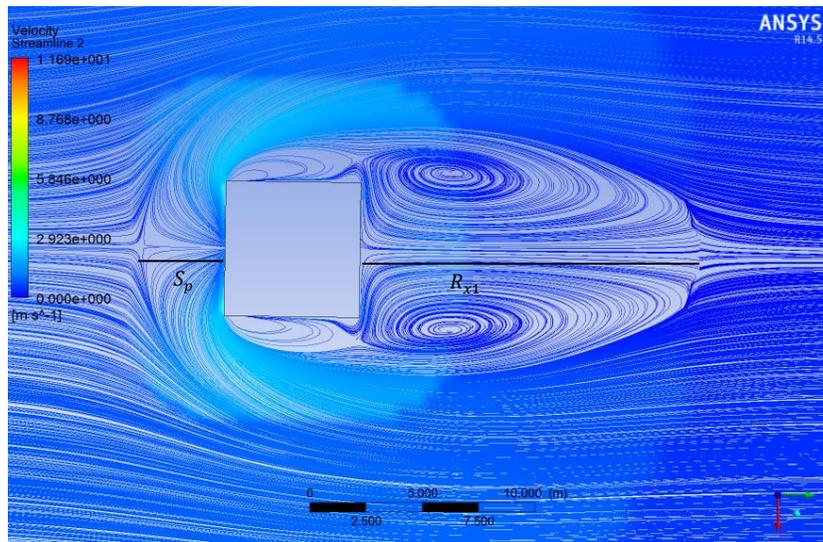


Ilustración 6-12 Resultados obtenidos para validación del método de solución. Plano referente al suelo.

Tabla 6-2 Comparación entre los distintos largos específicos del fluido para diferentes fuentes. Fuente: [12].

	S_p	S_t	R_{x2}	R_{x1}
Simulación CFD	0,67h	0,79h	0,4h	2,5h
Mediciones in-situ	<i>no disponible</i>	0,81h	0,6h	<i>no disponible</i>
Resultados a partir de túnel de viento	<i>no disponible</i>	0,64h – 0,85h	0,3h	1,34h – 1,60h
Resultados obtenidos a partir de la literatura	0,64h – 1,58h	0,55h – 0,84h	0,3h – 0,84h	1,5h – 2,74h

En la Tabla 6-2 se presenta la comparación de las principales distancias de los fenómenos ocurridos en la simulación. Se puede apreciar que existe una similitud entre los datos obtenidos por la simulación computacional y los datos recopilados por I. Abohela. Para el punto silla S_p , se obtuvo una distancia de 0,67h, donde h es el largo del cubo, el cual está dentro del rango de los resultados recopilados en la literatura. Para el punto de estancamiento S_t se obtuvo un largo de 0,79h, valor muy cercano a la medición in-situ y dentro de los rangos presentados a partir del túnel de viento y datos bibliográficos. El largo obtenido en el reacople del flujo de la cara superior R_{x2} es de 0,4h, el cual está dentro de los rangos presentados en la tabla. Finalmente, el valor obtenido a partir del reacople de la estela R_{x1} es de 2,5h que concuerda con el rango de la bibliografía recopilada, no así con la información obtenida a partir de los resultados a partir de túnel de viento. Luego, a partir de los datos obtenidos y la comparación realizada con los datos entregados por I. Abohela presentados en la Tabla 6-2 se puede determinar que el método de solución a utilizar en el estudio de la vivienda queda validado como un método confiable para la resolución de un análisis fluido dinámico.

6.2.4. Resultados de Simulaciones en Vivienda.

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones computacionales realizadas en la vivienda a estudiar. Se toman en consideración dos casos en donde se varía la velocidad del viento a partir de la velocidad de fricción u^* . Para representar la velocidad de viento baja se toma un valor de $u^* = 0,3 \left[\frac{m}{s} \right]$ y para la velocidad de viento alta se considera $u^* = 0,6 \left[\frac{m}{s} \right]$.

Para cada uno de los casos se presentan 7 figuras. La primera corresponde a una isosuperficie global para el factor de concentración $C_v = 1,05$ coloreada según la velocidad del flujo, mostrando las regiones donde existe un aumento en la velocidad del viento de un 5% o más en el interior de esta. Las figuras siguientes corresponden a contornos del factor de concentración y de velocidad presentados en el plano $y - z$ para diferentes valores de la coordenada x .

6.2.4.1. Caso 1: $u^* = 0,3 \left[\frac{m}{s} \right]$

En la Ilustración 6-13 se muestra las regiones donde el concentrador de velocidad C_v tiene un valor de 1,05 lo que indica que existe un aumento de la velocidad de un 5% o más, se identifica que esto se produce sólo para la planta baja y los costados de la vivienda. Estos resultados se corroboran con los contornos referentes al factor de concentración (Ilustración 6-14, Ilustración 6-15 e Ilustración 6-16). A partir de las ilustraciones referentes a los contornos de velocidad (Ilustración 6-17, Ilustración 6-18 e Ilustración 6-19) se puede notar que la velocidad a lo largo de todo el techo de la vivienda permanente casi invariante debido a la aceleración que se produce en la primera planta y no en la segunda.

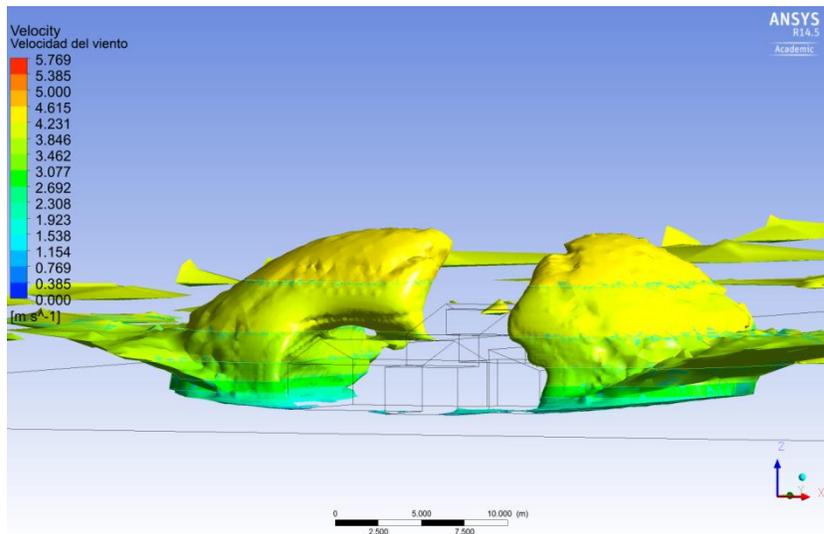


Ilustración 6-13 Isosuperficie y contorno de velocidad para $C_v=1,05$ y $u^* = 0,3$. Fuente: ANSYS 14.5.

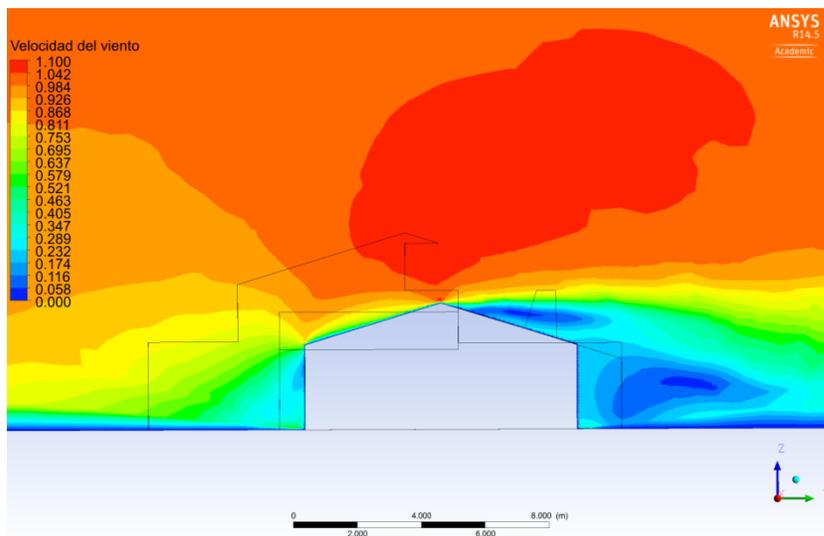


Ilustración 6-14 Contorno del factor de concentración para el plano 1 con $u^* = 0,3$. Fuente: ANSYS 14.5.

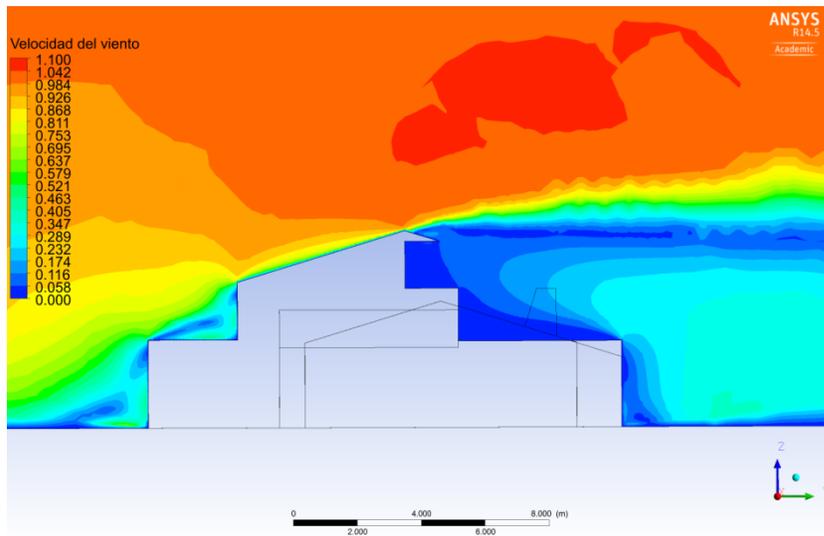


Ilustración 6-15 Contorno del factor de concentración para el plano 2 con $u^* = 0,3$. Fuente: ANSYS 14.5.

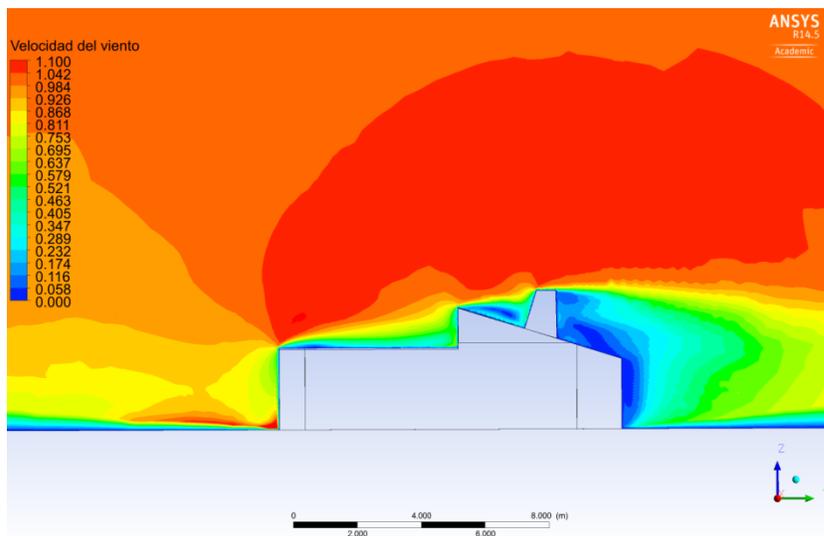


Ilustración 6-16 Contorno del factor de concentración para el plano 3 con $u^* = 0,3$. Fuente: ANSYS 14.5.

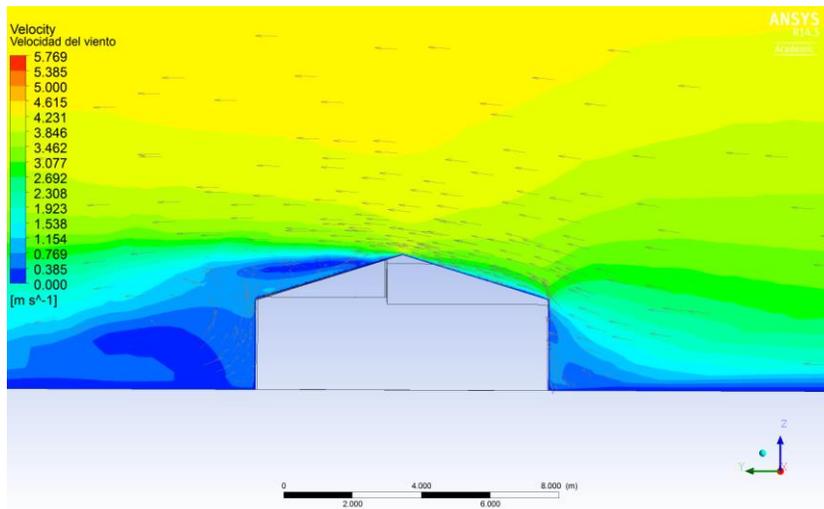


Ilustración 6-17 Contorno y vectores de velocidad para el plano 1 con $u^* = 0,3$. Fuente: ANSYS 14.5.

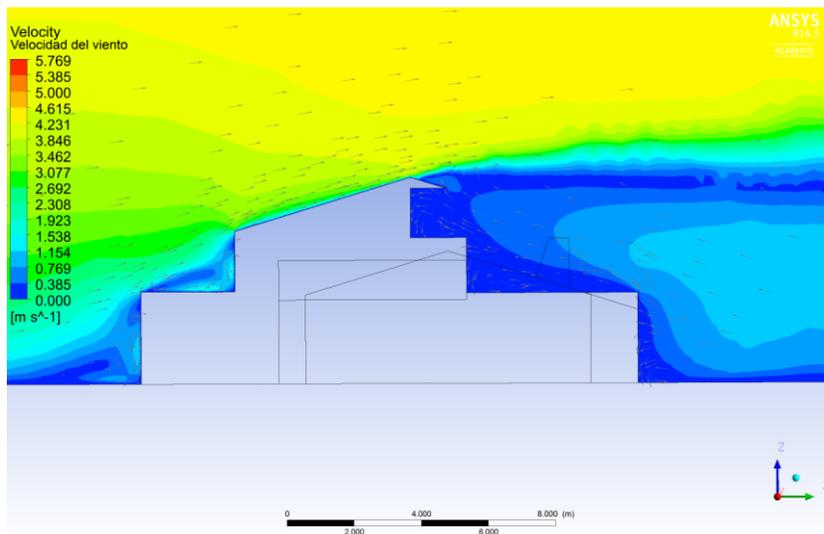


Ilustración 6-18 Contorno y vectores de velocidad para el plano 2 con $u^* = 0,3$. Fuente: ANSYS 14.5.

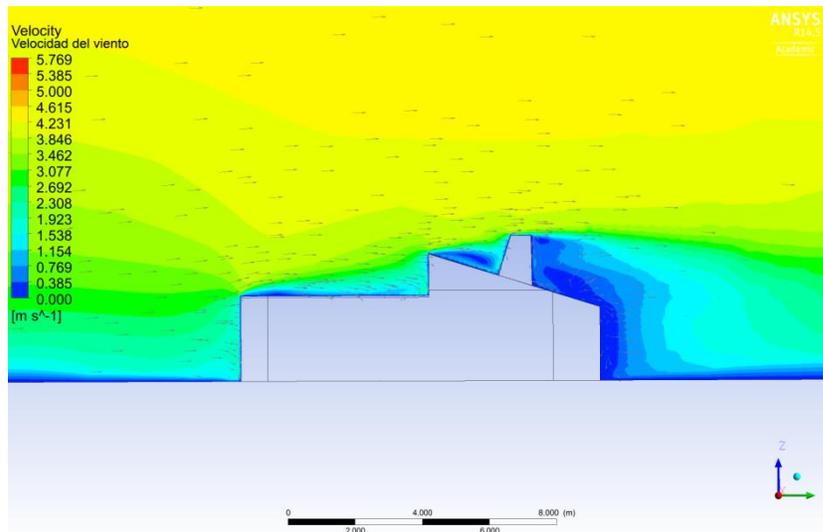


Ilustración 6-19 Contorno y vectores de velocidad para el plano 3 con $u^* = 0,3$. Fuente: ANSYS 14.5.

6.2.4.2. Caso 2: $u^* = 0,6 \left[\frac{m}{s} \right]$

Los resultados obtenidos son semejantes al caso anterior, la Ilustración 6-20 que muestra la isosuperficie global para $C_v = 1,05$, mientras que la Ilustración 6-21, Ilustración 6-22 e Ilustración 6-23 muestran los contornos del factor de concentración para diferentes planos de la vivienda. Se puede apreciar que los resultados no varían en grandes proporciones con respecto al caso anterior, se destaca que el rango de velocidad aumenta debido al aumento de la velocidad de fricción. Nuevamente a partir de las ilustraciones de contorno de velocidad (Ilustración 6-24, Ilustración 6-25 e Ilustración 6-26) se puede apreciar que la velocidad de la parte superior de la vivienda no alcanza grandes variaciones sin importar si es la primera o segunda planta.

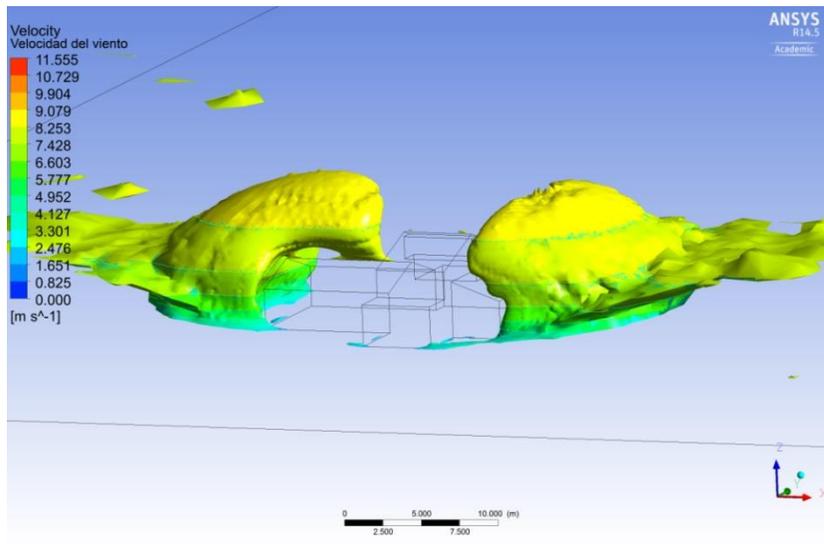


Ilustración 6-20 Isosuperficie y contorno de velocidad para $C_v=1,05$ y $u^* = 0,6$. Fuente: ANSYS 14.5.

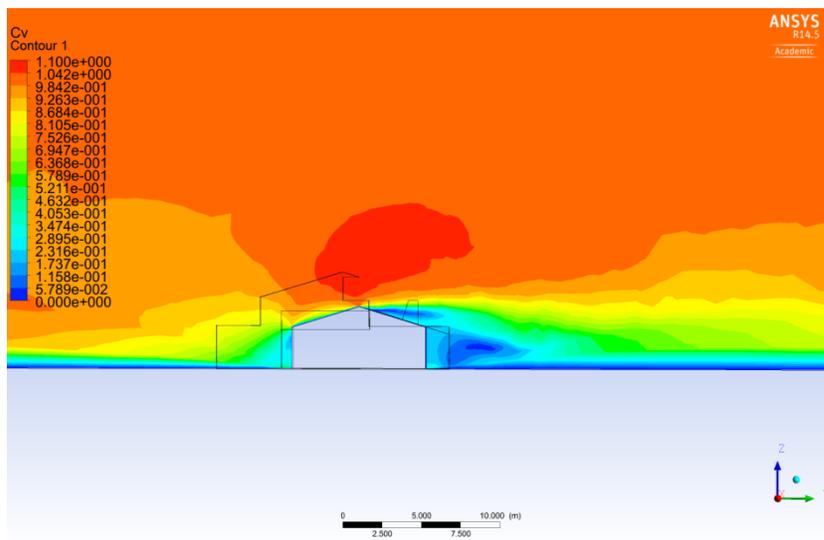


Ilustración 6-21 Contorno del factor de concentración para el plano 1 con $u^* = 0,6$. Fuente: ANSYS 14.5.

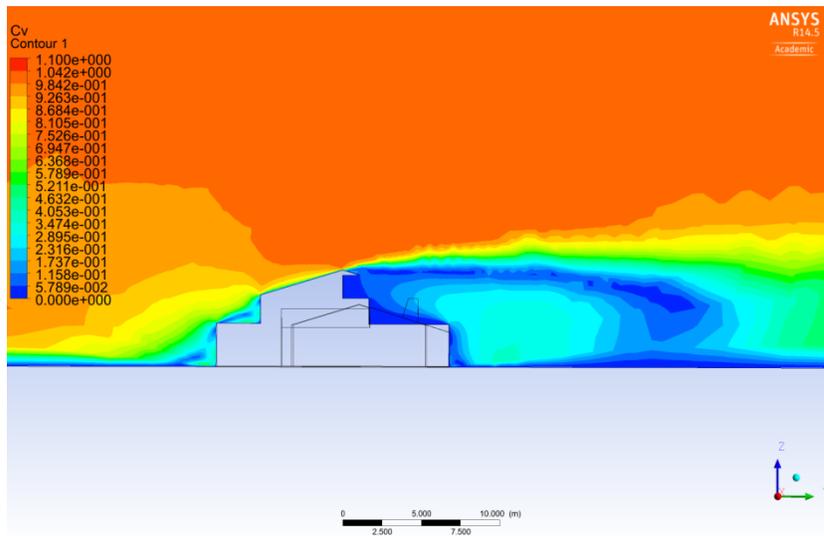


Ilustración 6-22 Contorno del factor de concentración para el plano 2 con $u^* = 0,6$. Fuente: ANSYS 14.5.

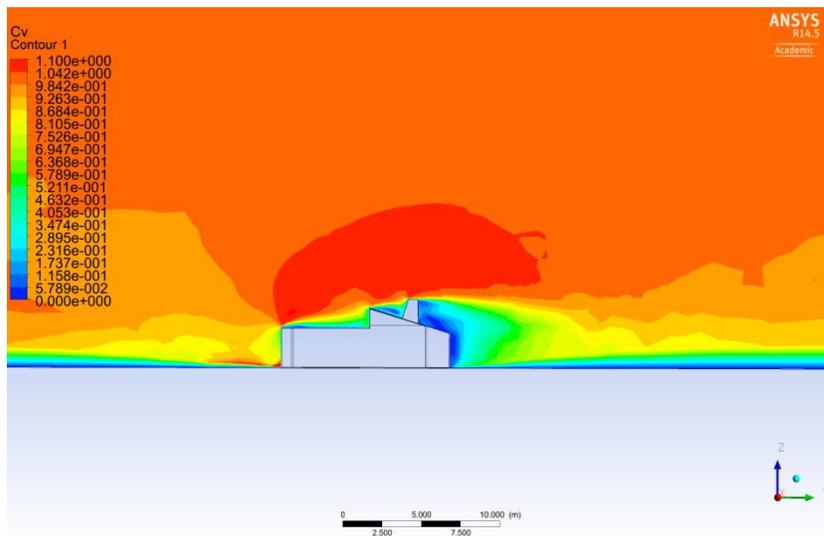


Ilustración 6-23 Contorno del factor de concentración para el plano 3 con $u^* = 0,6$. Fuente: ANSYS 14.5.

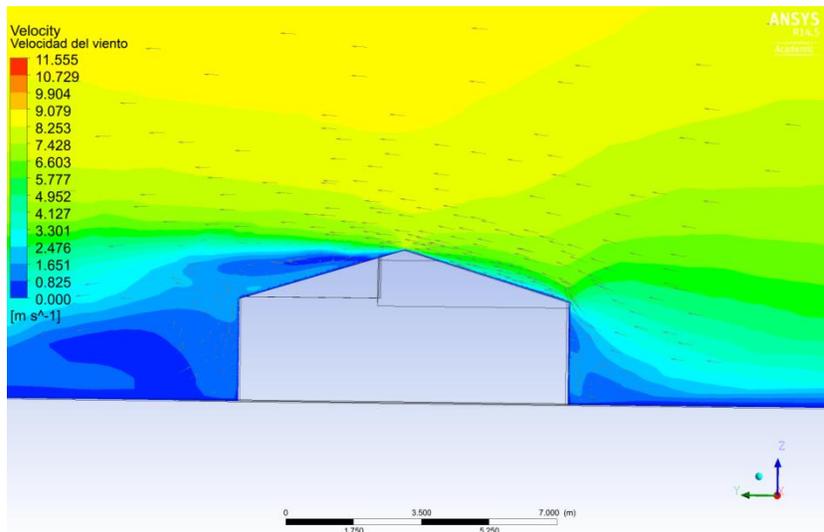


Ilustración 6-24 Contorno y vectores de velocidad para el plano 1 con $u^* = 0,6$. Fuente: ANSYS 14.5.

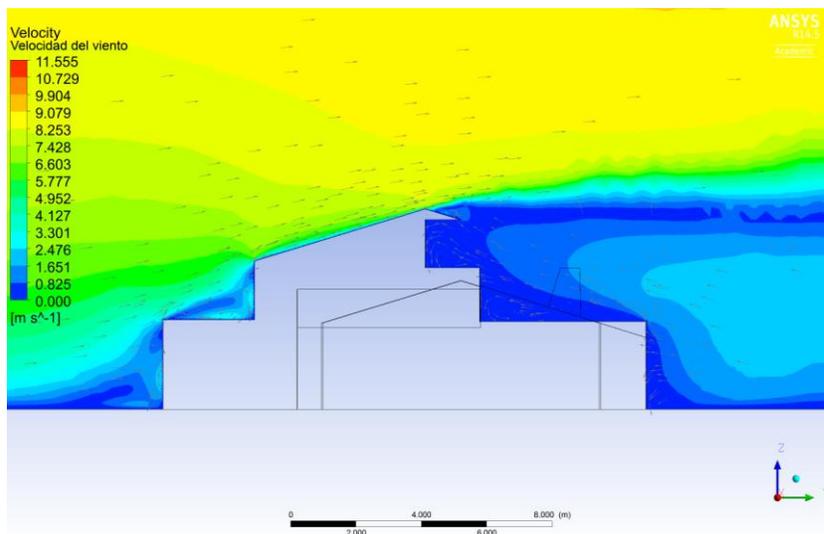


Ilustración 6-25 Contorno y vectores de velocidad para el plano 2 con $u^* = 0,6$. Fuente: ANSYS 14.5.

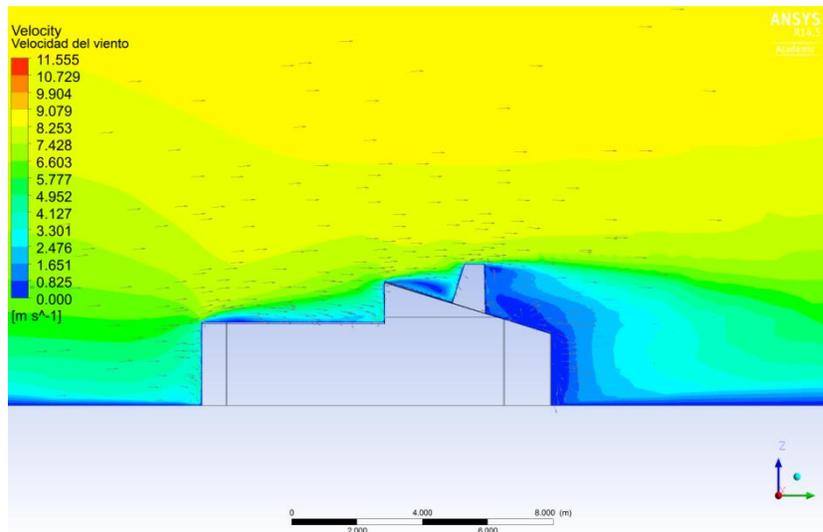


Ilustración 6-26 Contorno y vectores de velocidad para el plano 3 con $u^* = 0,6$. Fuente: ANSYS 14.5.

6.2.5. Análisis de Resultados.

En esta sección se resume y analiza lo presentado en los resultados a partir de las simulaciones computacionales. En primera instancia se presenta el mallado realizado para la simulación junto con los valores de las medidas métricas que determinan la validez de esta. Luego, se presentan las validaciones, tanto de los perfiles impuestos a la entrada del flujo como también el método de solución utilizado. Finalmente, se muestran los resultados para los dos casos realizados en la vivienda mediante ilustraciones de los contornos del factor de concentración y de velocidad en lugares claves, así como ilustraciones de isosuperficies de todo el dominio en donde el factor concentrador de viento es igual a 1,05.

En los contornos de velocidad se puede apreciar como el flujo de aire se desvía por la presencia de la vivienda, provocando zonas de aumento en la velocidad que se ven reflejadas con los contornos del factor de concentración concordando las zonas de aumento de velocidad con las zonas donde el factor es mayor a uno.

A partir de las ilustraciones de la isosuperficie se puede ver que la región donde existe un aumento de la velocidad de al menos un 5% se sitúa sobre la primera planta de la vivienda y en los costados de esta en la dirección del flujo.

Se aprecia que la velocidad del viento en la parte superior de la vivienda no varía en gran cantidad con respecto al nivel de la planta. Ya sea en el primer o segundo piso, la velocidad que se encuentra en el techo es semejante independiente de la variación de altura. Este fenómeno es consecuencia de que el aumento de la velocidad solo está presente en la parte baja de la vivienda, no afectando al flujo que se encuentra en la parte superior de la casa. Para el caso 1 la velocidad promedio que se presenta en la

parte superior de la vivienda tiene un valor de $u = 4 \left[\frac{m}{s} \right]$, mientras que para el caso 2, con el aumento de la velocidad de fricción el valor promedio del flujo aumenta a $u = 7 \left[\frac{m}{s} \right]$, valores muy por encima de los datos obtenidos a partir del estudio del recurso eólico mediante la estación meteorológica del DFG.

A partir de los resultados de los contornos del factor de concentración se puede apreciar el efecto que provocan las distintas geometrías de la vivienda en la aceleración del flujo de aire, se produce un mayor efecto cuando el viento golpea una esquina de la casa como el caso del plano 3, no así cuando hay presencia de techos con cierta inclinación como el caso de los planos 1 y 2.

Se puede realizar un análisis en cada plano estudiado destacando que el plano 3 posee la mayor región de aumento de la velocidad, esto se explica por el fenómeno descrito anteriormente en donde el efecto de la esquina de la vivienda que golpea el flujo provoca una región más extensa de aumento de velocidad. Además se aprecia que la región de aprovechamiento energético presente en el plano 3 es una región propicia para la instalación de aerogeneradores debido a la superficie del techo que existe. A partir del plano 1 se puede ver que existe una única zona de aumento de velocidad justo en el vértice del techo de la vivienda, por lo que existe una mayor complejidad para el aprovechamiento de este recurso, mientras tanto, para el plano 2, solo se puede destacar que si bien, existen zonas en donde el factor de concentración es mayor a 1, esta diferencia no es significativa para un verdadero aprovechamiento (menores al 2%).

Otro punto a destacar que se puede desprender a partir de este estudio se encontró regiones de aumento de la velocidad del viento, además este aumento corresponde a un valor del 5%, valor importante a la hora de seleccionar la ubicación de un aerogenerador considerando que es necesario maximizar la obtención de energía eólica.

Finalmente, se puede concluir que el diseño de una casa si afecta al potencial aprovechamiento del recurso eólico, siendo un factor importante si se piensa en la construcción de viviendas sustentables en un futuro. A partir de este estudio, queda en evidencia que existen zonas de mayor potencial eólico gracias al efecto que provoca una buena geometría dentro de la vivienda.

6.3. Criterios de Emplazamiento.

A partir de los resultados obtenidos y el análisis realizado anteriormente, se desprenden los ciertos criterios de emplazamiento para turbinas eólicas de eje vertical de pequeña escala para viviendas urbanas. Estos criterios de emplazamiento se caracterizan por ser de carácter general, es decir, pueden ser utilizados en cualquier vivienda sin importar la geometría que esta tenga. Se pueden distinguir los siguientes criterios:

- Con el fin de maximizar la generación energética de las turbinas y tomando en cuenta los resultados de las iso-superficies, es posible determinar que las zonas donde existe un real aumento en el potencial eólico es por sobre el nivel del techo de la vivienda. Si bien a los costados de la vivienda, bajo el nivel del techo, existe un aumento en el potencial eólico, este no alcanza a ser significativo debido a la escala altura, por ende, baja velocidad del flujo de aire. Es por eso que se prefiere ubicar el generador eólico por sobre el nivel del techo, ya sea por encima o los costados de este.
- A partir de las líneas de contorno de la velocidad del viento alrededor de la casa, es posible apreciar el aire, al pasar por alguna elevación, ya sea un piso superior o una chimenea, se ve obligado a esquivar este obstáculo generando una zona de recirculación donde no existen grandes velocidades en el flujo, por lo que el emplazamiento de turbinas en este sector no sería ventajoso.
- De la misma forma que el punto anterior, el flujo de aire, al verse enfrentado a un obstáculo, ya sea alguna elevación superior o una chimenea, este se ve obligado a esquivarlo, por lo que delante de dicha construcción genera un fenómeno de desprendimiento de flujo, produciendo zonas de disminución de la velocidad del flujo, ya que este debe elevarse para pasar por encima del obstáculo. Es por esto que se recomienda no emplazar turbinas en zonas anteriores a construcciones.
- Acorde a los resultados obtenidos de los contornos del factor de concentración se desprende que el plano donde existe una mayor región de aumento en el potencial eólico es donde el techo de la vivienda no posee inclinación. La región se desarrolla completamente sobre 1 metro de altura a partir del techo y se extiende a lo largo de la extensión del techo hasta una altura de aproximadamente 6 metros, por lo que se recomienda utilizar una región que esté por encima del metro de altura y no mayor a los 5 metros para la instalación de las turbinas.
- Al encontrar la presencia de un techo con inclinación, se puede apreciar que mientras más baja es esta inclinación, y más largo es su extensión es mayor la región de aumento de potencial eólico, la cual se ubica por sobre el vértice que se forma entre los dos techos inclinados. La zona queda totalmente desarrollada por sobre un metro del vértice y posee una extensión de aproximadamente 4 metros x 4 metros, recomendando así, la ubicación de una turbina de un tamaño no mayor a los 3 metros x 3 metros.

7. Conclusiones.

Este trabajo tuvo como fin el estudio del recurso del viento en ambientes urbano y la obtención de regiones de aprovechamiento de energía eólica en una vivienda urbana para la elaboración de criterios de emplazamiento que permitan una instalación futura de aerogeneradores. Esto se realiza a partir de simulaciones computacionales utilizando el método de volúmenes finitos mediante el software comercial ANSYS FLUENT 14.5.

Luego, a partir de este estudio se puede concluir lo siguiente.

- Modelaciones en CFD predicen zonas específicas de aumento de velocidad de viento alrededor de la casa.
- Es posible obtener un aumento en la velocidad del viento del 5% por efecto de la geometría de la vivienda, valor que se puede extender a cualquier vivienda que comparta geometrías similares.
- Las áreas de aumento de velocidad del flujo se presentan en la planta baja y costados de la vivienda en la dirección al fluido.
- Las regiones de concentración dependen exclusivamente de la geometría presente en la vivienda. Para el caso estudiado existe una mayor zona de aprovechamiento cuando el flujo se enfrenta a obstáculos más abruptos que cuando esta la presencia de un techo inclinado.
- Los criterios definidos son de carácter general, por lo que son aplicables a cualquier vivienda, sin importar la geometría que esta posea. Los cuales son:
 - Ubicar el generador eólico por sobre el nivel del techo, ya sea por encima o los costados de este.
 - No emplazar la turbina en zonas donde el flujo de aire se vea obstaculizado por la arquitectura de la vivienda, ya sean plantas superiores o chimeneas entre otras.
 - No emplazar la turbina eólica antes de alguna arquitectura construida, sea esta una planta superior, chimenea o cambio en la forma de la techumbre.
 - Preferir el emplazamiento de generadores eólicos sobre techos sin inclinación a una altura no menor de 1metro. La altura de la instalación no debe sobrepasar los 5 metros a partir del techo.
 - En caso de ubicar la turbina eólica sobre un techo inclinado, preferir el vértice de este a una altura no menor de 1metro. El tamaño de la turbina no debe sobrepasar los 3mx3m.

Para la continuidad del estudio se recomiendan los siguientes puntos:

- Continuar el estudio en la misma vivienda modificando la dirección del viento, verificando si existen buenas zonas de aprovechamiento del potencial eólico.
- Realizar el mismo estudio en otras viviendas de características semejantes y totalmente diferentes con el objetivo de comprobar los efectos producidos por la geometría de la vivienda y estudiar el efecto de otras geometrías.
- Realizar un estudio con el fin de encontrar una geometría óptima que maximice posibles regiones de aumento de velocidad que sean acorde a los requerimientos arquitectónicos en un ambiente urbano.
- Realizar mediciones in-situ con el fin de comprobar el estudio realizado de manera computacional.

Bibliografía.

- [1] “¿Qué es un aerogenerador eólico y cómo funciona?” [Online]. Available: http://fresno.ulima.edu.pe/wu/wuca_bd004.nsf/energia-eolica/aerogenerador.
- [2] S. Mathew, *Sathyajith Mathew Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. .
- [3] S. Mertens, “Wind Energy in the Built Environment Concentrator Effects of Buildings Wind Energy in the Built Environment Concentrator Effects of Buildings.”
- [4] H. Panofsky and J. Dutton, “Atmospheric turbulence. Models and methods for engineering applications,” *New York Wiley, 1984*, 1984.
- [5] F. R. S. A. A. Townsend, “The Structure of Turbulent Shear Flow.” .
- [6] F. Bañuelos Ruedas, C. Angeles Camacho, J. A. Serrano García, and D. E. Muciño Morales, “Análisis y Validación de Metodología Usada Para la Obtención de Perfiles de Velocidad de Viento,” 2008. [Online]. Available: <http://es.scribd.com/doc/11545563/Analisis-de-perfiles-verticales-de-viento->.
- [7] S. M. Mertens, “Small wind turbines for the built environment,” pp. 11–15, 2005.
- [8] J. Anderson, *Computational fluid dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [9] Y. Yang, M. Gu, S. Chen, and X. Jin, “New inflow boundary conditions for modelling the neutral equilibrium atmospheric boundary layer in computational wind engineering,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 97, no. 2, pp. 88–95, Feb. 2009.
- [10] C. Petit, *BEST PRACTICE GUIDELINE FOR THE CFD SIMULATION OF FLOWS IN THE URBAN ENVIRONMENT QUALITY ASSURANCE AND IMPROVEMENT OF*, no. May. 2007, pp. 1–52.
- [11] J. Zhang and Q. Yang, “Study of Horizontally Homogeneous Atmosphere Boundary Layer Based on Standard k-e Model,” *2009 Int. Conf. Eng. Comput.*, pp. 21–24, 2009.
- [12] I. Abohela, N. Hamza, and S. Dudek, “Effect of roof shape , wind direction , building height and urban con fi guration on the energy yield and positioning of roof mounted wind turbines,” *Renew. Energy*, vol. 50, pp. 1106–1118, 2013.
- [13] B. Blocken, T. Stathopoulos, and J. Carmeliet, “CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems,” *Atmos. Environ.*, vol. 41, no. 2, pp. 238–252, Jan. 2007.
- [14] T. D. Canonsburg, “ANSYS Meshing User ’ s Guide,” vol. 15317, no. November, pp. 724–746, 2010.
- [15] “El Explorador Eólico 2012 Descripción y Manual de Uso Preparado por :,” 2012.

- [16] “Estación Meteorológica DGF.” [Online]. Available:
http://infomet.dgf.uchile.cl/OBSERVACIONES/estacion_met_dgf.gif.
- [17] I. Abohela, N. Hamza, and S. Dudek, “Validating CFD Simulation Results : Wind flow around a surface mounted cube in a turbulent channel flow,” no. November, pp. 1–7, 2012.