



POSGRADOS

MAESTRÍA EN

INGENIERÍA MECÁNICA CON MENCIÓN EN
DISEÑO DE SISTEMAS MECÁNICOS,
HIDRÁULICOS Y TÉRMICOS

RPC-SO-24-NO.540-2020

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE TITULACIÓN CON
COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN
APLICADA Y/O DE DESARROLLO

TEMA:

METODOLOGÍA PARA LA VIABILIDAD
DEL USO DE AEROGENERADORES
SOBRE EDIFICACIONES EN ZONAS
URBANAS DE LA CIUDAD DE CUENCA
APLICANDO ANÁLISIS EN CFD

AUTORES:

BRYAN ALCÍVAR CRUZ
DANIEL MARINO JIMÉNEZ VÉLIZ

DIRECTOR:

CÉSAR NIETO LONDOÑO

CUENCA – ECUADOR
2023

Autores:



BRYAN ALCÍVAR CRUZ

Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica del Litoral
Candidato a Magíster en Ingeniería Mecánica con mención en Diseño
De Sistemas Mecánicos, Hidráulicos Y Térmicos por la Universidad
Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.
alcivarbryan@gmail.com



DANIEL MARINO JIMÉNEZ VÉLIZ

Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica del Litoral
Candidato a Magíster en Ingeniería Mecánica con mención en Diseño
De Sistemas Mecánicos, Hidráulicos Y Térmicos por la Universidad
Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.
dmarinojv@gmail.com

Dirigido por:



CÉSAR NIETO LONDOÑO

Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional de Colombia, Medellín
Magister en Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín
Doctor en Ingeniería, Universidad Pontificia Bolivariana,
Medellín-Colombia
cesar.nieto@upb.edu.com

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2023 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

BRYAN ALCÍVAR CRUZ

DANIEL MARINO JIMÉNEZ VÉLIZ

Metodología para la viabilidad del uso de aerogeneradores sobre edificaciones en zonas urbanas de la ciudad de Cuenca aplicando análisis en CFD.

DEDICATORIA

BRYAN:

El presente trabajo de titulación lo dedico principalmente a mis padres José Gabriel Alcívar Rivas y Sandra Leticia Cruz Rodríguez, que me apoyaron y contuvieron en los malos y buenos momentos que he afrontado a lo largo de mi formación académica y profesional, a mis queridos hermanos Bruno Alcívar, Ronald Alcívar y Sandra Alcívar, por enseñarme a afrontar las dificultades que se presentaron en mi vida; a mi cuñada María Fernanda de la Roche, por recordarme el valor de la perseverancia y de luchar por los sueños que cada uno tiene; a mi amigo Daniel Marino Jiménez Veliz, por su paciencia y comprensión al afrontar este nuevo reto académico juntos; y finalmente a los ingenieros Fabio García y Ricardo Norero, por permitirme realizar mis estudios de posgrados mientras realizaba mis actividades profesionales.

DANIEL:

Este trabajo de titulación va dedicado con profundo cariño a mis padres Luz Veliz Franco y Daniel Jiménez Montesdeoca, por su apoyo y cuidado a lo largo de mi formación personal y académica; a mi tío Julio Veliz Franco, por su confianza inquebrantable en cada proyecto y desafío presente; a mi hermano Daniel Jiménez Véliz, por impulsarme a mejorar continuamente; a mi amigo Bryan Alcívar Cruz, por compartir este reto académico; a mis amigos Julio Hernández, Marcos Endara, Joel Bravo, Luis Ajila y Daniela Ichazo por las anécdotas e historias que hemos compartido y aportan un aprendizaje humano y profesional en mi vida.

AGRADECIMIENTO

Nuestro agradecimiento a Cesar Nieto Londoño, por su apoyo y guía impartidos en el desarrollo de cada etapa del proyecto. sin usted y su constancia no se hubiese logrado el objetivo de este proyecto. También a la Universidad Politécnica Salesiana, por el aporte a nuestro crecimiento profesional mediante su programa de formación académica, y a los docentes involucrados en los módulos por compartir sus conocimientos desde el ámbito profesional y académico.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	17
Abstract	18
Introducción	19
1 Determinación del Problema.....	22
1.1 Objetivo General.....	23
1.2 Objetivos Específicos	23
2 Marco teórico referencial.....	24
2.1 Energías Renovables	24
2.2 Energía eólica.....	25
2.2.1 Escala de Beaufort	26
2.3 Aerogeneradores	28
2.3.1 Tipos de Aerogeneradores	28
2.3.2 Estándar IEC 61400-2.....	29
2.3.3 Turbinas de eje vertical VAWT	30
2.4 La Generación Eólica.....	32
2.4.1 Distribución de Velocidad de Viento	33
2.4.2 Dirección del Viento	33
2.4.3 Potencia Eólica de un Aerogenerador	34
2.4.4 Análisis Computacional	34
3 Materiales y metodología.....	37
3.1 Información preliminar	38
3.2 Delimitación del área de estudio	39
3.3 Adquisición y procesamiento de datos meteorológicos	41
3.4 Modelo físico de sitio de interés.....	45
3.5 Análisis computacional CFD.....	46
3.5.1 Configuración de la malla	46
3.5.2 Consideraciones en la discretización.....	50
3.5.3 Modelo de turbulencia	51
3.5.4 Condiciones de frontera	51
3.6 Selección del sitio de instalación de aerogeneradores	52
3.7 Cálculo de la densidad de potencia disponible	57

3.8	Selección del VAWT	57
3.9	Cálculo de generación de energía anual.....	57
4	Resultados y discusión.....	59
4.1	Comportamiento del viento	59
4.2	Intensidad de turbulencia.....	61
4.3	Contornos de velocidad de viento.....	68
4.4	Evaluación del sitio de montaje del aerogenerador.....	75
4.5	Densidad de potencia disponible.....	81
4.6	Selección de aerogenerador VAWT	83
4.7	Generación de energía anual.....	85
5	Conclusiones.....	87
6	Trabajos Futuros	90
7	Referencias Bibliográficas.....	91
Anexos	95
	Anexo I: Comportamiento del viento	95
	Anexo II: Contornos de intensidad de turbulencia.....	97
	Anexo III: Contornos de velocidad de viento	104
	Anexo IV: Evaluación del sitio de montaje del aerogenerador	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Información de uso de energías por tipo de recurso.</i>	24
Tabla 2 <i>Escala de Beaufort.</i>	27
Tabla 3 <i>Listado de parroquias de la provincia del Azuay.</i>	39
Tabla 4 <i>Velocidades de viento con mayor frecuencia en la estación UPS.</i>	44
Tabla 5 <i>Velocidades de viento con mayor frecuencia en la estación UETS.</i>	44
Tabla 6 <i>Datos de condiciones de fronteras ingresados al dominio computacional.</i>	51
Tabla 7 <i>Resultados numéricos de la intensidad de turbulencia en el edificio objetivo de UETS, a distintas alturas y velocidades del viento.</i>	62
Tabla 8 <i>Resultados numéricos de la intensidad de turbulencia en el edificio objetivo de UPS, a distintas alturas y velocidades del viento.</i>	66
Tabla 9 <i>Resultados numéricos de la velocidad del viento en el edificio UETS, a distintas posiciones y velocidades del viento.</i>	68
Tabla 10 <i>Resultados numéricos de la velocidad del viento en el edificio objetivo de UPS, a distintas posiciones y velocidades del viento.</i>	72
Tabla 11 <i>Datos técnicos de los modelos FS-V-200 y 300, respectivamente.</i>	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Desarrollo de perfil de velocidades de viento al interactuar sobre un terreno</i>	26
Figura 2	<i>Imagen referencial aerogeneradores verticales a) Darrius b) Savonius</i>	31
Figura 3	<i>Imagen referencial de coeficiente de potencia de aerogeneradores</i>	32
Figura 4	<i>Diagrama de flujo de la metodología aplicado en el caso de estudio</i>	37
Figura 5	<i>Vista superior ciudad Cuenca</i>	38
Figura 6	<i>Fotografía aérea de la ubicación de la Unidad Educativo Técnico Salesiano (UETS)</i>	40
Figura 7	<i>Fotografía aérea de la ubicación de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca</i>	41
Figura 8	<i>Distribución de Weibull de la variable de velocidad promedio en las estaciones meteorológicas de la ciudad de Cuenca</i>	42
Figura 9	<i>Rosa de los vientos de la variable de dirección del viento en las estaciones meteorológicas de la ciudad de Cuenca</i>	43
Figura 10	<i>Modelo físico tridimensional de sitio de interés: a) Edificaciones de la Unidad Educativa Tecnológico Salesiano y b) Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, Ecuador</i>	45
Figura 11	<i>Modelo computacional del edificio de la UETS a) Mallado del dominio computacional del sitio de interés (parte inferior) y del edificio UETS (parte superior)</i>	47
Figura 12	<i>Distribución de las formas de elementos de malla usando las métricas Skewness y Orthogonal Quality</i>	48
Figura 13	<i>Modelo computacional del edificio de la UPS a) Mallado del dominio computacional del sitio de interés (parte inferior) y del edificio UPS (parte superior)</i>	49
Figura 14	<i>Distribución de las formas de elementos de malla usando las métricas Skewness y Orthogonal Quality</i>	50

Figura 15 Configuración general de las condiciones de frontera del dominio computacional a) UPS, b) UETS	52
Figura 16 Líneas de corriente del viento al entrar en contacto con los edificios objetivos de las zonas a) UETS b) UPS.....	53
Figura 17 Ubicación de planos horizontales de la intensidad de turbulencia tomando como referencia el nivel del suelo en las edificaciones objetivos a) UETS y b) UPS.	54
Figura 18 Ubicación de planos verticales o cortes transversales de contornos de velocidades en las edificaciones objetivo a) UETS y b) UPS.....	55
Figura 19 Ubicaciones de sitios reales para el montaje de aerogeneradores en los edificios objetivos a) UETS y b) UPS.....	56
Figura 20 Líneas de corriente del campo de viento a 1m/s en el edificio objetivo de UETS.	60
Figura 21 Líneas de corriente del campo de viento a 1m/s en el edificio objetivo de UPS.	61
Figura 22 Contornos de intensidad de turbulencia a una altura de 3 m en el edificio objetivo en UETS con velocidad de viento de 1 m/s.	63
Figura 23 Contornos de intensidad de turbulencia a una altura de 6 m en el edificio objetivo en UETS con velocidad de viento de 1 m/s.	63
Figura 24 Contornos de intensidad de turbulencia a una altura de 9 m en el edificio objetivo en UETS con velocidad de viento de 1 m/s.	64
Figura 25 Contornos de intensidad de turbulencia a una altura de 12 m en el edificio objetivo en UETS con velocidad de viento de 1 m/s.	64
Figura 26 Contornos de intensidad de turbulencia a una altura de 18 m en el edificio objetivo en UETS con velocidad de viento de 1 m/s.	65
Figura 27 Contornos de la intensidad de turbulencia a una altura de 15 m en el edificio objetivo en UPS con velocidad de viento de 1 m/s.	66
Figura 28 Contornos de la intensidad de turbulencia a una altura de 20 m en el edificio objetivo en UPS con velocidad de viento de 1 m/s.	67

Figura 29 Contornos de la intensidad de turbulencia a una altura de 30 m en el edificio objetivo en UPS con velocidad de viento de 1 m/s.	67
Figura 30 Contornos de velocidad del viento en el plano A de los edificios objetivos en UETS con velocidad de viento de 1 m/s.	69
Figura 31 Contornos de velocidad del viento en el plano B de los edificios objetivos en UETS con velocidad de viento de 1 m/s	70
Figura 32 Contornos de velocidad del viento en el plano C de los edificios objetivos en UETS con velocidad de viento de 1 m/s	70
Figura 33 Contornos de velocidad del viento en el plano D de los edificios objetivos en UETS con velocidad de viento de 1 m/s.	71
Figura 34 Contornos de velocidad del viento en el plano vertical A de los edificios objetivos en UPS con velocidad de viento de 1 m/s.	73
Figura 35 Contornos de velocidad del viento en el plano vertical B de los edificios objetivos en UPS con velocidad de viento de 1 m/s.	73
Figura 36 Contornos de velocidad del viento en el plano vertical C de los edificios objetivos en UPS con velocidad de viento de 1 m/s.	74
Figura 37 Contornos de velocidad del viento en el plano vertical D de los edificios objetivos en UPS con velocidad de viento de 1 m/s.	74
Figura 38 Identificación de sitios para montaje de aerogeneradores en los edificios objetivos de UETS.	75
Figura 39 Velocidad e intensidad de turbulencia a 1m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UETS.	76
Figura 40 Comparación entre la distribución de velocidad en la estación meteorológica vs el sitio ideal de montaje en UETS.	77
Figura 41 Identificación de sitios para montaje de aerogeneradores en los edificios objetivos de UPS.	78
Figura 42 Velocidad e intensidad de turbulencia a 1m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UPS.	79

Figura 43 <i>Comparación entre la distribución de velocidad en la estación meteorológica vs el sitio ideal de montaje en UPS.</i>	80
Figura 44 <i>Distribución Weibull y potencia disponible CTS 2018.</i>	81
Figura 45 <i>Tendencia densidad de potencia disponible CTS periodo 2016 a 2018.</i>	82
Figura 46 <i>Distribución Weibull y potencia disponible UPS 2020.</i>	82
Figura 47 <i>Tendencia densidad de potencia disponible UPS periodo 2016 a 2020.</i>	83
Figura 48 <i>Dimensiones y curva característica del modelo de aerogenerador de eje vertical FS-V-200.</i>	84
Figura 49 <i>Dimensiones y curva característica del modelo de aerogenerador de eje vertical FS-V-300.</i>	85
Figura 50 <i>Punto de operación del sistema eólico en edificio UPS instalando el aerogenerador FS-V-200 W.</i>	86
Figura 51 <i>Punto de operación del sistema eólico en edificio UPS instalando el aerogenerador FS-V-300 W.</i>	86
Figura 52 <i>Líneas de corriente del campo de viento al interactuar en el edificio objetivo de UETS, a) 0.5 m/s, b) 1 m/s, c) 1.5 m/s, d) 2 m/s y e) 2.5 m/s.</i>	95
Figura 53 <i>Líneas de corriente del campo de viento al interactuar en el edificio objetivo de UPS, a) 1 m/s, b) 1.5 m/s, c) 2 m/s y d) 2.5 m/s.</i>	96
Figura 54 <i>Contornos de intensidad de turbulencia del aire a 0,5 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS a a) 3 m, b) 6 m, c) 9 m, d) 12 m y e) 18 m de altura.</i>	97
Figura 55 <i>Contornos de intensidad de turbulencia del aire a 1 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS a a) 3 m, b) 6 m, c) 9 m, d) 12 m y e) 18 m de altura.</i>	98
Figura 56 <i>Contornos de intensidad de turbulencia del aire a 1.5 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS a a) 3 m, b) 6 m, c) 9 m, d) 12 m y e) 18 m de altura.</i>	99
Figura 57 <i>Contornos de intensidad de turbulencia del aire a 2 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS a a) 3 m, b) 6 m, c) 9 m, d) 12 m y e) 18 m de altura.</i>	100

Figura 58 Contornos de intensidad de turbulencia del aire a 2.5 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS a a) 3 m, b) 6 m, c) 9 m, d) 12 m y e) 18 m de altura. 101

Figura 59 Contornos de intensidad de turbulencia del aire a 1 m/s al interactuar con las infraestructuras en UPS a: a) 15 m, b) 20 m y c) 30 m de altura..... 102

Figura 60 Contornos de intensidad de turbulencia del aire a 1.5 m/s al interactuar con las infraestructuras en UPS a: a) 15 m, b) 20 m y c) 30 m de altura. 102

Figura 61 Contornos de intensidad de turbulencia del aire a 2 m/s al interactuar con las infraestructuras en UPS a: a) 15 m, b) 20 m y c) 30 m de altura..... 103

Figura 62 Contornos de intensidad de turbulencia del aire a 2.5 m/s al interactuar con las infraestructuras en UPS a: a) 15 m, b) 20 m y c) 30 m de altura. 103

Figura 63 Contornos de la velocidad pronosticada del aire a 0.5 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS en planos verticales a, a) 0 m, b) 10 m, c) 39 m y d) 69 m. 104

Figura 64 Contornos de la velocidad pronosticada del aire a 1 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS en planos verticales a, a) 0 m, b) 10 m, c) 39 m y d) 69 m. . 105

Figura 65 Contornos de la velocidad pronosticada del aire a 1.5 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS en planos verticales a, a) 0 m, b) 10 m, c) 39 m y d) 69 m. 106

Figura 66 Contornos de la velocidad pronosticada del aire a 2 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS en planos verticales a, a) 0 m, b) 10 m, c) 39 m y d) 69 m. . 107

Figura 67 Contornos de la velocidad pronosticada del aire a 2.5 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS en planos verticales a, a) 0 m, b) 10 m, c) 39 m y d) 69 m. 108

Figura 68 Contornos de velocidad pronosticada del aire a 1 m/s al interactuar con las infraestructuras de UPS en planos verticales a: a) 0 m, b) 30 m, c) 79 m y d) 120 m. . 109

Figura 69 Contornos de velocidad pronosticada del aire a 1.5 m/s al interactuar con las infraestructuras de UPS en planos verticales a: a) 0 m, b) 30 m, c) 79 m y d) 120 m. . 110

Figura 70 Contornos de velocidad pronosticada del aire a 2 m/s al interactuar con las infraestructuras de UPS en planos verticales a: a) 0 m, b) 30 m, c) 79 m y d) 120 m. . 111

Figura 71 Contornos de velocidad pronosticada del aire a 2.5 m/s al interactuar con las infraestructuras de UPS en planos verticales a: a) 0 m, b) 30 m, c) 79 m y d) 120 m. . 112

Figura 72 Velocidad e intensidad de turbulencia a 0.5 m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UETS. 113

Figura 73 Velocidad e intensidad de turbulencia a 1 m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UETS. 114

Figura 74 Velocidad e intensidad de turbulencia a 1.5 m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UETS. 115

Figura 75 Velocidad e intensidad de turbulencia a 2 m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UETS. 116

Figura 76 Velocidad e intensidad de turbulencia a 2.5 m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UETS. 117

Figura 77 Velocidad e intensidad de turbulencia a 1 m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UPS. 118

Figura 78 Velocidad e intensidad de turbulencia a 1.5 m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UPS. 119

Figura 79 Velocidad e intensidad de turbulencia a 2 m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UPS. 120

Figura 80 Velocidad e intensidad de turbulencia a 2.5 m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UPS. 121

ACRÓNIMOS

Listado de los acrónimos utilizados en esta tesis:

SWT Aerogeneradores pequeños

HAWT Aerogeneradores horizontales pequeños

VAWT Aerogeneradores verticales pequeños

CFD Dinámica de fluidos computacional

IEC Comisión internacional electrotécnica

PFD Función de densidad de probabilidad

LES Simulación de grandes turbulencias

RANS Reynolds Navier-Stokes promediado

SIMBOLOGÍA

Listado de los símbolos utilizados en esta tesis:

I_u intensidad de turbulencia

u velocidad

\bar{u} velocidad promedio

h altura

α exponente de caracterización del terreno

ρ densidad

A área

C_p coeficiente de potencia

p presión

μ viscosidad laminar

μ_t viscosidad turbulenta

g gravedad

C_2 constante de flujo turbulento, valor tomado: 1.92

σ_k constante de flujo turbulento, valor tomado: 1.0

σ_ε constante de flujo turbulento, valor tomado: 1.3

METODOLOGÍA PARA LA VIABILIDAD
DEL USO DE AEROGENERADORES
SOBRE EDIFICACIONES EN ZONAS
URBANAS DE LA CIUDAD DE CUENCA
APLICANDO ANÁLISIS EN CFD

AUTOR(ES):

BRYAN ALCÍVAR CRUZ
DANIEL JIMÉNEZ VÉLIZ

RESUMEN

En la actualidad, el uso de la energía eólica para la generación de electricidad en zonas urbanas enfrenta varios retos entre ellos la disponibilidad intermitente del recurso, potencial de viento, turbulencias entre edificaciones, tecnologías compactas, otros. El objetivo de este estudio fue elaborar una metodología para la viabilidad del uso de aerogeneradores en la zona urbana de la ciudad de Cuenca, Ecuador, basada en el procesamiento de datos en dinámica de fluidos computacional (CFD). Se determinó el recurso eólico disponible en la zona, se construyeron las distribuciones de frecuencia de velocidad y densidad de potencia disponible, se establecieron sitios potenciales de montaje para el aerogenerador y de la misma manera, se estimó la generación de energía con respecto a un modelo comercial de aerogenerador tipo VAWT teniendo en cuenta la topografía urbana. Entre los resultados obtenidos de la simulación en ANSYS FLUENT®, se incluyen velocidad, dirección de viento, intensidad de turbulencia. Luego, con los perfiles de velocidades pronosticadas e intensidad de turbulencia se determinaron los posibles sitios de montajes del aerogenerador en las edificaciones objetivas ubicadas en las parroquias de Yanuncay y El Vecino. En la edificación ubicada en la parroquia El Vecino, se obtuvo que el sitio referenciado como B, en términos de baja intensidad de turbulencia e incremento de velocidad, presentó las mejores condiciones para el montaje de un aerogenerador. Se evaluaron dos modelos de aerogeneradores comerciales tipo VAWT, el FS-V-200 y FS-V-300, en los cuales con disponibilidad de velocidades de viento mayores a 4 m/s entregarían 1817.7 kWh/año y 4966.9 kWh/año respectivamente, en contraste con los 17.90 kWh/año de la energía anual que se obtendría con el recurso actual. A partir de ello, se concluyó que existen oportunidades en diseño de estos aerogeneradores de baja potencia y evaluación del uso secciones cónicas como difusores y concentradores para incrementar la velocidad y potencia.

Palabras claves: CFD, Energía eólica, aerogeneradores, ANSYS FLUENT®

ABSTRACT

Currently, the use of wind power for electricity generation in urban areas has several challenges including intermittent availability of the resource, wind potential, turbulence between buildings, compact technologies, etc. The objective of this study was to develop a methodology for the feasibility of using wind turbines in the urban area of the city of Cuenca based on data processing in computational fluid dynamics (CFD). The available wind resources in the area were determined, the frequency, speed and power density distributions were constructed, potential assembly sites for the wind turbine were established and, in the same way, the power generation was estimated with respect to a commercial model of wind turbine type VAWT considering the urban topography. Results obtained from the ANSYS FLUENT® simulation include speed, wind direction, turbulence intensity. Then, with the predicted velocity and turbulence intensity profiles, the possible wind turbine mounting sites in the target buildings located in the parishes of Yanuncay and El Vecino. In the building located in the parish of El Vecino, it was found that the site referenced as B, in terms of low turbulence intensity and speed increase, presented the best conditions for the assembly of a wind turbine. Two models of commercial wind turbines type VAWT were evaluated, the FS-V-200 and FS-V-300, in which, with wind speeds above 4 *m/s*, they would deliver 1817.7 *kWh/year* and 4966.9 *kWh/year* respectively, in contrast to the 17.90 *kWh/year* of annual energy that would be obtained with the current resource. From this, it was concluded that there are opportunities in the design of these low power wind turbines and evaluation of the use of conical sections such as diffusers and concentrators to increase speed and power.

Key Words:

CFD, wind energy, wind turbines, ANSYS FLUENT®.

INTRODUCCIÓN

La demanda de energía es imprescindible para el desarrollo de las actividades diarias del individuo, su progreso y bienestar en sociedad. El crecimiento de la industrialización, población y urbanización a nivel mundial requiere un consumo proporcional de energía, proyectando un incremento del 50% hacia el 2050. Sin embargo, para suplir estos requerimientos, la generación de energía hasta el 2020 depende en un 78.4% de la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), un 19.3% de fuentes renovables (modernas y tradicionales), y 2.3% de tipo nuclear (Nalley & LaRose, 2021). Esta situación desencadena una preocupación por los efectos adversos hacia el ambiente, por lo que existen avances modernos en propuestas tecnológicas para las energías de tipo eólica, solar fotovoltaica e hídricas, orientadas a cuatro segmentos: generación de potencia, enfriamiento y calentamiento, combustible para transporte, y energía fuera de la red para zonas rurales (Kc et al., 2019). Con la implementación y progreso de esta segmentación, se estima para el 2050 que las fuentes renovables, tengan una proyección de crecimiento similar a la de combustibles fósiles.

En 2021, la capacidad de generación de potencia proveniente de fuentes renovables a nivel mundial fue de 3'063,926 MW, de lo cual 824,874 MW (26.9%) corresponde a eólica. La potencia eólica generada reportó un incremento del 13% desde el 2020 hasta el 2021 (IRENA, 2022). Con respecto a la generación de energía eólica a pequeña escala; en el 2015 fueron instalados 990 pequeños aerogeneradores (SWT), los cuales representaban 949 MW de energía eólica generada; a nivel mundial esto representa un 0.23%. De los países que impulsa y realiza las instalaciones de los aerogeneradores de baja potencia son: China con 43%, Estados Unidos 25%, Reino Unido 15% e Italia 6.3 %. Para años posteriores, incrementó en 11% de instalaciones con respecto al año 2015, y esto se debe a que actualmente,

se ha ampliado el mercado con modelos de aerogeneradores de generación a baja escala, el cual, los modelos de ejes horizontales han tenido un impulso sobre los de ejes verticales (Torres, Alvarez, et al., 2020)

En el Ecuador, existe la presencia de vientos con distintas direcciones y velocidades, ocasionados por los gradientes de temperatura y presión entre los polos y la línea ecuatorial. El potencial aprovechado al 2021 es de 21 MW (IRENA, 2022), mientras que el potencial eólico bruto disponible es de 1671 MW y a corto plazo es de 884 kW. Entre las provincias con mayor recurso eólico, están Loja, Azuay, El Oro, Pichincha, Chimborazo y Cañar (Loor et al., 2021).

Las centrales eólicas con aerogeneradores de alta potencia pueden presentar algunas desventajas como el área de implantación disponible, impacto visual y acústico, calidad energía entregada a la red, pérdidas de transmisión y distribución de electricidad a los consumidores. Un modo de reducir algunas de estas desventajas es el uso de aerogeneradores tipo VAWT (eje vertical), los cuales emplean el recurso eólico para suministro de la demanda de electricidad en hogares y edificios (García, 2019).

Hasta la fecha, es limitado el acceso a un estudio que evalúe la viabilidad para el uso de aerogeneradores en las provincias anteriormente mencionadas, con disponibilidad del recurso eólico y cuya morfología urbana tiende al crecimiento en vertical (Bustamante, 2017). Por esta razón, este trabajo tiene como objetivo presentar una metodología para la viabilidad del uso de aerogeneradores sobre edificaciones en zonas urbanas de la ciudad de Cuenca aplicando análisis en CFD, que permita en lo posterior, el análisis y discusión para la implementación de un sistema de generación de energía eólica en esta ciudad, en base a criterios tales como: la disponibilidad del recurso eólico, dirección dominante del viento, comportamiento del perfil de velocidades respecto a las edificaciones representativas de la zona y e intensidad de turbulencia para el sitio de instalación seleccionado.

El presente estudio se estructura de la siguiente manera:

El primer capítulo comprende la descripción de la situación problemática referente al recurso eólico en la ciudad de Cuenca. El segundo capítulo contiene el estado del arte y fundamentos de ingeniería. El tercer capítulo detalla la metodología a utilizar para el procesamiento de los datos crudos proporcionados por algunas de las estaciones meteorológicas del Azuay. El cuarto capítulo muestra y analiza los resultados obtenidos de los cálculos analíticos y simulaciones., tales como: velocidades, dirección de viento, comportamiento del perfil de velocidades a distintos niveles y planos de corte, intensidad de turbulencia, otros. El quinto capítulo contiene las conclusiones y recomendaciones del estudio realizado.

1 DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

En Ecuador, desde 1975, identifica al petróleo como fuente primaria en la generación de energía eléctrica (Peralta et al., 2013), y en el año 2008 el país ocupaba el cuarto puesto de dependencia al combustible fósil en la generación de energía eléctrica, llegando a un 85%; y con lo que respecta a la demanda eléctrica, esta aumentó en 6% por año. Por ende, se promovió la utilización de las energías renovables en el Plan Nacional para el Buen Vivir en el año 2009. En el año 2011, apenas el aporte energético de fuentes renovables fue del 1,7% (Ferreira et al., 2014).

En el Ecuador, el aprovechamiento del recurso eólico es reciente con respecto a otras fuentes de energías renovables. Entre los proyectos implementados esta el parque eólico del Villonaco, el cual posee 11 aerogeneradores y operan con una velocidad del viento de 12.4 m/s, generando una potencia nominal de 16,5 MW (Ferreira et al., 2014). En el parque Nacional Limoncocha, se realizó un levantamiento de datos para la realización de un proyecto de cogeneración de energía basados en los recursos solar y eólico, sin embargo se determinaron velocidades alrededor de 3.6 m/s, resultando inviable la implementación de aerogeneradores (Cedeño et al., 2017).

Otra alternativa para el aprovechamiento de este recurso es en ambientes urbanos, debido al elevado potencial de uso sustentable para las actividades diarias, minimizando la adición de grandes cargas a la red eléctrica. No obstante, la generación de energía eólica está condicionada por las variaciones topológicas y obstáculos que modifican el perfil de velocidades de viento y del área de barrido del aerogenerador; por lo que la selección del lugar apropiado para la instalación desempeña un rol importante.

Azuay, es la segunda provincia con mayor disponibilidad de recurso eólico y en la ciudad Cuenca, se encuentra una amplia densidad poblacional y variedad de edificaciones, por ende, ¿se puede establecer una metodología para la viabilidad del uso de aerogeneradores sobre edificaciones en zonas urbanas de la ciudad de Cuenca aplicando análisis en CFD?

1.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer una metodología para la viabilidad del uso de aerogeneradores sobre edificaciones en zonas urbanas de la ciudad de Cuenca aplicando análisis en CFD.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el potencial eólico a partir de datos meteorológicos de la ciudad de Cuenca de fuentes primarias y secundarias para conocer velocidades del viento, humedad y otros parámetros que intervienen en el estudio.
- Identificar la tecnología de aerogeneradores comerciales para ser usados sobre edificaciones en zonas urbanas, a fin de identificar sus condiciones de operación y parámetros técnicos.
- Evaluar mediante simulación numérica el comportamiento del recurso eólico disponible en Cuenca factible para la operación de un aerogenerador.
- Comprender mediante simulación numérica el efecto de factores de operación en la potencia estimada de energía eólica para cada posición del aerogenerador con respecto a las especificaciones del fabricante.

2 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

En este capítulo se establecen los conceptos necesarios para la comprensión del recurso eólico, el procesamiento de datos extraído de estaciones meteorológicas, ecuaciones gobernantes y modelos de turbulencia usando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y tecnología existente para el aprovechamiento del viento a través de la generación de electricidad.

2.1 ENERGÍAS RENOVABLES

La energía renovable proviene a partir del procesamiento de fuentes que se renuevan constantemente. Entre ellas el sol, viento, lluvia, corrientes marinas, biomasa, geotérmica, otros. En la última década varias fuentes de energía renovable han sido instaladas para suministrar electricidad a las redes de distribución a un costo competitivo (Jurasz et al., 2020). Esto como consecuencia de adoptar medidas que solucionen la crisis climática al mismo tiempo que se incrementa la demanda energética. En el año 2021, según la tabla 1, los datos estadísticos del consumo energético global por tipo de fuente y sector fueron:

Tabla 1

Información de uso de energías por tipo de recurso.

Fuente de energía	Porcentaje de uso
Petróleo	28.4%
Gas natural	25%
Carbón	25%
Renovable	19.3%
Nuclear	2.3%

Nota. Tomado de (Nalley & LaRose, 2021)

Es por ello, que varios países, han adoptado políticas que incrementen la contribución de las energías renovables en la matriz energética para reemplazar el uso de combustibles convencionales (Aldeán, 2014). No obstante, la factibilidad del uso de este tipo de energías depende de la disponibilidad y distribución de las fuentes naturales en un sitio geográfico determinado, de la tasa de crecimiento de la población e infraestructura. La aplicación de cualquier tipo de energía renovable exige un análisis de sostenibilidad, basado en los efectos ambientales, costos de externalidades, economía y financiamiento (Mohtasham, 2015).

2.2 ENERGÍA EÓLICA

El viento se origina por los gradientes de temperatura ocasionados por el calentamiento irregular en diversas zonas del planeta y la atmósfera (Reinoso et al., 2016). Las masas de aire caliente en los trópicos ascienden y son reemplazados por las masas de aire frío proveniente de los polos. Este fenómeno también ocasiona una diferencia de presión atmosférica (Escudero, 2008).

Tal como se muestra en la figura 1, la velocidad del viento varía con la altura y la naturaleza del terreno, sobre la cual circulan las masas de aire. Esta se puede representar mediante la siguiente expresión (Torres, Nieto, et al., 2020).

$$\frac{u_2}{u_1} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^\alpha \quad (1)$$

donde:

u_2 velocidad de viento en el punto 2 [m/s]

u_1 velocidad de viento en el punto 1 [m/s]

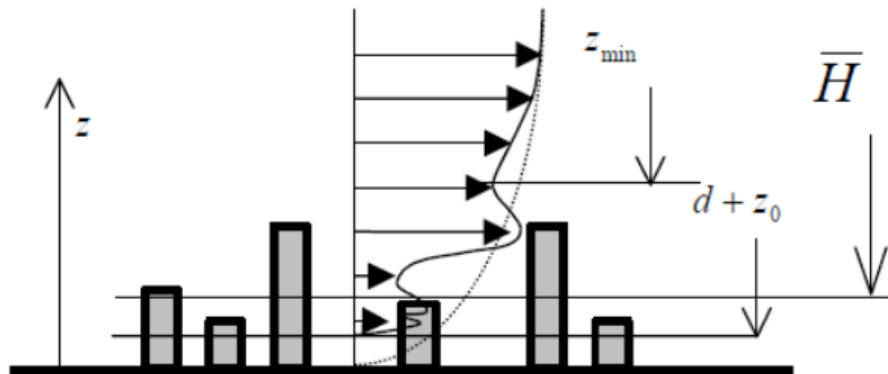
h_2 altura del punto 2 [m]

h_1 altura del punto 1 [m]

α exponente de caracterización del terreno, oscila entre 0.08 y 0.40

Figura 1

Desarrollo de perfil de velocidades de viento al interactuar sobre un terreno.



Nota. El gráfico muestra el desarrollo del perfil de velocidades del viento cuando este interactúa sobre un terreno urbano. Tomado de (Enríquez Millán, 2014)

La energía cinética que puede extraerse de la circulación de una masa de aire se puede cuantificar por la siguiente ecuación:

$$E^{wind}(u) = \frac{1}{2} mu^3 \quad (2)$$

donde:

m masa del aire [kg]

u velocidad del viento [m/s]

2.2.1 ESCALA DE BEAUFORT

La escala de viento de Beaufort es un sistema usado para estimar en función de características visuales la velocidad del viento. Este sistema presentado en la tabla 2, tiene como unidad de medida el grado o número de Beaufort, al que se asocia un término descriptivo y un efecto apreciable en la superficie marina o terrestre (Herrero, 2016).

Tabla 2
Escala de Beaufort.

Grado	Termino descriptivo	Efectos apreciables en tierra	Velocidad (m/s)
0	Calma	Humo vertical	0 a 0.2
1	Ventolina	Se inclina el humo. las banderas y veletas no se mueven	0.2 a 1.4
2	Flojito (brisa muy débil)	Se siente el viento en la cara. Se mueven las hojas de los árboles. las banderas y veletas.	1.4 a 3
3	Flojo (brisa débil)	Se agitan las hojas de los árboles. Las banderas ondean.	3 a 5.3
4	Bonancible (brisa moderada)	Se levanta polvo y papeles pequeños. Se mueven las ramas pequeñas.	5.6 a 7.8
5	Fresquito (brisa fresca)	Se mueven los árboles pequeños. Pequeñas olas en los estanques.	7.8 a 10.5
6	Fresco (brisa fuerte)	Se mueven las ramas grandes. Silban los hilos del tendido eléctrico. Dificultad con los paraguas.	10.5 a 13.1
7	Frescachón (viento fuerte)	Todos los árboles en movimiento. Es difícil andar contra el viento.	13.1 a 17
8	Temporal (duro)	Se rompen las ramas delgadas de los árboles. Generalmente no se puede andar contra el viento.	17 a 20.5
9	Temporal fuerte (muy duro)	Árboles arrancados y danos en edificios.	20.5 a 24.5
10	Temporal duro (temporal)	Danos graves en edificios.	24.5 a 28.3
11	Temporal muy duro (borrasca)	Destrozos generalizados.	28.3 a 32.5
12	Huracán	Enormes danos.	Mas de 32.5

Nota. Tomado de (Herrero, 2016)

2.3 AEROGENERADORES

Los aerogeneradores son los equipos encargados de transformar la energía cinética del viento a energía mecánica. Esto ocurre debido a la interacción entre el viento y las palas. Los alabes se unen al eje constituyendo el rotor. La diferencia de presiones que existe entre las superficies de las caras del perfil da como resultado una fuerza constituida por una constituida por un componente de sustentación y otro de arrastre. Los aerogeneradores están caracterizados con su curva característica de velocidad y potencia, donde se identifica la velocidad de arranque “Cut-In Speed”, velocidad nominal y velocidad de supervivencia “Cut-Off Speed”(Torres, Nieto, et al., 2020).

2.3.1 TIPOS DE AEROGENERADORES

Los aerogeneradores o turbinas de viento pueden ser clasificadas según la orientación de su eje de rotación, fuerzas aerodinámicas y diámetro de rotor con potencia nominal.

Según la orientación del eje de rotación se encuentran los aerogeneradores horizontales (HAWT's) y verticales (VAWT's). En los aerogeneradores HAWT's, el eje es paralelo al suelo y a la dirección de viento. La energía entregada depende de la velocidad promedio y la turbulencia del viento, donde en condiciones ideales de viento estable, su eficiencia aerodinámica oscila entre 40 – 55%. HAWT's se instalan en parques eólicos y sitios donde exista una cantidad de recurso eólico considerable y sin disturbios en los alrededores, debido a la alta velocidad de arranque y mínima intensidad de turbulencia para su funcionamiento. En los aerogeneradores VAWT's, el eje es perpendicular a la dirección del viento y del suelo. Requieren una baja velocidad de arranque, y debido a su bajo ruido pueden ser instalados en zonas urbanas (Kumar et al., 2018).

Las fuerzas aerodinámicas que interactúan sobre la superficie del aspa corresponden a otra clasificación para los aerogeneradores. Existen de dos tipos: las fuerzas de arrastre y elevación. En los aerogeneradores diseñados para arrastre, la fuerza aerodinámica se aplica en la dirección del flujo del viento, mientras que, en el caso de elevación, actúa perpendicular a la dirección del flujo del viento (Kumar et al., 2018).

Según el diámetro de rotor y potencia nominal, también existen segmentaciones de turbinas de viento. Las microturbinas varían desde (0.004 a 0.25) kW con un diámetro de rotor que oscila entre (0.5 a 1.25) m . Las mini turbinas varían desde (0.25 a 1.4) kW con un diámetro de rotor que oscila entre (1.25 a 3.0) m . Las turbinas domésticas varían desde (1.4 a 16.0) kW con un diámetro de rotor que oscila entre (3.0 a 10.0) m . Los grupos mencionados anteriormente ingresan en la categoría de aerogeneradores de escala pequeña conocidos también como SWT's. Las turbinas comerciales varían desde (16.0 a 100.0) kW con un diámetro de rotor que oscila entre (10.0 a 20.0). Las turbinas de escala media varían desde (100.0 a 1000.0) kW con un diámetro de rotor que oscila entre (20.0 a 50.0) m . Las turbinas de escala grande varían desde (1000.0 a 3000.0) kW con un diámetro de rotor que oscila entre (50.0 a 100.0) m (Pérez, 2018).

2.3.2 ESTÁNDAR IEC 61400-2

Los aerogeneradores SWT's son diseñados bajo estándares de seguridad, desempeño y durabilidad acorde por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) 61400-2. En la regulación, se definen cuatro clases de sitio en función de la velocidad del viento y efectos de turbulencia (Kc et al., 2019).

El comportamiento del recurso de viento en zonas urbanas y suburbanas representa un factor de riesgo hacia el diseño estructural del aerogenerador, debido a las bajas velocidades por la rugosidad superficial, inestabilidad atmosférica, múltiples direcciones de entrada de viento y fluctuaciones en el nivel de turbulencia que provocan las edificaciones. La omisión de las recomendaciones de la normativa, pueden desencadenar resultados no deseados como el sobredimensionamiento de

la potencia esperada, cargas de alta fatiga y fallo de componentes de la turbina. En el caso de los HAWT, la fluctuación de la carga dinámica causaría resonancia.

Este estándar usa un modelo de turbulencia normal de velocidad de viento para describir la turbulencia e intensidad de turbulencia. La intensidad de turbulencia longitudinal es expresada como el percentil 90 de la medición de la intensidad de turbulencia respecto a la velocidad del viento con una distribución Gaussiana. (Evans et al., 2017)

$$I_u = \frac{0.9}{\bar{u}} + 0.12 \quad (3)$$

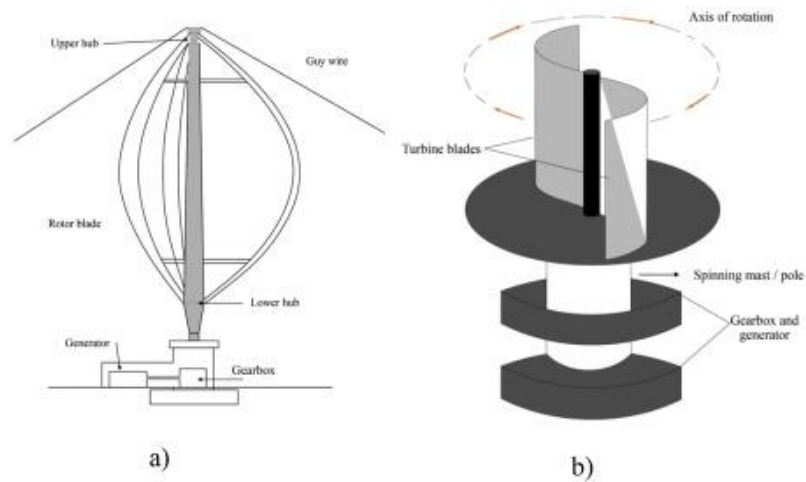
2.3.3 TURBINAS DE EJE VERTICAL VAWT

Las turbinas de eje de rotación vertical (VAWT's) son capaces de generar electricidad con bajas velocidades de arranque, debido que la mayoría de sus diseños están basados en fuerzas de arrastre, excepto las de tipo Darrius. Estas turbinas son más silenciosas y ligeras que las de eje horizontal (HAWT's). por lo que pueden instalarse en las edificaciones (Kumar et al., 2018).

Los aerogeneradores de eje vertical pueden clasificarse en dos grupos: Savonius y Darrius, mostrados en la figura 2. Las turbinas Savonius están basadas el trabajo del rotor por arrastre, lo que conlleva un alto par de arranque y baja eficiencia. Por otra parte, en las turbinas Darrius, el trabajo del rotor es por sustentación, no requieren un par de arranque elevado y entregan potencias altas.

Figura 2

Imagen referencial aerogeneradores verticales a) Darrius b) Savonius.

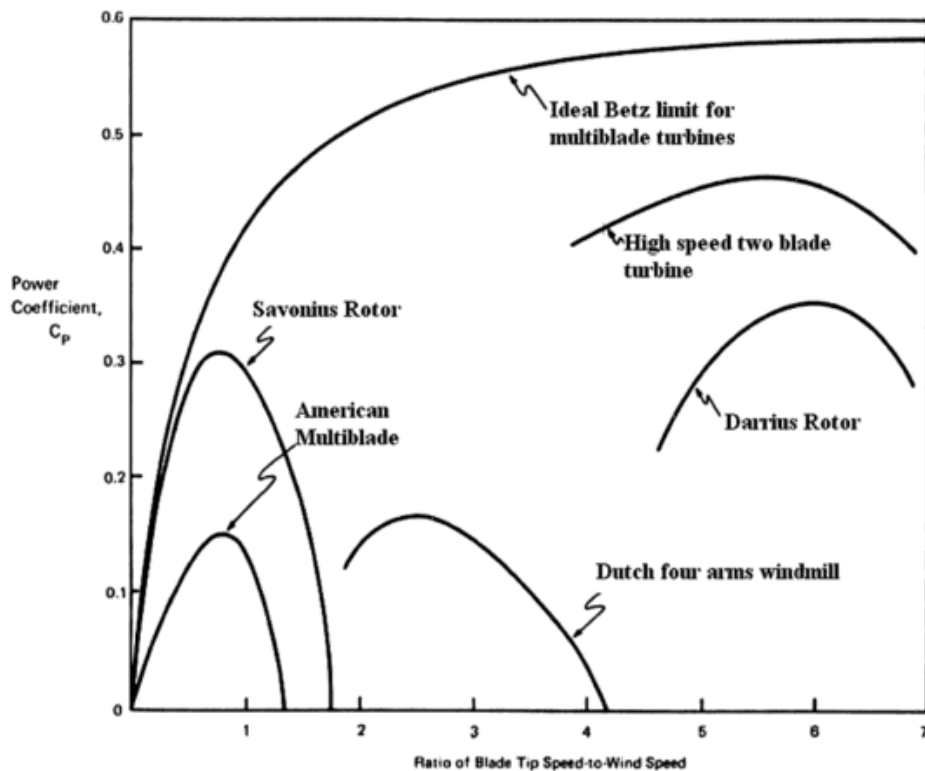


Nota. Imagen que hace referencia al modelo base de aerogeneradores verticales Darrius y Savonius. Tomado de (Tasneem et al., 2020)

En la figura 3, se puede observar los coeficientes de potencia para algunos tipos de aerogeneradores. El aerogenerador tipo Savonius alcanza un valor máximo de 0.3 y el tipo Darrius un máximo de 0.35. Además, la ratio de velocidad de punta es mayor para los aerogeneradores tipo Darrius, y en comparación con el tipo Savonius a una misma velocidad de viento, este rotor tiene mayor velocidad.

Figura 3

Imagen referencial de coeficiente de potencia de aerogeneradores.



Nota. Imagen referencial de los coeficientes potencia de aerogeneradores entre HAWT y VAWT. Tomado de (Carriveau, 2011)

2.4 LA GENERACIÓN EÓLICA

La energía eléctrica se obtiene a partir del accionamiento de máquinas y mecanismos que no exijan al rotor del aerogenerador un alto par de arranque. Para ello, en el diseño debe evaluarse la disponibilidad del recurso eólico, velocidad, dirección y sitio de instalación.

2.4.1 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD DE VIENTO

Las funciones de densidad de probabilidad (PDFs) son ecuaciones que describen el comportamiento de probabilidad para los valores de una variable aleatoria. Para el modelamiento estadístico de la distribución de velocidad de viento existen las funciones Rayleigh y Weibull (Martin et al., 2020).

La distribución Rayleigh depende de un parámetro, el cuál es la velocidad promedio \bar{u} . La función Rayleigh, está dada por (Martin et al., 2020):

$$P^R(u) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{u}{\bar{u}^2} \right) \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{u}{\bar{u}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

La distribución Weibull depende de los factores c y k , los cuales son parámetros de escala y forma. Estos se determinan a partir de métodos de regresión cuadrática, empíricos, gráficos, otros. La función Weibull, está dada por (Martin et al., 2020):

$$P^W(u) = \left(\frac{k}{c} \right) \left(\frac{u}{c} \right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{u}{c} \right)^k \right] \cdot u \geq 0 \quad (5)$$

Mientras, la función de distribución acumulada está representada por:

$$F^W(u) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{u}{c} \right)^k \right] \cdot u \geq 0 \quad (6)$$

2.4.2 DIRECCIÓN DEL VIENTO

La estimación de la dirección del viento es un factor que incide en la selección del tipo de aerogenerador. La medición se determina utilizando un anemómetro, y con los datos recolectados se construye una gráfica polar conocida como la rosa de los vientos. Esta rosa representa la distribución frecuencia de la dirección del viento (Pishgar et al., 2015).

2.4.3 POTENCIA EÓLICA DE UN AEROGENERADOR

La potencia eólica generada está asociado al cubo de la velocidad de viento que pasa a través del rotor (Torres, Nieto, et al., 2020).

$$P^{swt}(u) = \frac{1}{2} C_p \rho A u^3 \quad (7)$$

donde:

ρ densidad del aire. [Kg/m^3]

A área de barrido de los alabes. [m^2]

C_p coeficiente de potencia característico del aerogenerador.

u velocidad del viento. [m]

La relación de potencia eólica generada y la que se puede captar a través del recurso eólico es del 59.25% establecido en la ley de Betz, la cual se determina considerando que el aire al ingresar al aerogenerador reduce la velocidad para iniciar el movimiento de las aspas y mantener el movimiento del rotor (Puerta León, 2018)

2.4.4 ANÁLISIS COMPUTACIONAL

En la implantación de aerogeneradores SWT's, el recurso eólico identificado en una zona urbana es ingresado a simulación mediante ANSYS Fluent® con modelos sólidos de detalles de forma y geometría de las edificaciones y terreno para validar el sitio de instalación y comportamiento del viento. Esta arquitectura es importada en la etapa de preprocesamiento, y luego, se define el modelo matemático a partir de la generación de malla en ANSYS Meshing® y condiciones de fronteras. Después del procesamiento de los cálculos, los resultados como el campo de velocidades ejemplifican la interacción del viento con las edificaciones. Los análisis computacionales están basados en las ecuaciones tridimensionales de conservación de masa y momento en estado estable para un flujo incompresible turbulento (Yang et al., 2016).

La ecuación de continuidad está dada por:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

Y la conservación de momento:

$$\frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p_i}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (9)$$

donde:

u_i componente de la velocidad en la dirección i . [m/s]

p presión. [Pa]

μ viscosidad laminar. [$Pa s$]

μ_t viscosidad turbulenta. [$Pa s$]

ρg_i fuerza gravitacional. [N]

Estas ecuaciones en CFD son discretizadas con el uso de una aproximación de volumen de control finito.

Existen dos enfoques numéricos usados para la simulación de flujos: La simulación de grandes turbulencias (LES) y la Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS). La primera consiste en una simulación donde el flujo próximo a la pared es resuelto por ecuaciones filtradas de espacios; y la segunda en la descomposición de Reynolds en magnitudes fluctuantes y promediadas en el tiempo. Comparando entre ambos modelos, el LES presenta una mayor concordancia con los datos experimentales, pero su coste computacional es elevado para las geometrías en escala real, especialmente para los casos de estudios de flujos de vientos en edificaciones. Por tal motivo, se han realizado estudios comparando los modelos de turbulencia RANS que brinda la licencia estudiantil ANSYS FLUENT®, $k - \varepsilon$ y $k - w$. Se obtuvo que las predicciones del modelo $k - \varepsilon$ tuvieron mayor concordancia con los datos experimentales, a

diferencia del modelo $k - w$, el cual sobredimensiona los valores de recirculación del viento cercano a las paredes de la edificación (Toja et al., 2015).

Entre las variaciones de modelos turbulencia $k - \varepsilon$, estándar y realizable, el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ realizable ofrece mejor desempeño en las simulaciones de flujo que involucran parámetros de capa límite bajo gradientes de presión adversa, separación, vórtices y recirculación (Vera et al., 2015).

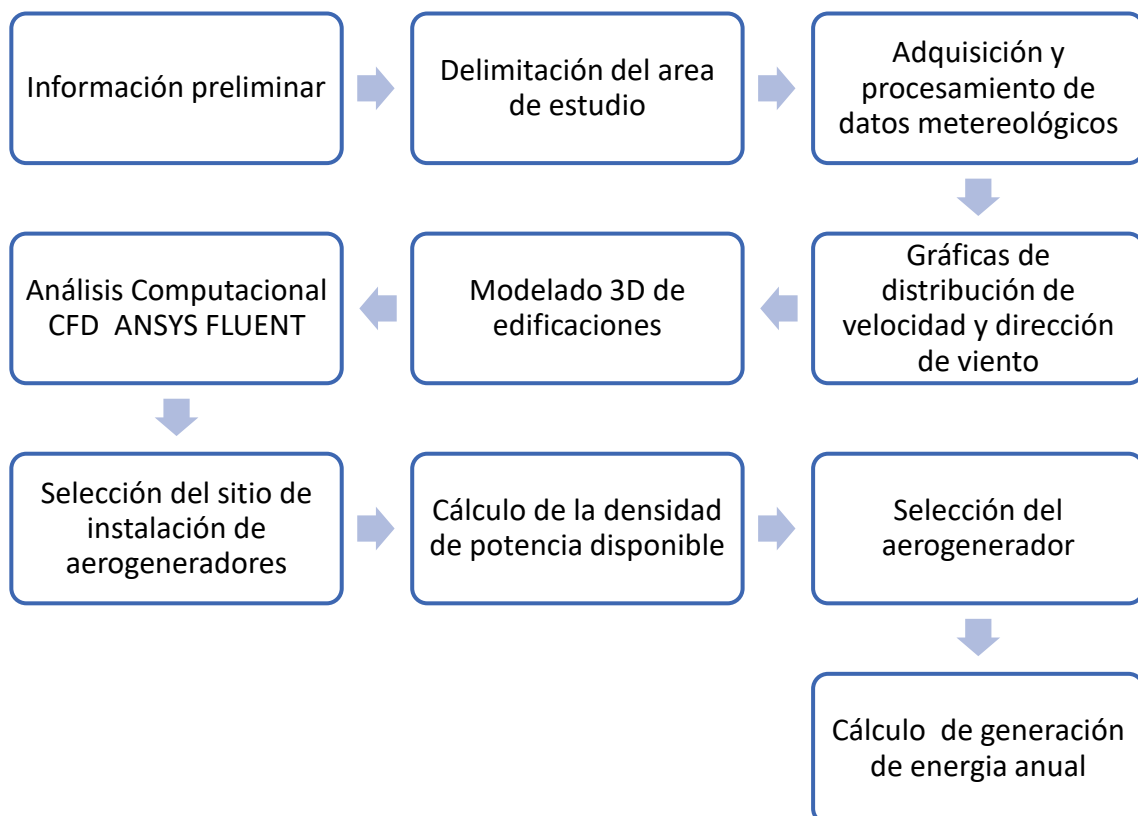
Para la validación de los modelos $k - \varepsilon$ se realizaron mediciones en campo durante 2 meses, en 10 sitios diferentes del edificio objetivo y se comparó con los resultados obtenidos. En donde las pruebas de independencia de malla, el $k - \varepsilon$ estándar, muestra un déficit al momento de separar los flujos inversos originados en la parte superior de las edificaciones. Con lo que respecta a magnitud de la velocidad y dirección del viento, el modelo $k - \varepsilon$ realizable en las regiones de barlovento mostraron discrepancias no mayores al 10 %, y para regiones donde el viento es bloqueado por edificaciones, mostraron discrepancias no mayores del 20%, mientras que para el $k - \varepsilon$ estándar mostraron discrepancias relativamente mayores. (Yang et al., 2016).

3 MATERIALES Y METODOLOGÍA

En este capítulo se establecen los procedimientos de procesamiento de datos y análisis de la información del recurso eólico disponible. Posterior a ello, se definen las condiciones y parámetros a utilizadas en la simulación en ANSYS FLUENT[®] para identificar el comportamiento del flujo del viento al interactuar con edificaciones representativas de la zona urbana. Finalmente, se indican los criterios para definir el sitio de instalación, selección y estimación de la energía generada de los aerogeneradores. En la figura 4, se muestra la metodología que será aplicada en la zona urbana de la ciudad de Cuenca del Ecuador para establecer el proceso de evaluación de la viabilidad del uso de aerogeneradores en edificaciones.

Figura 4

Diagrama de flujo de la metodología aplicado en el caso de estudio.



La información presentada en este estudio otorga herramientas de cálculo, modelos y consideraciones, para la implementación y uso del recurso eólico en cualquier ciudad.

3.1 INFORMACIÓN PRELIMINAR

Esta investigación se realizó en la ciudad Cuenca, Azuay mostrada en la figura 5; la cual se encuentra ubicada en la zona sur de la República del Ecuador en las coordenadas $2^{\circ}54'08''$ S y $79^{\circ}00'19''$ O, a una altura de 2550 msnm, cuenta con 400.000 habitantes aproximadamente, y posee un área de construcción urbana de 84.6 Km^2 (Bustamante, 2017).

Figura 5
Vista superior ciudad Cuenca.



Nota. Tomado de (Google Earth)

Es una zona geográfica central estratégica con posibilidades de usar energías renovables autosustentable. En la última década se ha realizado estudios del potencial de radiación, eólica, solar, térmica e hidráulico y proyecciones del aprovechamiento de estos recursos hacia el 2050 (Icaza et al., 2021). Este estudio estará orientado a la generación de energía a partir del recurso eólico. La ciudad de Cuenca cuenta con 16 estaciones meteorológicas donde se recolectan datos correspondientes a presión atmosférica, precipitación, humedad relativa, radiación

solar difusa y global, temperatura ambiente, temperatura del suelo a nivel de la superficie y a 5 cm sobre la superficie, desde el año 2014, las cuales se muestran en la tabla 3.

Tabla 3

Listado de parroquias de la provincia del Azuay.

N°	Estación Meteorológicas	Altitud [m]	Zona
1	Chaucha	2050	Rural
2	Molleturo	3705	Rural
3	Baños	3076	Rural
4	CTS	2540	Urbano
5	Cumbe	3193	Rural
6	Irquis	2667	Rural
7	Llacao	2768	Rural
8	Quingeo	2890	Rural
9	Nulti	2631	Rural
10	San Joaquín	2774	Rural
11	Sayausí	2799	Rural
12	Sinincay	2722	Rural
13	Tixán	2717	Rural
14	Turi	2766	Rural
15	Santa Ana	2680	Rural
16	UPS	2530	Urbano

Nota. Datos medidos en estaciones meteorológicas. Tomado de (Bustamante, 2017)

3.2 DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Se estudió la zona urbana de la ciudad de Cuenca, específicamente en las parroquias de Yanuncay y El Vecino, en donde se cuenta con su estación meteorológica instalada en los predios de la Unidad Educativa Técnico Salesiano (UETS) y en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca (UPS), respectivamente. El motivo es por el objetivo del presente estudio, el cual es de realizar una metodología para la viabilidad del uso de aerogeneradores en la zona urbana; esto implica realizar levantamiento de información meteorológicas y selección de edificaciones dentro del cerco urbano.

Las consideraciones para seleccionar las edificaciones para el estudio fueron las siguientes:

- Edificio ubicado dentro del cerco urbano.
- Altura mayor a 6 m.
- No este cerca de alguna zona turística o de conservación.
- Que el terreno donde esté el edificio sea elevado.

En la zona de Yanuncay, las edificaciones seleccionadas corresponden en vista frontal a la UETS. Se encuentra ubicada en las coordenadas $2^{\circ} 55'0.16''$ S y $79^{\circ} 1'0.31''$ O. El conjunto de edificios cubre un perímetro de rectangular cuyas dimensiones en ancho es de 90 m, en largo es de 185 m, y la altura varía entre 6 m (dos plantas), 9 m (3 plantas) y 12 m (4 plantas), aproximadamente. En la figura 6 se muestra las instalaciones.

Figura 6

Fotografía aérea de la ubicación de la Unidad Educativo Técnico Salesiano (UETS).



Nota. Tomado de (Google Earth)

En la zona de El vecino, se escogió la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador, sede Cuenca. Se eligieron los edificios Cornelio Merchán (3 plantas), StartUPS Coworking (4 plantas) y Guillermo Mensi (4 plantas), ubicados en las coordenadas $2^{\circ}53'11.01''$ S y $78^{\circ}59'26.17''$ O. Cubren un espacio rectangular de 164 m de largo y 129 m ancho, aproximadamente. En la figura 7 se muestra las edificaciones anteriormente mencionadas.

Figura 7

Fotografía aérea de la ubicación de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.



Nota. Tomado de (Google Earth)

3.3 ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS METEOROLÓGICOS

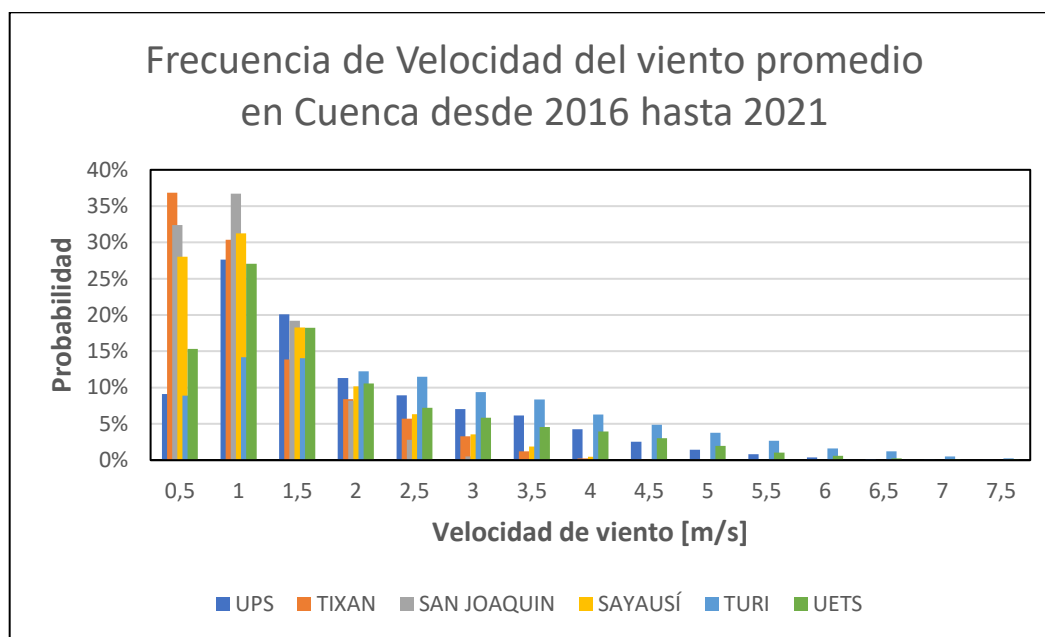
Los datos meteorológicos adquiridos corresponden a las estaciones UETS, Turi, UPS, San Joaquín, Sayausí y Tixán. Este histórico fue extraído desde el año 2014 hasta el 2020. Las estaciones registran datos de presión atmosférica, precipitación, humedad relativa, radiación solar difusa y global, temperatura ambiente, temperatura del suelo a nivel de la superficie y a 5 cm sobre la superficie, dirección del viento, ráfaga de viento y velocidad de viento. Para cada variable, se registra en cada hora un valor promedio, máximo y mínimo.

En el procesamiento de esta información meteorológica, se realizó un tratamiento de datos correspondientes a las variables de dirección y velocidad promedios del viento previo al uso de la herramienta de análisis de datos del software Microsoft Excel. Se aplicó la distribución de Weibull para determinar la distribución de frecuencia de las variables anteriormente seleccionadas, y de esta manera poder determinar la magnitud y dirección predominante. En la figura 8, se muestra la distribución de Weibull de la velocidad de viento, y se determinó que la velocidad de viento dentro de la ciudad de Cuenca predomina velocidades de baja magnitud, entre 0.5 m/s hasta 2.5 m/s ; donde la más frecuente son velocidades de 1 m/s en

zonas urbanas y rurales, con probabilidades de 35% y 27%. En la figura 9 se muestra la rosa de los vientos, donde se analizó que el comportamiento del viento para las estaciones de UPS y UETS es unidireccional con orientación norte-noreste y este-noreste, respectivamente.

Figura 8

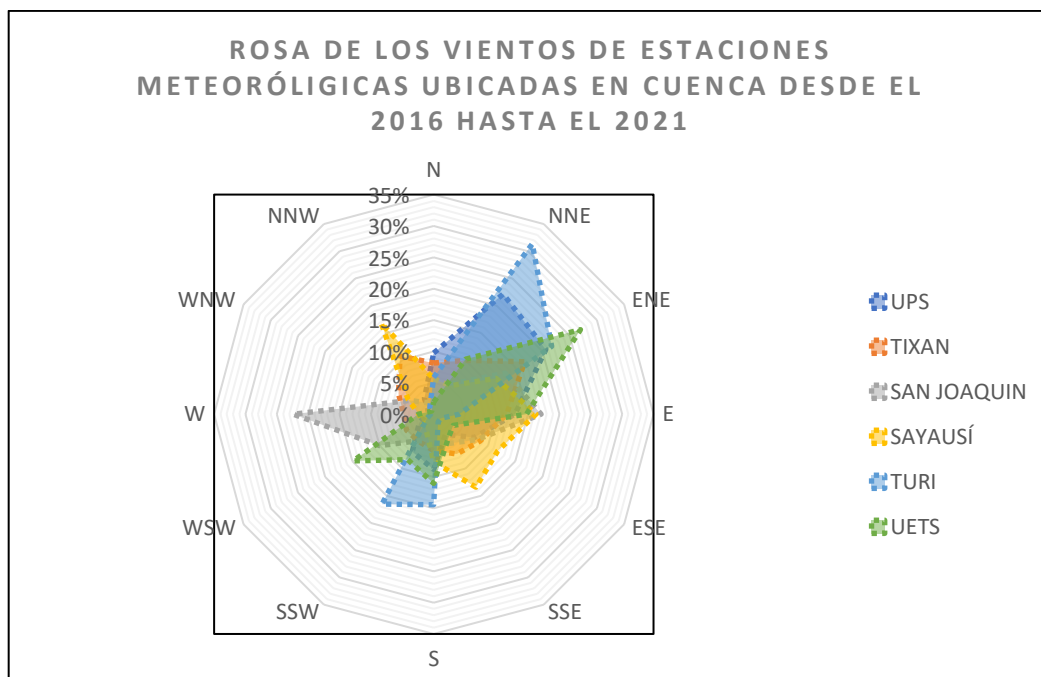
Distribución de Weibull de la variable de velocidad promedio en las estaciones meteorológicas de la ciudad de Cuenca.



Nota. Datos sobre frecuencias de velocidad promedio en cada estación meteorológica ubicadas en la ciudad de Cuenca desde el año 2016 hasta el año 2021.

Figura 9

Rosa de los vientos de la variable de dirección del viento en las estaciones meteorológicas de la ciudad de Cuenca.



Nota. Rosa de los vientos en cada estación meteorológica ubicadas en la ciudad de Cuenca desde el año 2016 hasta el año 2021.

Dado que el estudio se limitó a la zona urbana de la ciudad, se seleccionaron los datos de velocidad con mayor frecuencia de la estación de UPS y UETS. En la Tabla 4 y Tabla 5, se muestran los valores seleccionados para cada zona respectivamente. En la UPS se determinó que el viento es predominante norte-noreste con una probabilidad del 20%, y en UETS es predominante al este-noreste con 23%. Con estos resultados, un aerogenerador comercial VAWT se ajustaría a la baja magnitud de velocidad y a la variación de las direcciones del viento.

Tabla 4

Velocidades de viento con mayor frecuencia en la estación UPS.

Velocidad de ingreso	Probabilidad
[m/s]	[%]
1	27
1.5	20
2	11
2.5	9

Nota. Datos sobre las velocidades de viento promedio en la estación meteorológica UPS ubicada en la parroquia de El Vecino, en la ciudad de Cuenca desde el año 2016 hasta el año 2021.

Tabla 5

Velocidades de viento con mayor frecuencia en la estación UETS.

Velocidad de ingreso	Probabilidad
[m/s]	[%]
0.5	15
1	26
1.5	18
2	10
2.5	7

Nota. Datos sobre las velocidades de viento promedio en la estación meteorológica UETS ubicada en la parroquia de Yanuncay, en la ciudad de Cuenca desde el año 2016 hasta el año 2021.

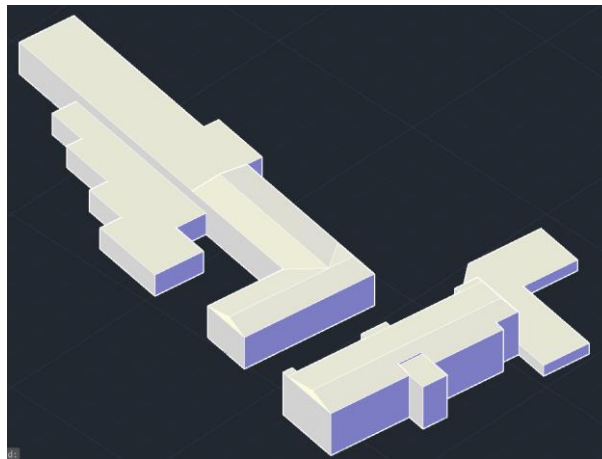
3.4 MODELO FÍSICO DE SITIO DE INTERÉS

Las dimensiones referenciales de las edificaciones seleccionadas fueron obtenidas con el uso de la herramienta Google Earth y mediciones en campo. A partir de esta información, el modelo 3D se lo dibujo en Autodesk AutoCAD[®]. Se consideró una escala 1:1 en el dibujo. En la figura 10 se muestran los modelos 3D y sus ubicaciones.

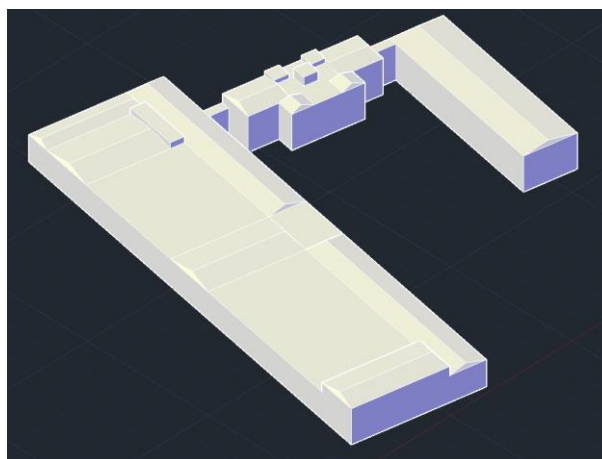
El ángulo de incidencia con respecto al eje de referencia para los edificios de UETS y UPS, fueron de 40° y 150°, con el fin de que la velocidad sea normal a la frontera del dominio en la etapa de preprocesamiento en ANSYS FLUENT[®].

Figura 10

Modelo físico tridimensional de sitio de interés: a) Edificaciones de la Unidad Educativa Tecnológico Salesiano y b) Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, Ecuador.



a)



b)

Nota. Modelos físicos tridimensional de sitio de interés con vista isométrica a) Edificaciones de la Unidad Educativa Tecnológico Salesiano (UETS) y b) Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, Ecuador (UPS).

3.5 ANÁLISIS COMPUTACIONAL CFD

En el software ANSYS FLUENT®. se importó el modelado 3D de las edificaciones en la zona El Vecino y Yanuncay para iniciar con el preprocesamiento.

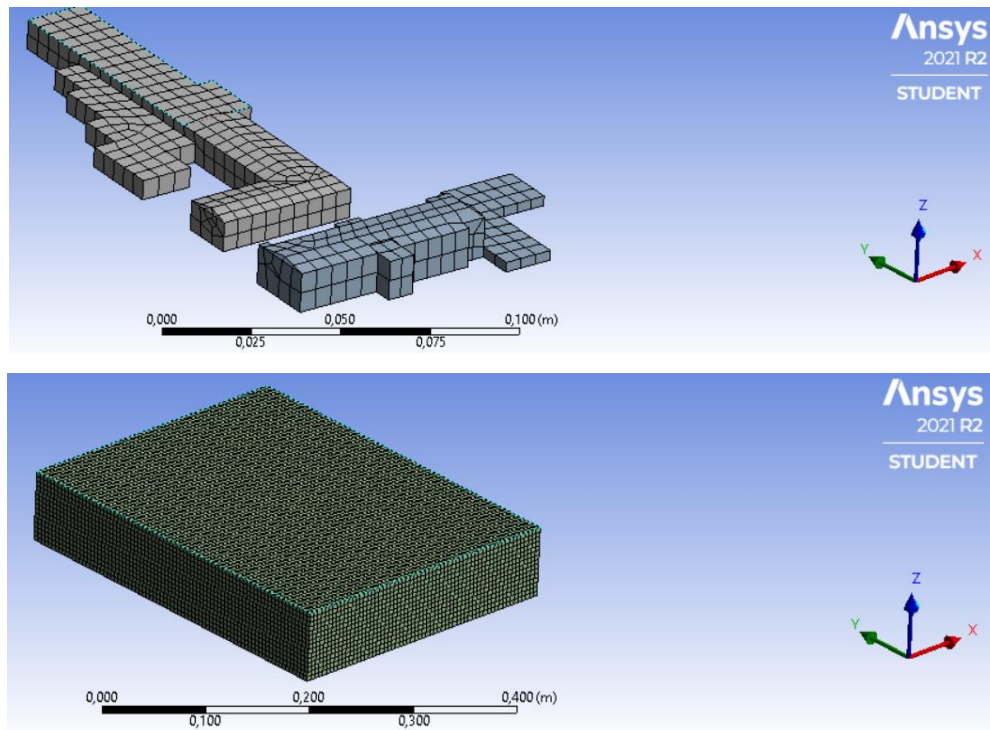
3.5.1 CONFIGURACIÓN DE LA MALLA

El mallado se aplicó a las edificaciones y al área circundante del dominio de análisis. En ambas partes se seleccionó el método de mallado automático con celdas hexagonales dominantes. Para zona del edificio y del dominio, se empezó con la evaluación de un tamaño de celda de 3 mm, no obstante, el número de elementos generados excedían el número permitido por la licencia estudiantil. Después se analizó un tamaño de celda de 4 mm, donde la cantidad de nodos era de 368351 y de elementos 359586. Por velocidad de procesamiento, se determinó que el tamaño promedio de la celda fuera de 5 mm y sea orden lineal. La evaluación de la calidad de malla estuvo basada en las métricas de calidad: *Skewness*, donde el valor promedio de calidad no debe exceder un valor de 0.25; y *Orthogonal Quality*, donde el valor promedio de calidad debe acercarse a un valor de 1, además la diferencia entre los resultados para estas dos últimas configuraciones de tamaño de 4 mm y 5mm es para del 2% la velocidad y en la intensidad de turbulencia un 4%.

En el UETS, acorde a las figuras 11 y 12 se muestran el mallado y la distribución de formas de celdas del edificio objetivo y su respectivo dominio. La malla final se compuso con 79221 nodos y 77234 elementos. Las métricas de malla de *Skewness* y *Orthogonal Quality* promedio quedaron con valores de 0.09 y 0.93, respectivamente. Estos dos parámetros cumplen con los requerimientos de calidad de la malla y nos aseguran una convergencia de los resultados en el módulo de procesamiento.

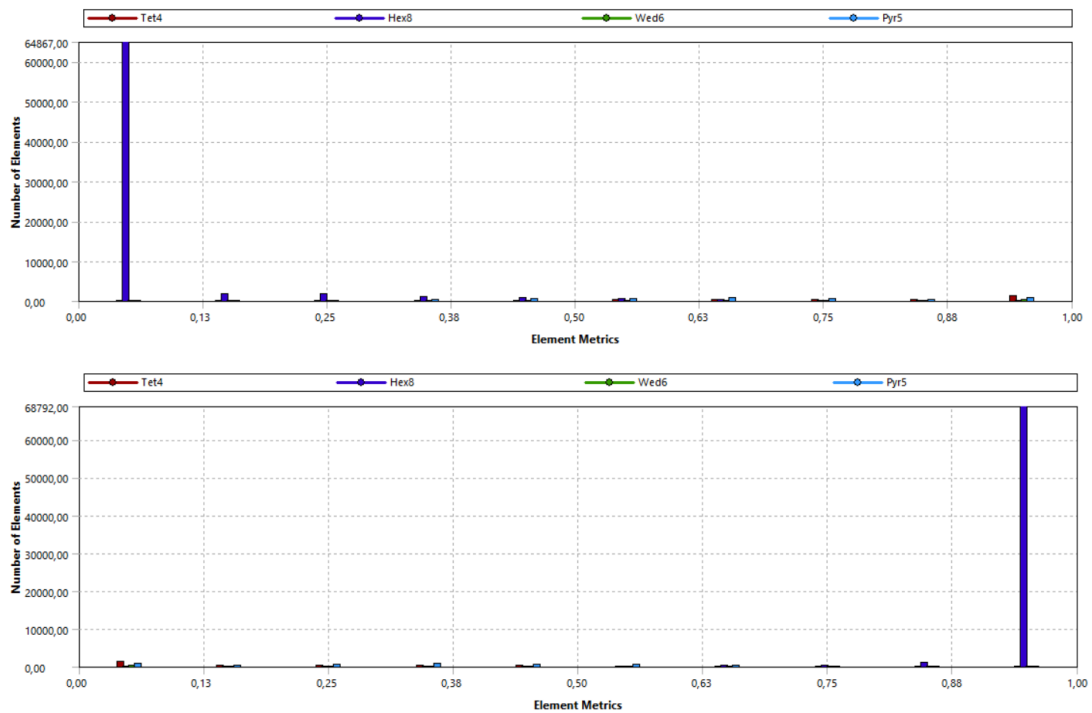
Figura 11

Modelo computacional del edificio de la UETS a) Mallado del dominio computacional del sitio de interés (parte inferior) y del edificio UETS (parte superior).



Nota. Modelo computacional del edificio UETS. Mallado del edificio y del dominio computacional aplicando el método de mallado automática con un tamaño de celda promedio de 5 mm.

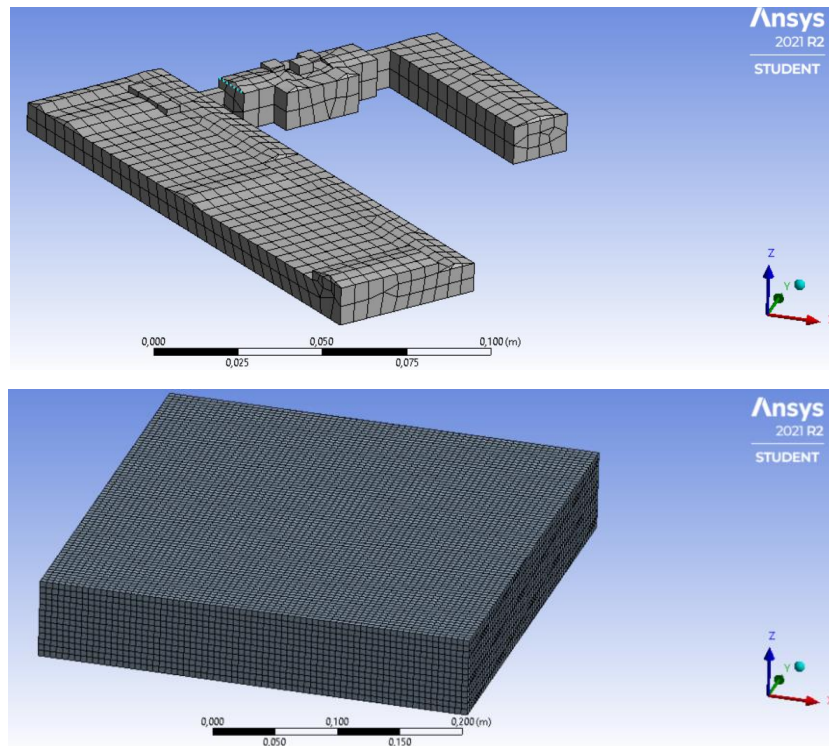
Figura 12
Distribución de las formas de elementos de malla usando las métricas Skewness y Orthogonal Quality.



En la UPS, en las figuras 13 y 14 se muestran el mallado final y la distribución de formas de celdas del edificio objetivo y su respectivo dominio. La malla final se compuso con 82068 nodos y 84841 elementos; y las métricas de malla de *Skewness* y *Orthogonal Quality* promedio quedaron con valores de 0.16 y 0.87, respectivamente. Estos dos parámetros cumplen con los requerimientos de calidad de la malla y nos aseguran una convergencia de los resultados en el módulo de procesamiento.

Figura 13

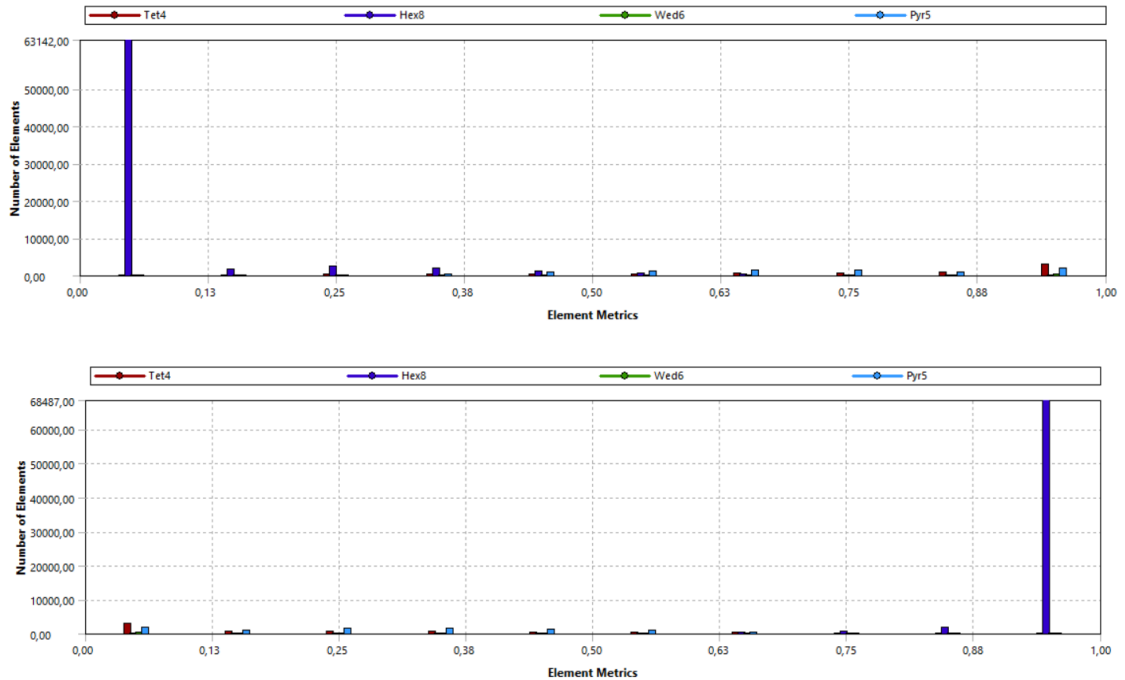
Modelo computacional del edificio de la UPS a) Mallado del dominio computacional del sitio de interés (parte inferior) y del edificio UPS (parte superior)



Nota. Modelo computacional del edificio UPS. Mallado del edificio y del dominio computacional aplicando el método de mallado automática con un tamaño de celda promedio de 5 mm.

Figura 14

Distribución de las formas de elementos de malla usando las métricas Skewness y Orthogonal Quality.



3.5.2 CONSIDERACIONES EN LA DISCRETIZACIÓN

Para los cálculos discretizados en CFD, se usó el método de mínimos cuadrados para el gradiente; la presión fue evaluada con una configuración de segundo orden; el esquema contraviento de segundo orden se aplicó al momento; y para la energía cinética y tasa de disipación turbulenta un esquema contra viento de primer orden (Yang et al., 2016). Los errores residuales considerados para las variables de flujo se limitaron hasta 10^{-5} y continuidad menor al 0.1%,

3.5.3 MODELO DE TURBULENCIA

El modelo realizable $k - \varepsilon$ (SKE), presenta un mejor desempeño respecto a otros modelos $k - \varepsilon$, que involucran capa límites con gradientes de presión adversos, separación, recirculación y vórtices, y valores de discrepancias que no superan el 10%. Se tomó como referencia los valores de las constantes $C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ de 1.9, 1.0 y 1.2 los cuales están involucrados en el modelo de turbulencia seleccionado (Yang et al., 2016).

3.5.4 CONDICIONES DE FRONTERA

Las condiciones de frontera en ambos casos de estudios se muestran en la figura 15 y tabla 6. En la entrada del dominio se asigna una de velocidades promedio determinadas en la distribución de Weibull. Se asignó la presión ambiental de Cuenca, aproximadamente de 0.74 atm en la salida del dominio. Además, los gradientes normales cero de p, k y ε fueron colocados sobre las superficies sólidas con funciones de pared de ley logarítmica dada por el módulo de mallado de ANSYS. Por último, en las dimensiones de los dominios se consideraron tres veces la longitud característica de los perímetros para cada edificación. Esto permite el desarrollo de la turbulencia ocasionada en la parte posterior de las edificaciones. También, las paredes superior y laterales del dominio, fueron considerados como paredes sólidas con esfuerzo cortante igual a cero.

Tabla 6

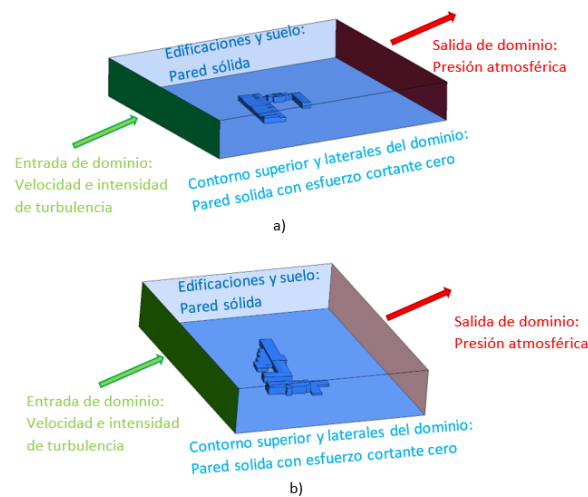
Datos de condiciones de fronteras ingresados al dominio computacional.

Velocidad de entrada de dominio [m/s]	Intensidad de turbulencia en la entrada de dominio [%]	Presión atmosférica en la salida de dominio [atm]
1	15	0.74
1.5	15	0.74
2	15	0.74

Nota. Datos de condiciones de fronteras ingresados en el dominio computacional para UPS y UETS, variando la velocidad de ingreso de acuerdo con el rango de histograma anteriormente mencionado.

Figura 15

Configuración general de las condiciones de frontera del dominio computacional a) UPS, b) UETS



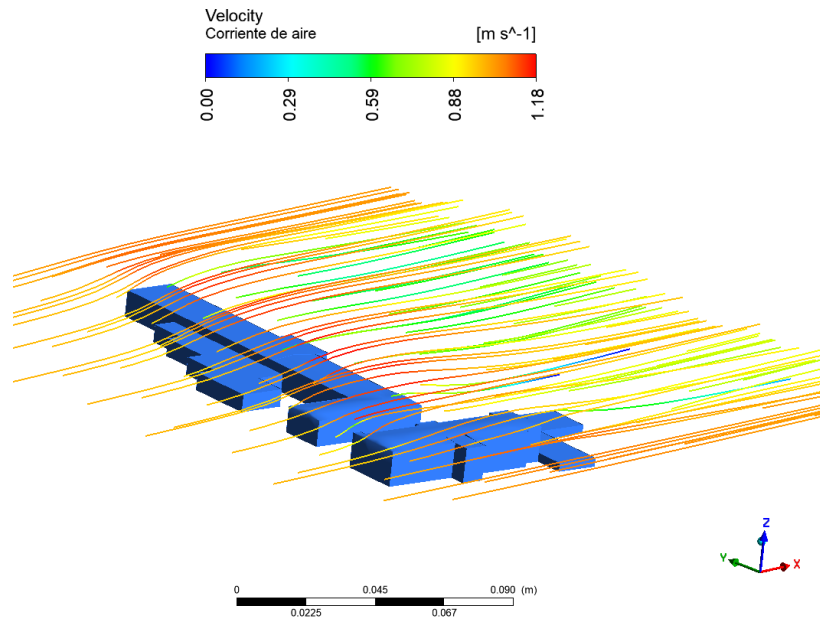
3.6 SELECCIÓN DEL SITIO DE INSTALACIÓN DE AEROGENERADORES

El procedimiento para seleccionar el sitio de instalación de los aerogeneradores en las edificaciones simuladas fueron las siguientes:

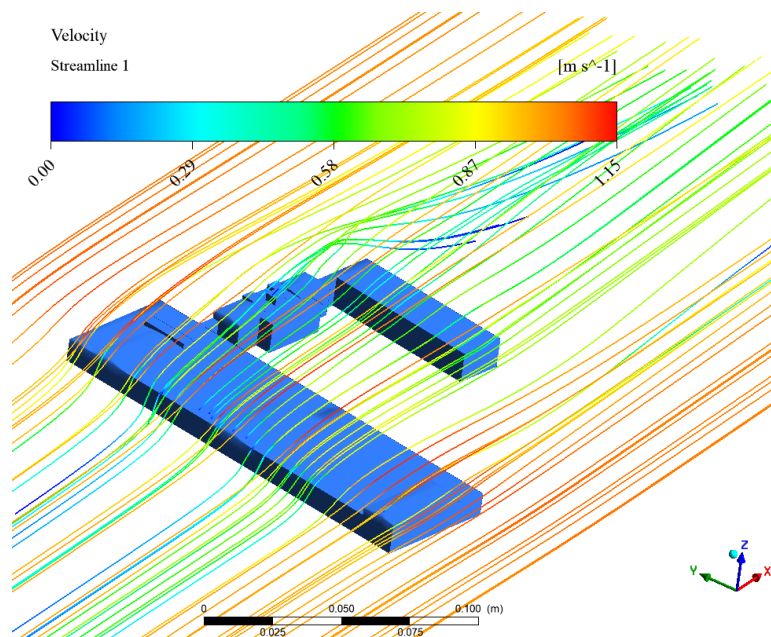
A partir de cada velocidad predominante de viento obtenida con la distribución Weibull, se realizó la simulación en CFD de su comportamiento frente a las edificaciones. Con las líneas de corriente (*streamline*), se visualiza el comportamiento del viento al entrar en contacto con las edificaciones objetivos, y con esto se puede aproximar la ubicación de los planos verticales. En la figura 16 se muestran las líneas de corriente:

Figura 16

Líneas de corriente del viento al entrar en contacto con los edificios objetivos de las zonas a) UETS b) UPS.



a)



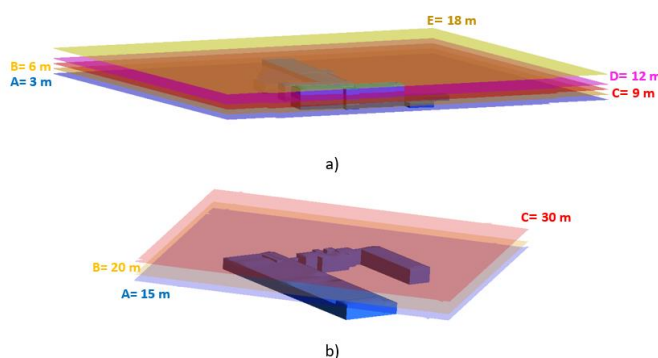
b)

Nota. Líneas de corriente del viento al entrar en contacto con los edificios objetivos de las zonas a) UETS y b) UPS.

Con el propósito de observar las características locales del viento, magnitud de velocidad, e intensidad de turbulencia en todo el dominio, se generaron planos horizontales o plantas a distintas alturas de las edificaciones en UETS y UPS, con referencia al nivel del suelo. En el UETS se seleccionaron cinco plantas, A a 3 m, B a 6 m, C a 9 m, D a 12 m y E a 18 m. En la UPS, debido a que no existe una variación entre las alturas de los edificios, se decidió tres plantas, A a 15 m, B a 20 m y C a 30 m. En la figura 17 se muestra las ubicaciones de los planos.

Figura 17

Ubicación de planos horizontales de la intensidad de turbulencia tomando como referencia el nivel del suelo en las edificaciones objetivos a) UETS y b) UPS.

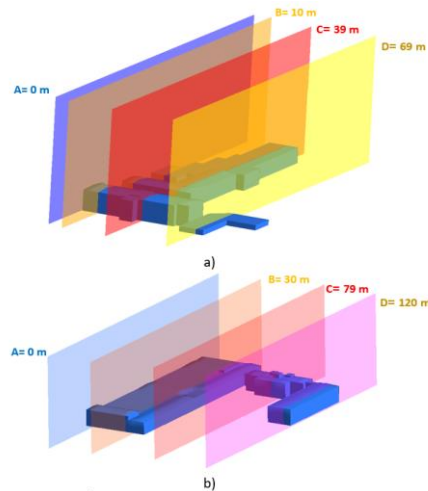


Nota. Planos horizontales de la intensidad de turbulencia tomando como referencia el nivel del suelo en las edificaciones objetivos a) UETS y b) UPS en los modelos tridimensionales.

Se generaron planos verticales o cortes transversales en las zonas con alta velocidad y baja intensidad de turbulencia, para observar el perfil de velocidad de la edificación y establecer los sitios de montaje potenciales. En UETS se ubicaron los planos verticales A igual 0 m, B a 10 m, C a 39 m y D a 69 m. En la UPS, se ubicaron los planos verticales A como nivel de referencia, B a 30 m, C a 79 m (ubicación del anemómetro de la estación UPS), y D a 120 m. En la figura 18 se muestran las ubicaciones de los planos.

Figura 18

Ubicación de planos verticales o cortes transversales de contornos de velocidades en las edificaciones objetivo a) UETS y b) UPS.

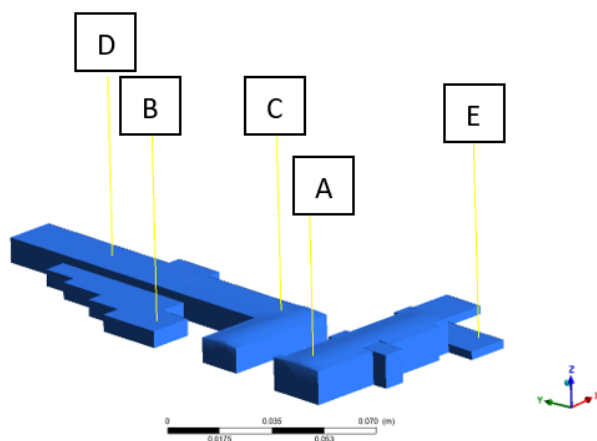


Nota. Planos verticales o cortes transversales de contornos de velocidades en las edificaciones objetivo a) UETS y b) UPS en los modelos tridimensionales.

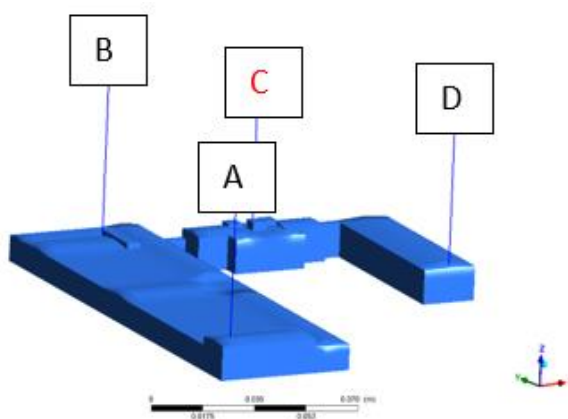
Se graficó el perfil de velocidad y de densidad de potencia; y también el perfil de intensidad de turbulencia. Esto con la finalidad de seleccionar el mejor sitio de montaje de la microturbina, cuyo criterio de selección fue de aquel sitio donde exista la altura de montaje más baja y densidad de potencia más alta. Para ello, se trazaron líneas verticales en las edificaciones de UETS y UPS, los cuales son los posibles sitios de montaje del aerogenerador, tal como se muestra en la figura 19.

Figura 19

Ubicaciones de sitios reales para el montaje de aerogeneradores en los edificios objetivos a) UETS y b) UPS.



a)



b)

Nota. Ubicaciones de sitios reales para el montaje de aerogeneradores en los edificios objetivos a) Para el caso de UETS existen cinco sitios reales y b) Para el caso de UPS existen cuatro sitios reales.

3.7 CÁLCULO DE LA DENSIDAD DE POTENCIA DISPONIBLE

La densidad de potencia en las zonas Yanuncay y El Vecino, fue obtenida a partir de la distribución de frecuencia de velocidades de Weibull. Esta información, permite evaluar la disponibilidad del recurso eólico y estimar la densidad de energía que se puede extraerse. Los resultados mostrados en la siguiente sección se calcularon con la siguiente ecuación:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho_{\text{aire}} v^3 \quad (10)$$

donde:

ρ densidad del aire. [Kg/m^3]

A área de barrido de los alabes. [m^2]

C_p coeficiente de potencia característico del aerogenerador.

3.8 SELECCIÓN DEL VAWT

El aerogenerador vertical VAWT, fue seleccionado en base a la disponibilidad de velocidad y la dirección de viento. En zonas urbanas, se consideró un aerogenerador que opere a una velocidad de arranque baja y por la frecuencia de cambio de orientación entre norte-noreste y este-noreste, el modelo VAWT puede aprovechar esta fluctuación comparado con los modelos HAWT.

3.9 CÁLCULO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ANUAL

La generación de energía anual en cada una de las localidades CTS y UPS, fue obtenida a partir de la densidad de potencia disponible, el aprovechamiento de energía del aerogenerador, y número de horas de funcionamiento (Martin et al., 2020).

$$E^{swt}(u) = T \int_0^{\infty} P^{swt}(u) P^H(u) du \quad (11)$$

donde:

T número anual de horas en operación. [$h/año$]

$P^{swt}(u)$ curva de desempeño de la turbina. [kW]

$P^H(u)$ distribución probabilidades de la velocidad del viento. [%]

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos de la simulación en ANSYS FLUENT[®] para determinar el comportamiento de las velocidades del viento e intensidad de turbulencia edificaciones en la zona de Yanuncay y de El Vecino en Cuenca. Después, se identifica el sitio donde existe alta velocidad con baja turbulencia para la instalación de los aerogeneradores Finalmente se selecciona el equipo y se calcula la generación de energía.

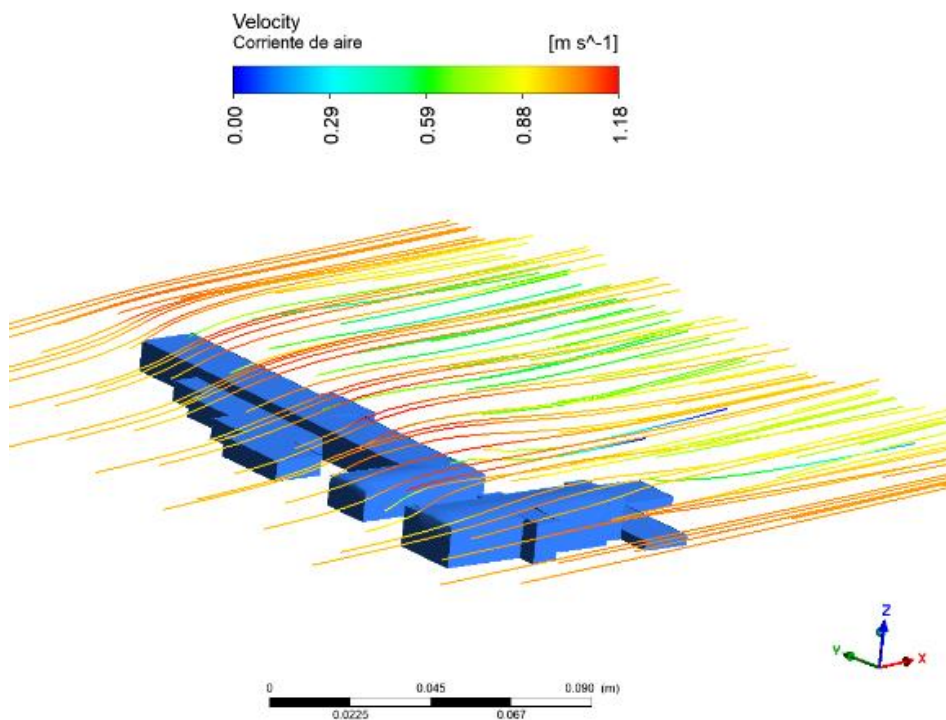
4.1 COMPORTAMIENTO DEL VIENTO

En UETS, según lo observado en la figura 20, el flujo de aire cuando entró en contacto con la parte posterior del edificio de 9 m de altura la velocidad aumentó de 1.0 m/s a 1.18 m/s, y disminuye poco a la salida. En la entrada del edificio frontal de 12 m de altura la velocidad incrementó de 1 m/s a 1.10 m/s. Debido a la diferencia de alturas, entre el edificio frontal de cuatro plantas con el edificio que se encuentra detrás de este de una planta, existe un flujo turbulento en la zona de transición de un edificio al otro, lo que ocasiona una reducción considerable de la velocidad de viento a 0.29 m/s.

Se determinó que el edificio posterior tiene mejores posibilidades de aumento de velocidad de viento, debido a la orientación que no produjo un cambio brusco en la dirección del viento, por consiguiente, la velocidad no disminuyó en su ingreso.

Figura 20

Líneas de corriente del campo de viento a 1 m/s en el edificio objetivo de UETS.

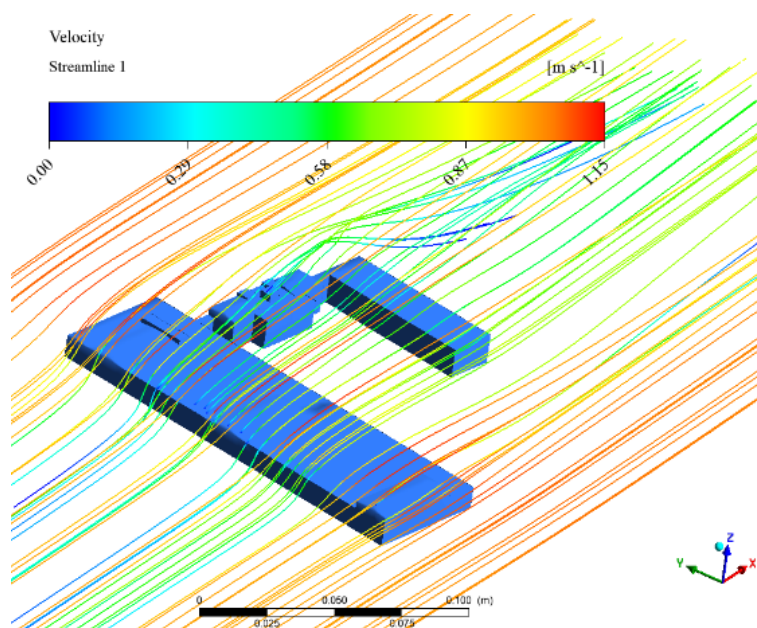


Nota. Líneas de corriente del campo de viento a 1 m/s al entrar en contacto con los edificios objetivos de UETS.

En la UPS campus el Vecino, según lo mostrado en la figura 21 el flujo de aire a 1 m/s el ingreso hacia las edificaciones. En cada simulación realizada para cada velocidad, el flujo tuvo el mismo comportamiento, y la velocidad se redujo en el sector central del lado izquierdo del edificio. La orientación del edificio con respecto a la dirección del viento ocasionó que el viento se desvíe hacia los extremos. El rango de velocidad va desde 0.5 m/s a 0.87 m/s aproximadamente. En las esquinas superior derecha e izquierda de la primera edificación existe una velocidad de viento constante de 1.15 m/s todo el recorrido encima del techo. La zona central, por el efecto anteriormente mencionado tiene una velocidad de menor magnitud y un flujo poco separado. A la salida del primer edificio debido a la diferencia de velocidades, aumentó la turbulencia y se desvió el flujo hacia la edificación en medio. En el último edificio, el desorden en el flujo de viento se reduce.

Figura 21

Líneas de corriente del campo de viento a 1m/s en el edificio objetivo de UPS.



Nota. Líneas de corriente del campo de viento a 1 m/s al entrar en contacto con los edificios objetivos de UPS.

Los resultados numéricos de esta sección para las velocidades restantes se encuentran en el ANEXO I.

4.2 INTENSIDAD DE TURBULENCIA

En UETS, según lo observado desde la figura 22 hasta 26, se determinaron las intensidades de turbulencias a distintas alturas del dominio computacional, para una velocidad de 1.0 m/s . Desde el plano A hasta el B, colocados a altura de 3 m y 6 m se identificaron que existen pequeñas zonas de elevada intensidad de turbulencia. Estas aparecen en ambas caras laterales del edificio frontal, en el espacio central y en la salida del edificio posterior. En las áreas posteriores no existía intensidad de turbulencia. A partir del plano C a una altura de 9 m , se observó un aumento gradual de la intensidad hacia la dirección norte-noreste, lo que concuerda con la dirección del viento. También se verificó que la intensidad de turbulencia disminuye conforme la altura aumenta, dado que existen menos

obstáculos que alteren el comportamiento del flujo del viento y generen turbulencia.

Se determinó que las posibles zonas de montaje se ubican toda la superficie sobre el techo de ambos edificios, con interés en aquellas de altura mayor y orientación favorable a la dirección del viento. En la tabla 7, se muestran los resultados numéricos correspondientes a los valores de intensidad de turbulencia del viento con respecto a la altura y a la velocidad incidente.

Tabla 7

Resultados numéricos de la intensidad de turbulencia en el edificio objetivo de UETS, a distintas alturas y velocidades del viento.

Plano	Velocidad del aire [m/s]	Intensidad de turbulencia media [m ² /s ²]	Intensidad de turbulencia máxima [m ² /s ²]
A = 3 m	0.5	7.68	15.36
	1.0	10.14	22.82
	1.5	9.81	17.65
	2.0	9.70	19.36
	2.5	11.32	22.61
B= 6 m	0.5	2.04	4.08
	1.0	3.38	6.07
	1.5	2.60	4.67
	2.0	2.85	5.13
	2.5	3.34	6.00
C= 9 m	0.5	0.15	0.30
	1.0	0.35	0.63
	1.5	0.17	0.34
	2.0	0.21	0.41
	2.5	0.20	0.39
D= 12 m	0.5	0.07	0.12
	1.0	0.11	0.20
	1.5	0.06	0.11
	2.0	0.10	0.18
	2.5	0.16	0.28
E= 18 m	0.5	0.01	0.02
	1.0	0.01	0.03
	1.5	0.03	0.06
	2.0	0.06	0.11
	2.5	0.10	0.17

Nota. Resultados numéricos de la intensidad de turbulencia en el edificio objetivo de UETS, a distintas alturas y velocidades del viento. Los planos horizontales fueron ubicados a 3 m, 6 m, 9 m, 12 m y 18 m, medidos desde el nivel de suelo.

Figura 22

Contornos de intensidad de turbulencia a una altura de 3 m en el edificio objetivo en UETS con velocidad de viento de 1 m/s.

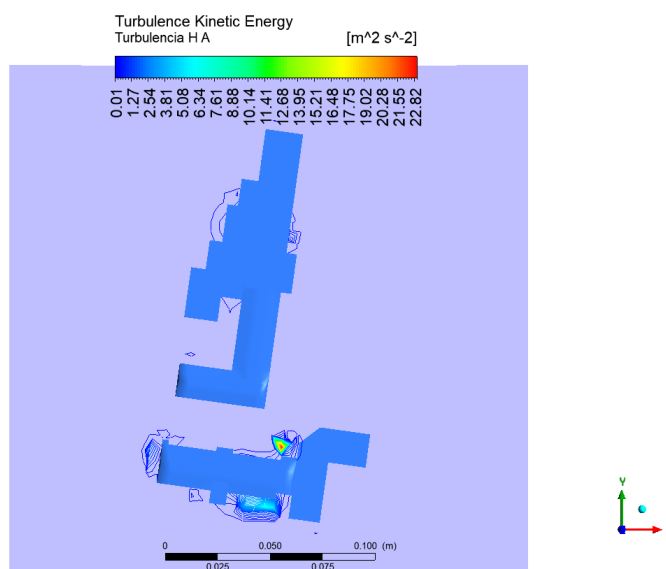


Figura 23

Contornos de intensidad de turbulencia a una altura de 6 m en el edificio objetivo en UETS con velocidad de viento de 1 m/s.

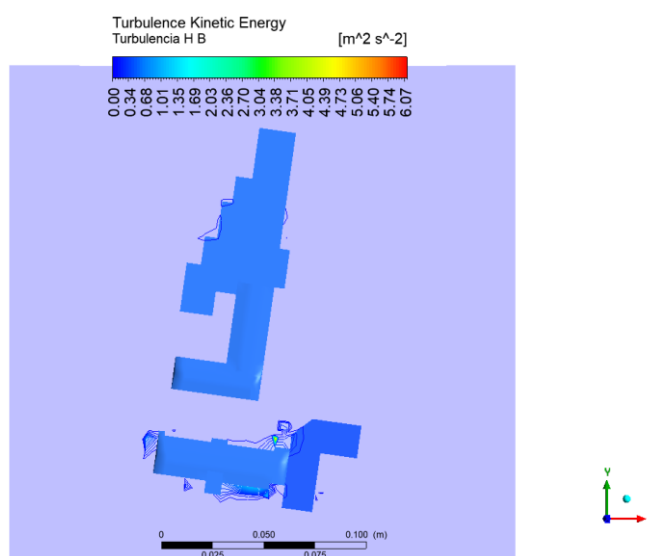


Figura 24

Contornos de intensidad de turbulencia a una altura de 9 m en el edificio objetivo en UETS con velocidad de viento de 1 m/s.

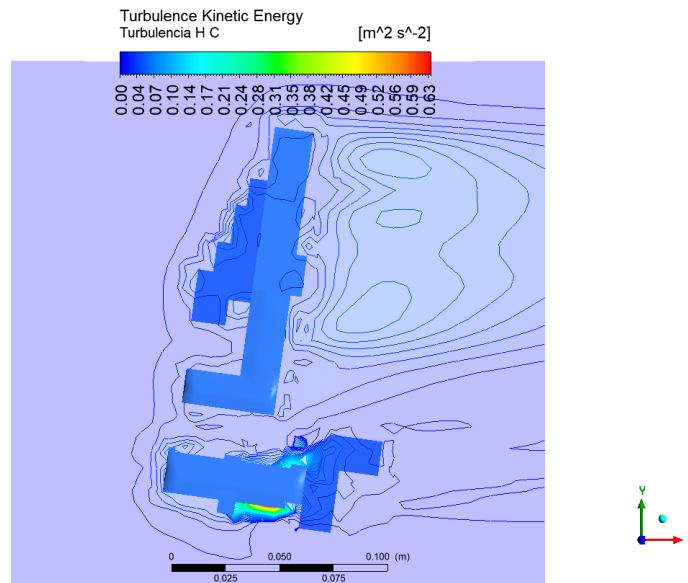


Figura 25

Contornos de intensidad de turbulencia a una altura de 12 m en el edificio objetivo en UETS con velocidad de viento de 1 m/s.

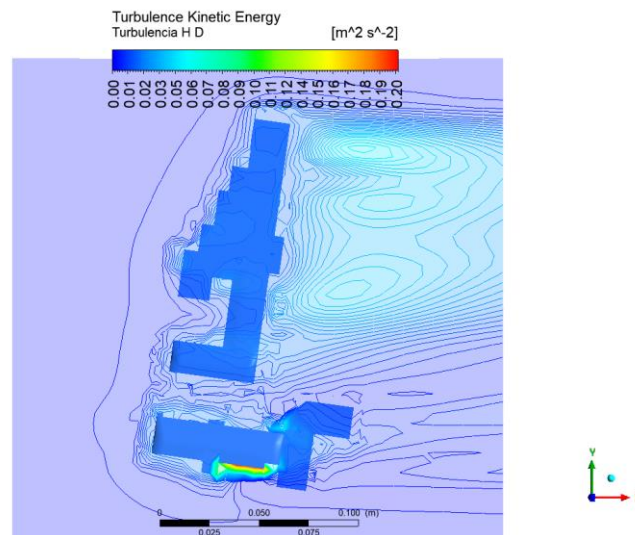
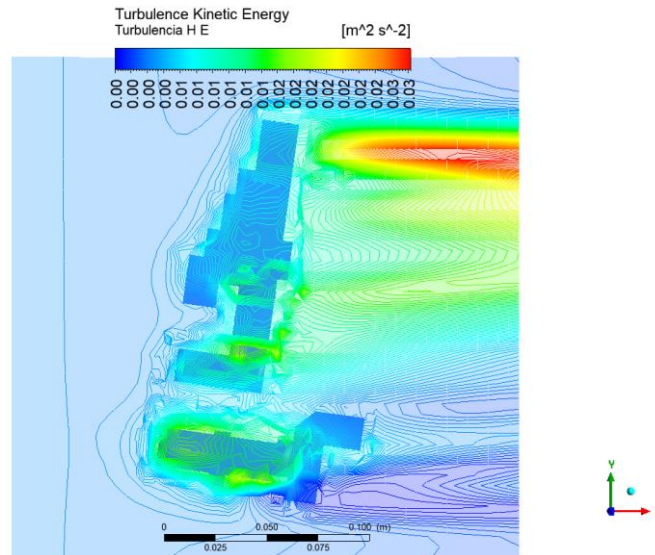


Figura 26

Contornos de intensidad de turbulencia a una altura de 18 m en el edificio objetivo en UETS con velocidad de viento de 1 m/s.



En la UPS campus el Vecino, según lo mostrado desde la figura 27 hasta la 29 se determinaron las intensidades de turbulencias a distintas alturas del dominio de la simulación, para una velocidad de 1 m/s. En esta localidad, los edificios no varían entre niveles de plantas, y se ubicaron los planos horizontales A, B y C por encima de las edificaciones a 15 m, 20 m y 30 m.

En la figura 27, la intensidad turbulencia que se alcanzó fue de $0.10 \text{ m}^2/\text{s}^2$ mientras que en la figura 29 fue de $0.01 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Una zona de baja intensidad de turbulencia es el edificio Cornelio Merchán, donde ingresó con un valor de $0.04 \text{ m}^2/\text{s}^2$ y salió en $0.01 \text{ m}^2/\text{s}^2$. En el caso de los edificios Guillermo Mensi y Mario Rizzini, se consideró el plano B como altura de referencia para la instalación de un aerogenerador, debido a que en alturas inferiores y velocidades mayores a 2 m/s se produce una intensidad de turbulencia mayor de $0.18 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

A continuación, se muestra la tabla 8 con los resultados obtenidos en cada simulación.

Tabla 8

Resultados numéricos de la intensidad de turbulencia en el edificio objetivo de UPS, a distintas alturas y velocidades del viento.

Plano	Velocidad del aire [m/s]	Intensidad de turbulencia media [m ² /s ²]	Intensidad de turbulencia máxima [m ² /s ²]
A= 15 m	1.0	0.05	0.10
	1.5	0.05	0.10
	2.0	0.05	0.18
	2.5	0.09	0.27
B= 20m	1.0	0.02	0.04
	1.5	0.03	0.07
	2.0	0.03	0.11
	2.5	0.05	0.17
C= 30 m	1.0	0.01	0.01
	1.5	0.01	0.02
	2.0	0.01	0.03
	2.5	0.02	0.05

Nota. Resultados numéricos de la intensidad de turbulencia en el edificio objetivo de UPS, a distintas alturas y velocidades del viento. Los planos horizontales fueron ubicados a 15 m, 20 m y 30 m, medidos desde el nivel de suelo.

Figura 27

Contornos de la intensidad de turbulencia a una altura de 15 m en el edificio objetivo en UPS con velocidad de viento de 1 m/s.

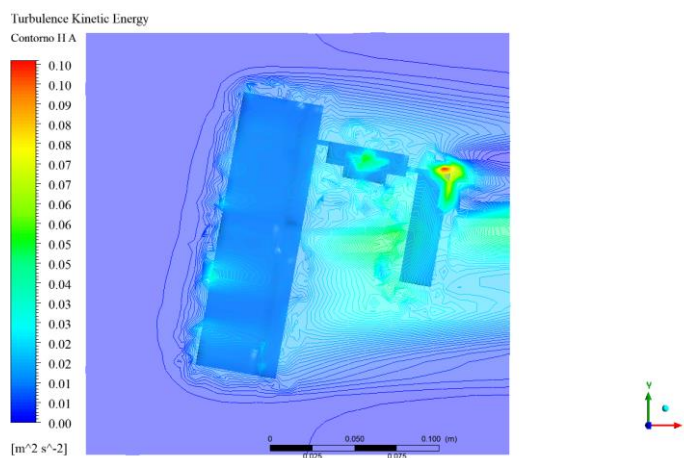


Figura 28

Contornos de la intensidad de turbulencia a una altura de 20 m en el edificio objetivo en UPS con velocidad de viento de 1 m/s.

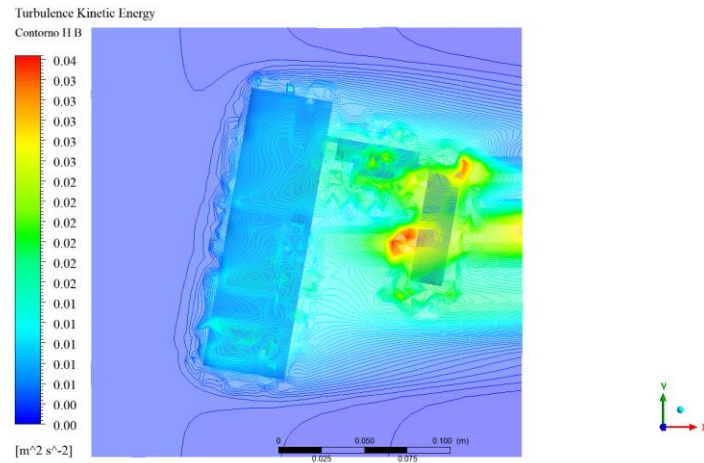
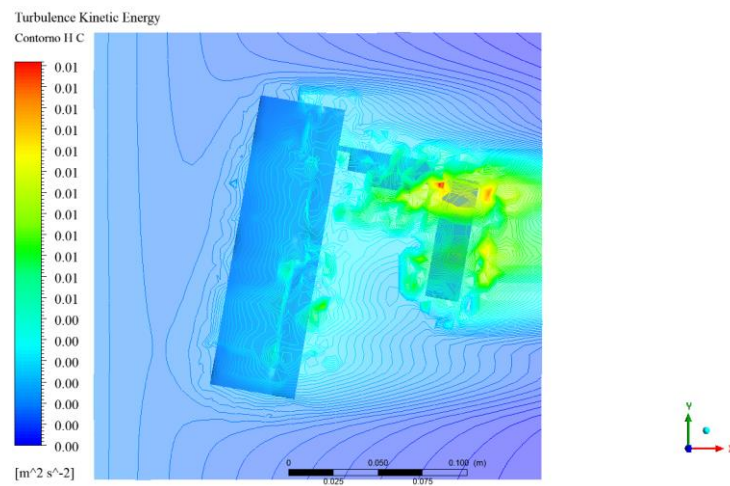


Figura 29

Contornos de la intensidad de turbulencia a una altura de 30 m en el edificio objetivo en UPS con velocidad de viento de 1 m/s.



Los resultados numéricos de esta sección para las velocidades restantes se encuentran en el ANEXO II.

4.3 CONTORNOS DE VELOCIDAD DE VIENTO

En UETS, según lo observado desde la figura 30 hasta 33 está desarrollado el perfil de la velocidad del viento en las edificaciones con el uso de planos verticales a partir de una velocidad de entrada de 1 m/s . En el edificio frontal cuando el viento interacciona con la infraestructura, la velocidad aumentó hasta 1.14 m/s en el recorrido del techo y a la salida disminuyó hasta un valor de 0.93 m/s .

En el edificio posterior cuando el viento interacciona con la infraestructura, la velocidad aumentó hasta 1.08 m/s . En el espacio que existe entre los edificios frontal y posterior, en el plano C hubo un incremento de velocidad de 1.18 m/s , superando la magnitud de la velocidad sobre el techo del edificio frontal el cual es de 1.14 m/s . La velocidad en el edificio posterior desciende a 1.12 m/s hacia la salida.

Otro edificio pequeño está situado detrás del edificio frontal, en el cual la velocidad del viento en la entrada fue de 1.05 m/s . En la tabla 9, se muestran los resultados numéricos, donde se determinó que la mejor ubicación es a lo largo del plano C.

Tabla 9

Resultados numéricos de la velocidad del viento en el edificio UETS, a distintas posiciones y velocidades del viento.

Plano	Velocidad del aire ingreso [m/s]	Velocidad media [m/s]	Velocidad máxima [m/s]
A= 0 m	0.5	0.5	0.57
	1.0	1.02	1.14
	1.5	1.53	1.72
	2.0	2.11	2.30
	2.5	2.56	2.88
B= 10 m	0.5	0.5	0.56
	1.0	1.02	1.14
	1.5	1.53	1.73
	2.0	2.11	2.31
	2.5	2.56	2.86
C= 39 m	0.5	0.52	0.58

	1.0	1.06	1.18
	1.5	1.58	1.77
	2.0	2.11	2.37
	2.5	2.56	2.96
D= 69 m	0.5	0.51	0.83
	1.0	1.05	1.12
	1.5	1.49	1.66
	2.0	2.11	2.24
	2.5	2.56	2.80

Nota. Resultados numéricos de la velocidad de viento en el edificio objetivo de UETS, a distintas posiciones y velocidades del viento. Los planos verticales están ubicados a 0 m, 10 m, 39 m y 69 m.

Figura 30

Contornos de velocidad del viento en el plano A de los edificios objetivos en UETS con velocidad de viento de 1 m/s.

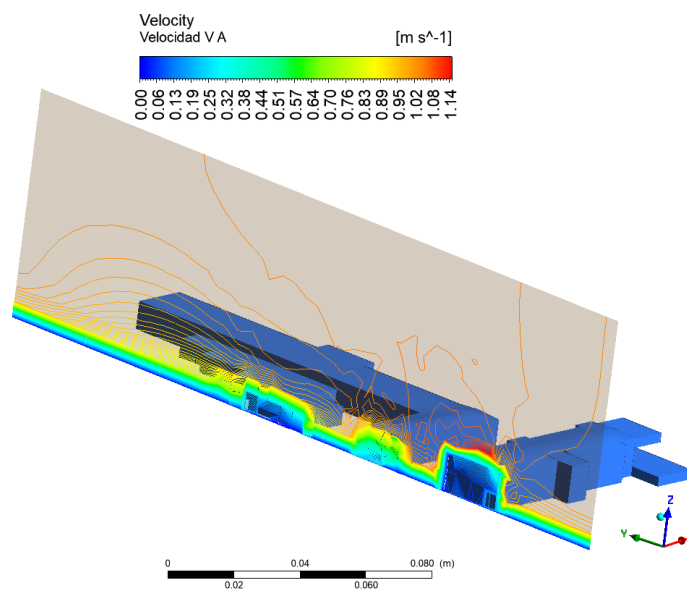


Figura 31

Contornos de velocidad del viento en el plano B de los edificios objetivos en UETS con velocidad de viento de 1 m/s

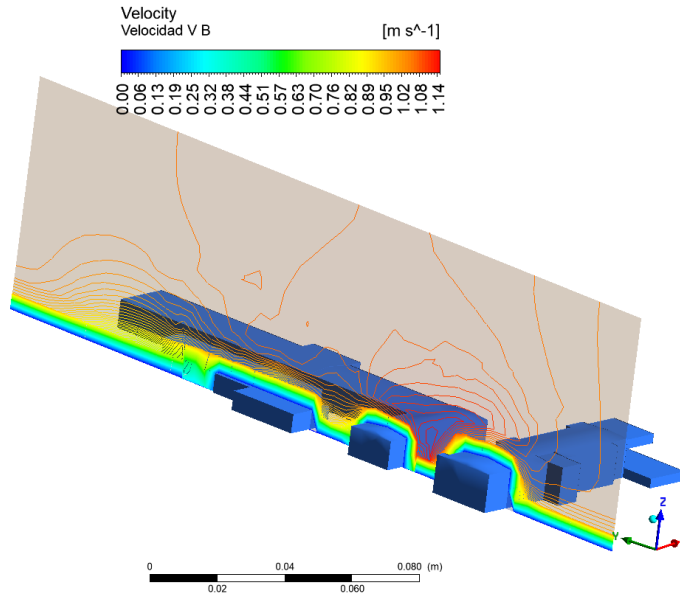


Figura 32

Contornos de velocidad del viento en el plano C de los edificios objetivos en UETS con velocidad de viento de 1 m/s

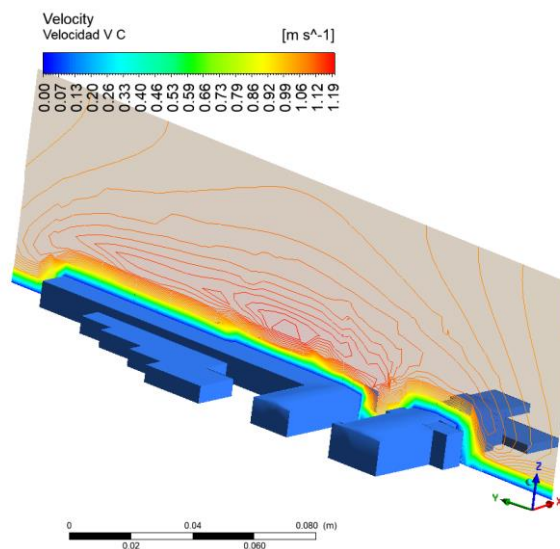
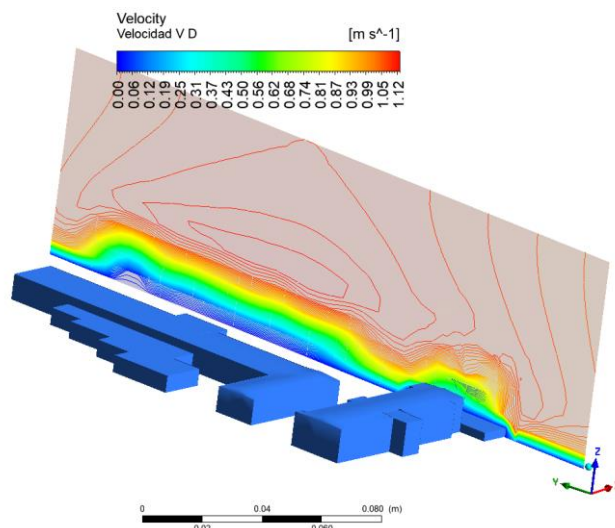


Figura 33

Contornos de velocidad del viento en el plano D de los edificios objetivos en UETS con velocidad de viento de 1 m/s.



En la UPS campus el Vecino, según lo observado desde la figura 34 hasta 37, está desarrollado el perfil de la velocidad del viento en las edificaciones con el uso de planos verticales a partir de una velocidad de entrada de 1 *m/s*.

En el edificio Cornelio Merchán, el aire ingresó a una velocidad de 0.73 *m/s*. A medida que se aleja del techo, la velocidad se incrementó a un promedio de 1.09 *m/s* y a un valor máximo de 1.13 *m/s* en la parte posterior del edificio.

En el edificio Guillermo Mensi, el viento alcanzó una velocidad media de 1.02 *m/s* sobre el techo, y una velocidad máxima de 1.09 *m/s* en la parte posterior del edificio. Este sector posee una intensidad de turbulencia elevada.

En el edificio Mario Rizzini, alcanzó una velocidad media de 1.02 *m/s* sobre el techo, y una velocidad máxima de 1.09 *m/s*. En la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones, donde se determinó que la mayor magnitud de velocidad se encuentra en el plano B.

Tabla 10

Resultados numéricos de la velocidad del viento en el edificio objetivo de UPS, a distintas posiciones y velocidades del viento.

Plano	Velocidad del aire de ingreso [m/s]	Velocidad media [m/s]	Velocidad máxima [m/s]
A= 0 m	1.0	0.73	1.09
	1.5	0.91	1.64
	2.0	1.58	2.19
	2.5	1.67	2.74
B= 30 m	1.0	1.02	1.13
	1.5	1.51	1.69
	2.0	1.66	2.25
	2.5	1.93	2.82
C= 79 m	1.0	1.02	1.09
	1.5	1	1.63
	2.0	1.33	2.18
	2.5	1.66	2.72
D= 120 m	1.0	1.02	1.08
	1.5	1.43	1.63
	2.0	1.81	2.17
	2.5	2.11	2.71

Nota. Resultados numéricos de la velocidad de viento en el edificio objetivo de UPS, a distintas posiciones y velocidades del viento. Los planos verticales están ubicados a 0 m, 30 m, 79 m y 120 m. El plano C se ubica a una distancia aproximada a la ubicación real de la estación meteorológica UPS.

Figura 34

Contornos de velocidad del viento en el plano vertical A de los edificios objetivos en UPS con velocidad de viento de 1 m/s.

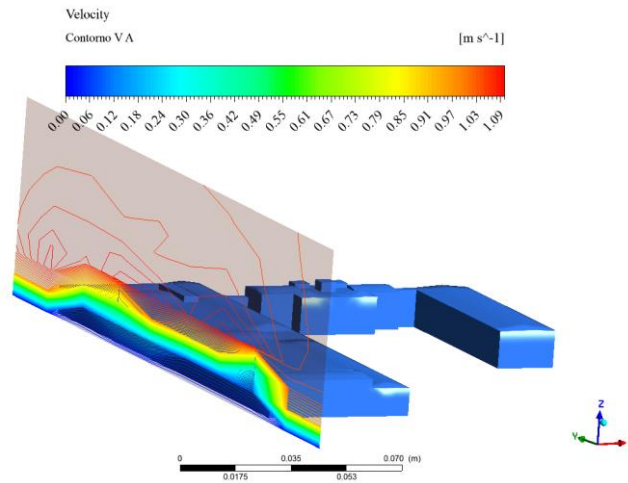


Figura 35

Contornos de velocidad del viento en el plano vertical B de los edificios objetivos en UPS con velocidad de viento de 1 m/s.

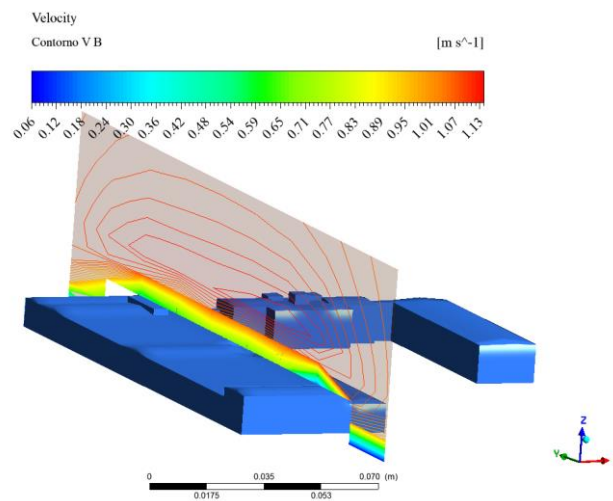
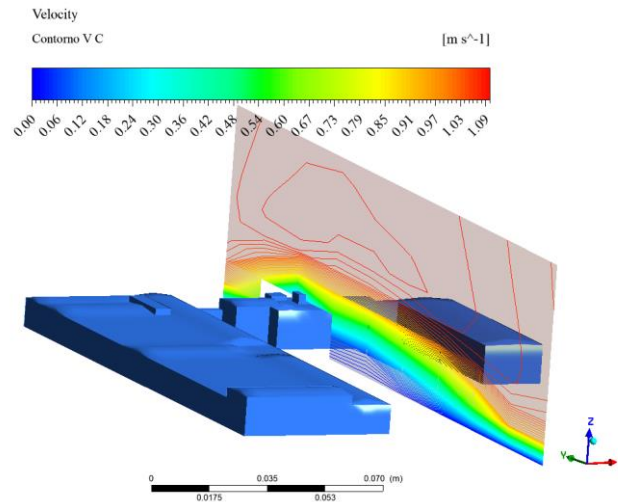
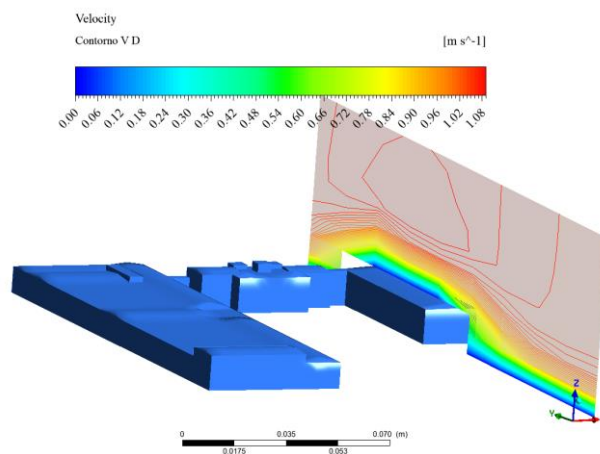


Figura 36

Contornos de velocidad del viento en el plano vertical C de los edificios objetivos en UPS con velocidad de viento de 1 m/s.

**Figura 37**

Contornos de velocidad del viento en el plano vertical D de los edificios objetivos en UPS con velocidad de viento de 1 m/s.



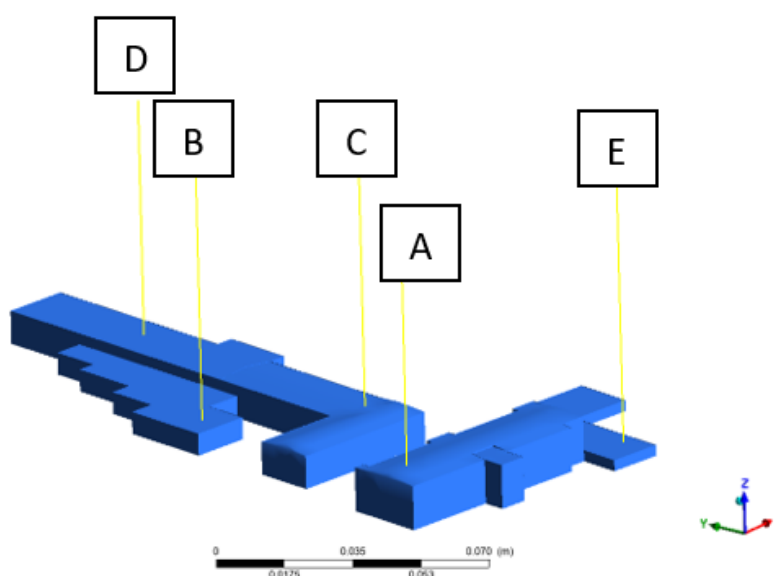
Los resultados numéricos de esta sección para las velocidades restantes se encuentran en el ANEXO III.

4.4 EVALUACIÓN DEL SITIO DE MONTAJE DEL AEROGENERADOR

En UETS, según lo mostrado en la figura 38 los sitios potenciales para el montaje del aerogenerador fueron considerados en base a los resultados de intensidad de turbulencia y el rango de velocidades disponibles. En la figura 39 se visualizan el perfil de la velocidad, el perfil de densidad potencial del viento; y el perfil de intensidad de turbulencia, cuando ingresa aire a 1 m/s .

Figura 38

Identificación de sitios para montaje de aerogeneradores en los edificios objetivos de UETS.



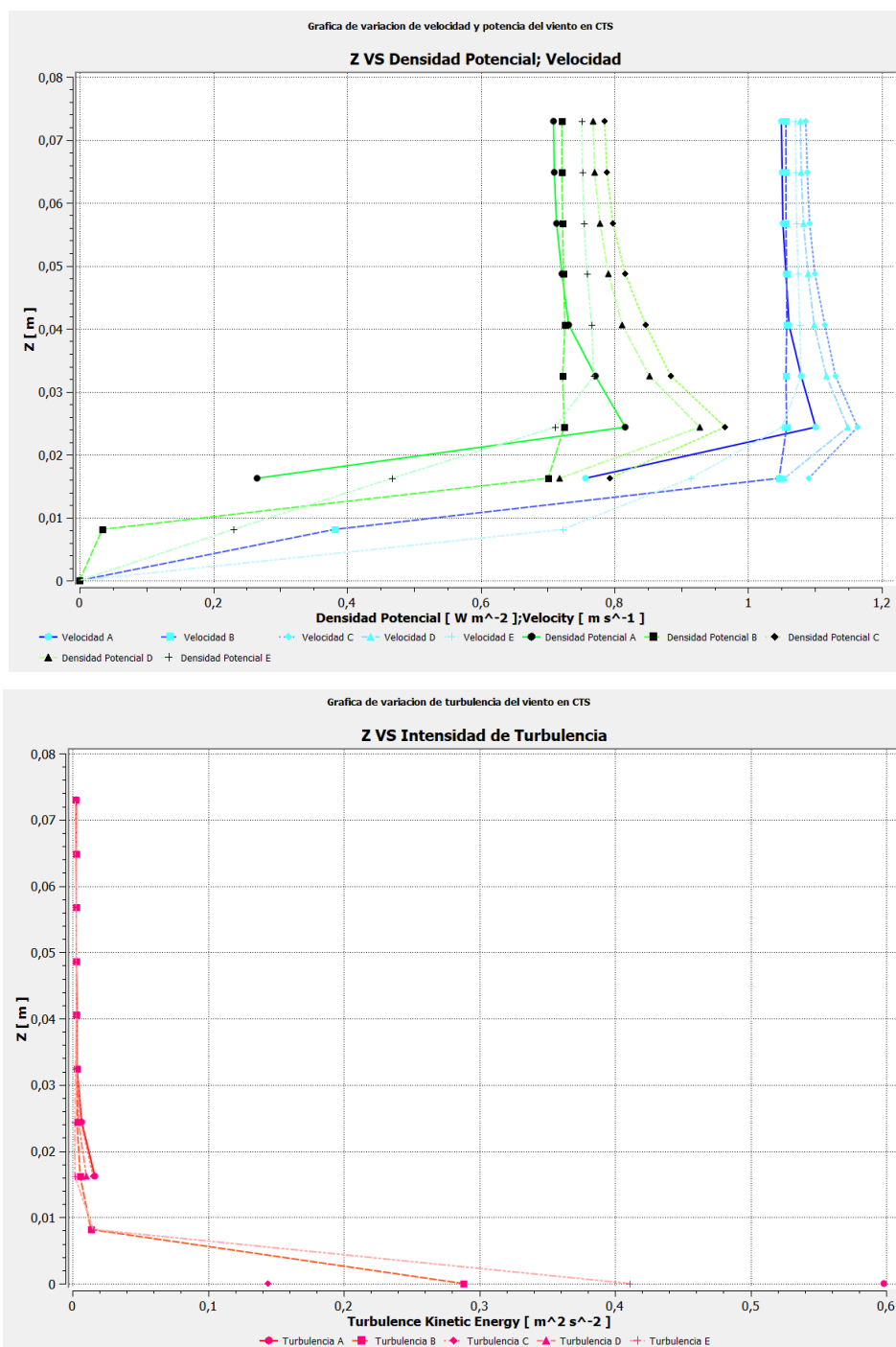
Nota. Identificación de cinco sitios para montaje de aerogeneradores en los edificios objetivos de UETS, se basa en los resultados obtenidos de la intensidad de turbulencia y de la velocidad de viento.

Se determinó que punto C a una altura de 24 m con nivel del suelo, es el mejor sitio de montaje para generar una mayor densidad de potencia comparando con las demás ubicaciones a esa misma altitud. También el punto D que se encuentra en la parte de atrás del edificio frontal entregó características similares. Respecto a la

intensidad de turbulencia todos los puntos son aptos, debido a que ninguno superaba el 18% del límite permisible dada por la norma.

Figura 39

Velocidad e intensidad de turbulencia a 1m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UETS.

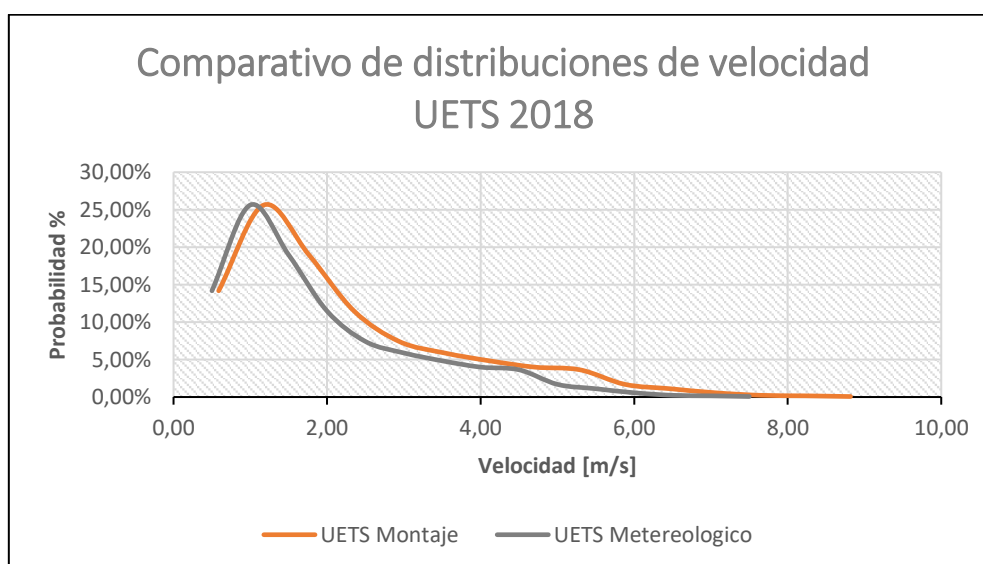


Nota. Velocidad e intensidad de turbulencia para los distintos sitios para montaje del aerogenerador. En la parte superior, se muestra el perfil de velocidades. En la parte inferior, se muestra el perfil de intensidad de turbulencia.

En la figura 40, se muestra un comparativo entre la distribución de probabilidad para las velocidades registradas en la estación meteorológica. Se obtuvo que esta última curva se desplazó hacia la derecha, por el aumento de velocidad del viento al pasar por esta parte de la edificación. La probabilidad de mayor frecuencia 25%, pasa de 1 m/s a 1.18 m/s.

Figura 40

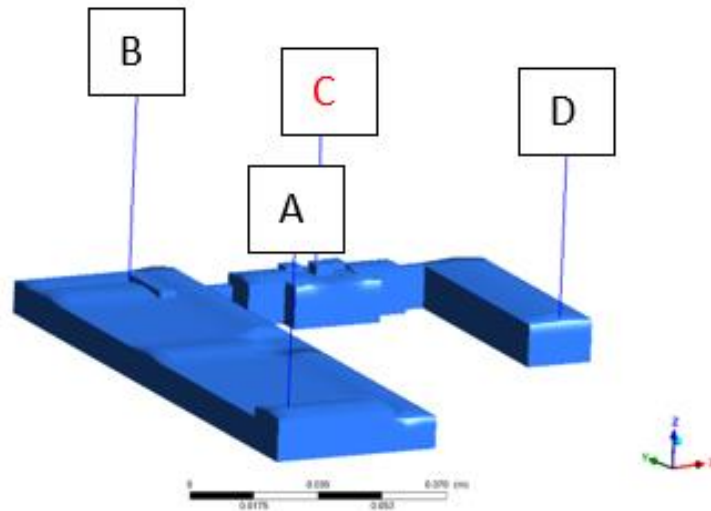
Comparación entre la distribución de velocidad en la estación meteorológica vs el sitio ideal de montaje en UETS.



En la UPS campus el Vecino, según lo observado en la figura 41 se determinaron las posiciones que favorecen en la generación de energía. En la figura 42 se muestran los perfiles de velocidad, de densidad potencial del viento; y de la intensidad de turbulencia, cuando ingresa aire a 1 m/s.

Figura 41

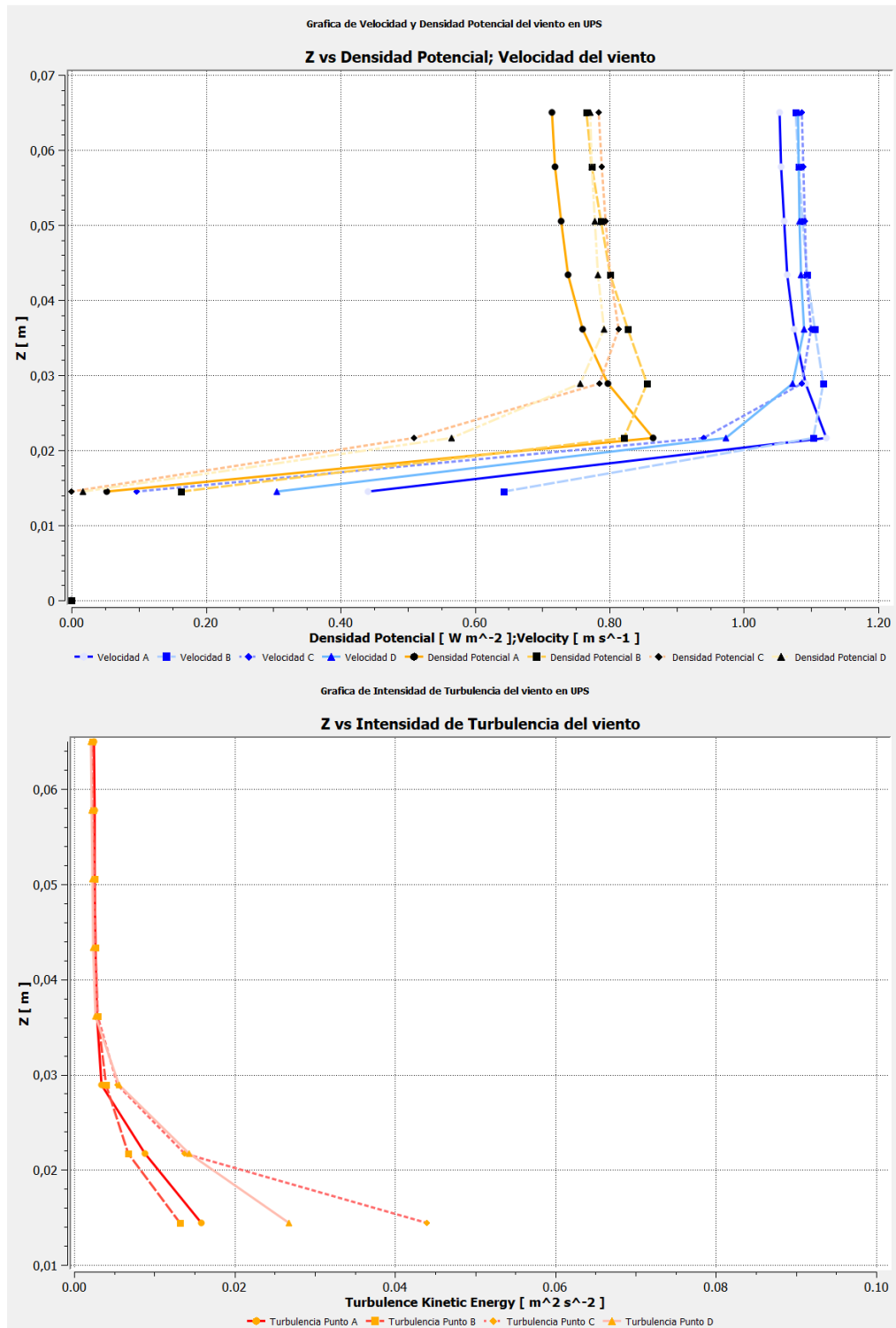
Identificación de sitios para montaje de aerogeneradores en los edificios objetivos de UPS.



Nota. Identificación de cuatro sitios para montaje de aerogeneradores en los edificios objetivos de UPS, se basa en los resultados obtenidos de la intensidad de turbulencia y de la velocidad de viento. El punto C se denota con otro color porque es la ubicación aproximada de la estación meteorológica de UPS.

Figura 42

Velocidad e intensidad de turbulencia a 1m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UPS.



Nota. Velocidad e intensidad de turbulencia para los distintos sitios para montaje del aerogenerador. En la parte superior, se muestra el perfil de velocidades. En la parte inferior, se muestra el perfil de intensidad de turbulencia.

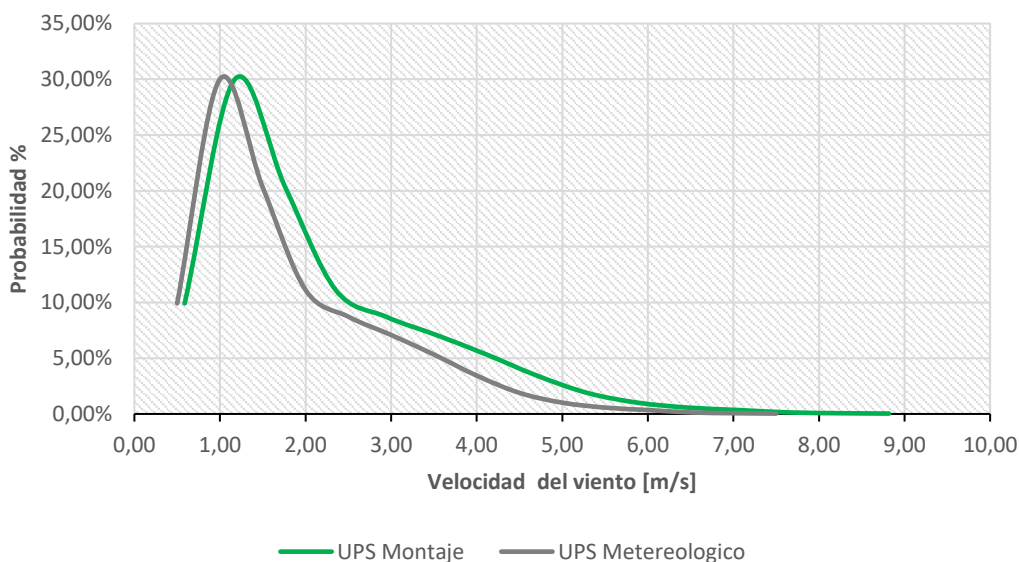
Los resultados numéricos de esta sección para las velocidades restantes se encuentran en el ANEXO IV.

En la figura 43, se muestra un comparativo entre la distribución de probabilidad para las velocidades registradas en la estación meteorológica respecto a las que se obtuvieron en el sitio de montaje B. Se obtuvo que esta última curva se desplazó hacia la derecha, por el aumento de velocidad del viento al pasar por esta parte de la edificación. La probabilidad de mayor frecuencia 30%, pasa de 1 m/s a 1.09 m/s.

Figura 43

Comparación entre la distribución de velocidad en la estación meteorológica vs el sitio ideal de montaje en UPS.

Comparativo de distribuciones de velocidad UPS 2020

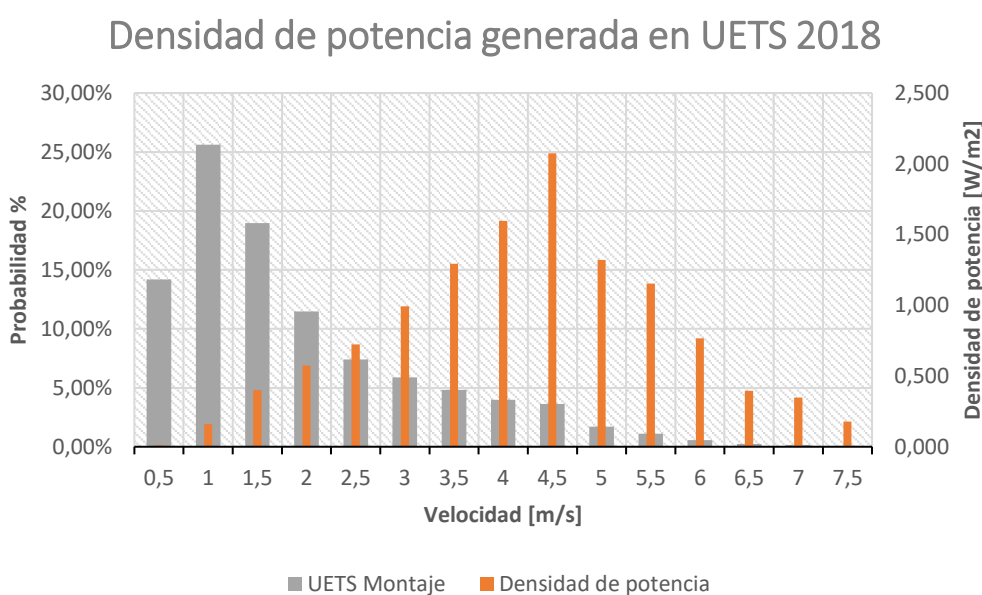


4.5 DENSIDAD DE POTENCIA DISPONIBLE

En UETS, según lo mostrado en la figura 44, la densidad de potencia tiene un crecimiento en su magnitud hasta los 4.5 m/s y después se reduce como consecuencia de la baja probabilidad de que se alcancen esas velocidades según la distribución Weibull.

Figura 44

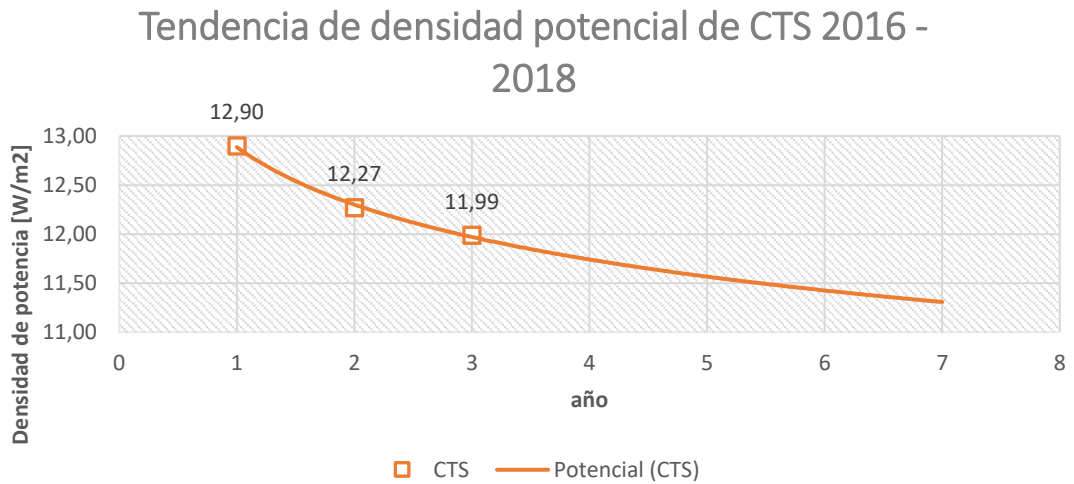
Distribución Weibull y potencia disponible CTS 2018.



En la figura 45, se muestra la tendencia de densidad de potencia desde el 2016 a 2018. En el 2016 la densidad de potencia es de 12.90 W/m^2 , en el 2017 es de 12.27 W/m^2 y en el 2018 es de 11.99 W/m^2 . En el periodo 2016 a 2017 hubo una reducción del 4%; y, en el periodo 2017 a 2018 se redujo un 2%. Este decrecimiento se atribuiría al crecimiento urbano, fenómenos climáticos, otros.

Figura 45

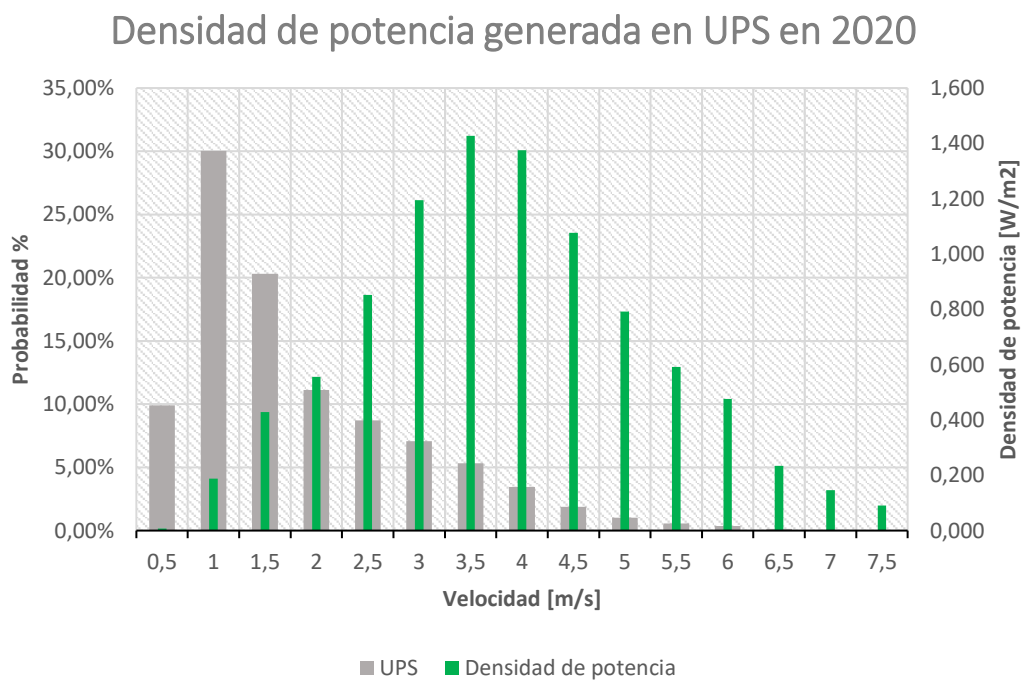
Tendencia densidad de potencia disponible CTS periodo 2016 a 2018.



En la UPS campus el Vecino según lo mostrado en la figura 46, la densidad de potencia tiene un crecimiento en su magnitud hasta los 4.5 m/s y después se reduce como consecuencia de la baja probabilidad de que se alcancen esas velocidades según la distribución Weibull.

Figura 46

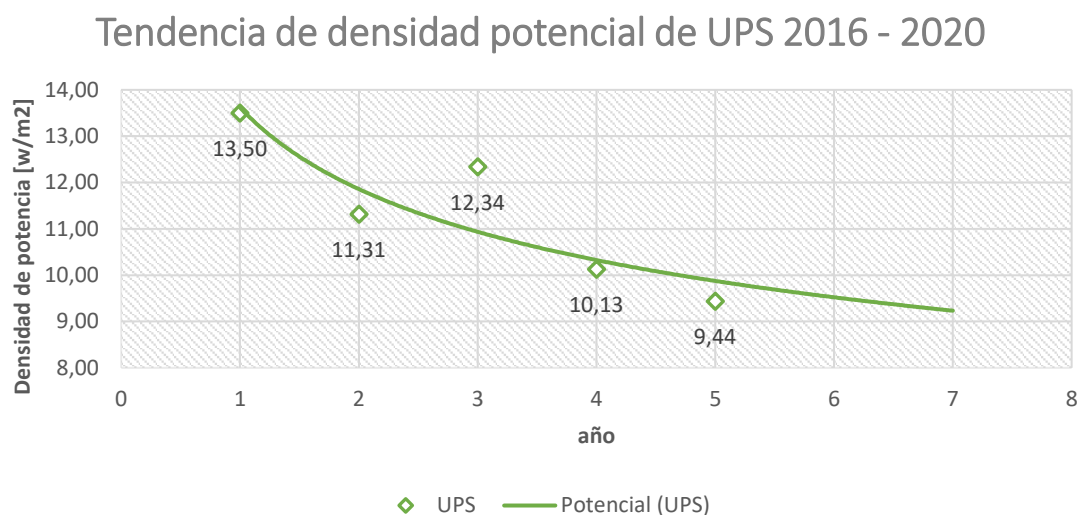
Distribución Weibull y potencia disponible UPS 2020.



En la figura 47, se muestra la tendencia de densidad de potencia desde el 2016 a 2020. En el 2016 la densidad de potencia es de 13.50 W/m^2 , en el 2017 es de 11.31 W/m^2 , en el 2018 es de 12.34 W/m^2 , en el 2019 es de 10.13 W/m^2 y en el 2020 es de 9.44 W/m^2 . En el periodo 2016 a 2017 hubo una reducción del 16%; en el periodo 2017 a 2018 se incrementó un 9%; en el periodo 2018 a 2019 se redujo un 18%; y, en el periodo 2019 a 2020 se redujo un 7%.

Figura 47

Tendencia densidad de potencia disponible UPS periodo 2016 a 2020.



4.6 SELECCIÓN DE AEROGENERADOR VAWT

Acorde a la velocidad obtenida del historial de la base de datos de las estaciones meteorológicas, se determinó que la velocidad con mayor frecuencia en la zona urbana de la ciudad de Cuenca oscila entre 1 m/s . En consecuencia, se buscó un aerogenerador tipo VAWT que cumpla con características de operar a bajas velocidades de arranque. En la tabla 11, se listan las especificaciones técnicas y geométricas de los aerogeneradores disponibles en el mercado.

Tabla 11

Datos técnicos de los modelos FS-V-200 y 300, respectivamente.

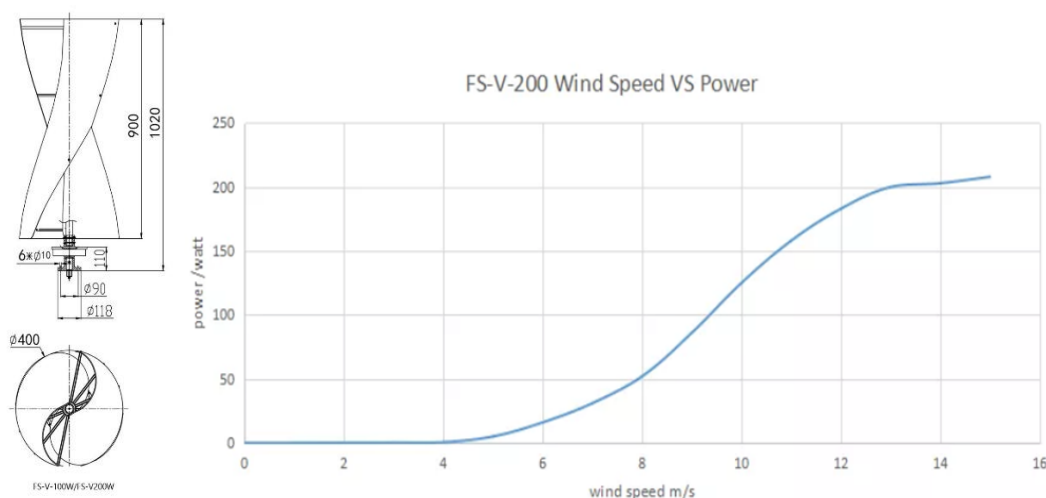
Aerogenerador vertical VAWT		
Modelo	FS-V-200W	FS-V-300W
Diámetro rotor [m]	0.40	0.52
Altura [m]	0.90	1.05
Área de barrido [m ²]	0.36	0.55
Velocidad de arranque [m/s]	1.3	1.3
Velocidad de corte [m/s]	2.5	2.5
Velocidad nominal [m/s]	12	13
Potencia nominal [W]	200	300
Potencia máxima [W]	250	350

Nota. Adaptado de (Flytpower, sf)

En la figura 48, se muestra la curva de potencia y la geometría de un aerogenerador vertical de 200 W.

Figura 48

Dimensiones y curva característica del modelo de aerogenerador de eje vertical FS-V-200.

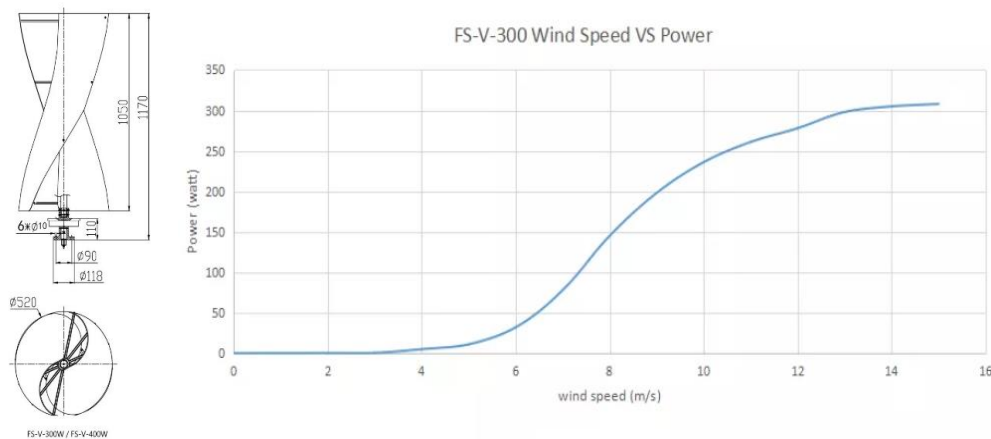


Nota. Adaptado de (Flytpower, s. f.)

En la figura 49, se muestra la curva de potencia y la geometría de un aerogenerador vertical de 300 W.

Figura 49

Dimensiones y curva característica del modelo de aerogenerador de eje vertical FS-V-300.



Nota. Adaptado de (Flytpower, s. f.)

4.7 GENERACIÓN DE ENERGÍA ANUAL

El análisis de la generación de energía se realizó en UPS, en el sitio de montaje C. En la figura 50 y la figura 51, se muestra la potencia que se espera obtener en condiciones ideales de disponibilidad de recurso eólico, en comparación a la potencia generada considerando las condiciones reales del recurso eólico en el sitio de montaje. Se estableció un rango de velocidades hasta 7.5 m/s para ambas curvas. En condiciones ideales los aerogeneradores FS-V-200 y FS-V-300 entregarían 1817.7 kWh/año y 4966.9 kWh/año , a diferencia de los 17.90 kWh/año la energía anual que se extraería con el recurso eólico disponible. Este comparativo, indica que no se está aprovechando eficientemente estos equipos, dado que no se ha sobrepasado la velocidad de corte en la mayoría del intervalo.

Figura 50

Punto de operación del sistema eólico en edificio UPS instalando el aerogenerador FS-V-200 W.

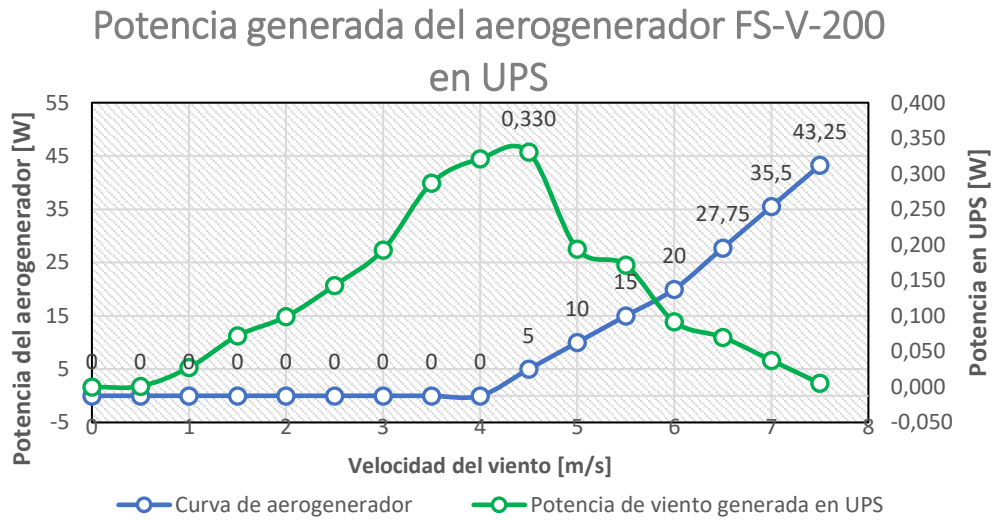
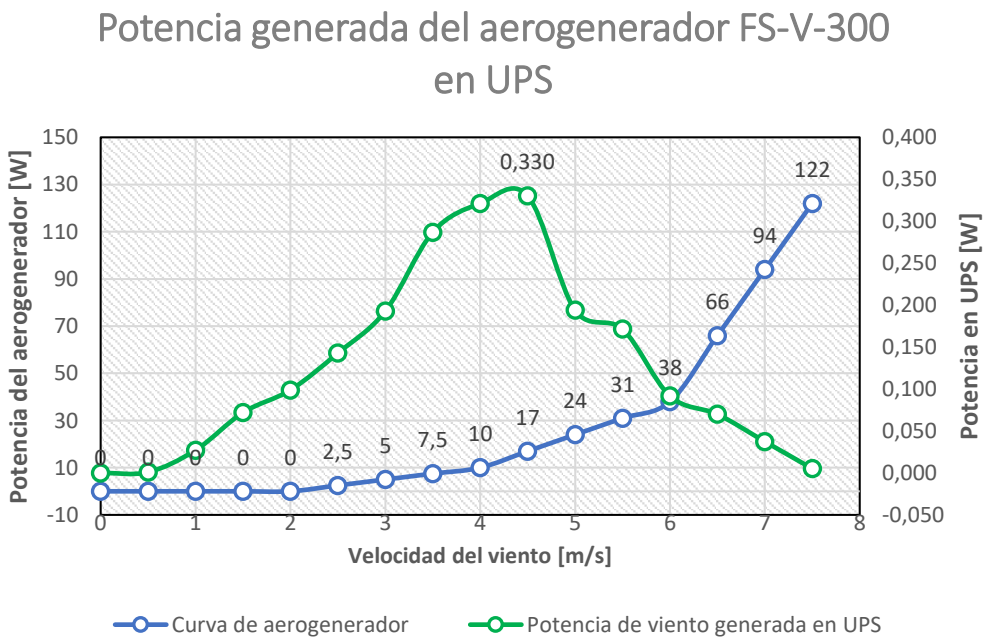


Figura 51

Punto de operación del sistema eólico en edificio UPS instalando el aerogenerador FS-V-300 W.



5 CONCLUSIONES

El modelo $k - \varepsilon$ realizable con los valores de constantes recomendados para flujo turbulento, permitió representar de manera adecuada el campo de viento sobre las edificaciones objetivo, tomando como referencia los datos meteorológicos de la estación UPS y comparando con los resultados obtenidos en el punto C en el dominio computacional de UPS mostraron resultados cercanos a 1 m/s.

En este estudio, se ha realizado una recolección de datos meteorológicos de las estaciones ubicadas en la zona urbana y rural de la ciudad de Cuenca. Se procesaron las condiciones de entorno, la velocidad y dirección del viento en los sectores de El Vecino (estación UPS) y Yanuncay (estación CTS). Con las simulaciones en ANSYS FLUENT® CFD se determinó comportamiento del aire dentro de la ciudad de Cuenca y se identificaron los sitios de montaje de los aerogeneradores y se estimó la producción de energía anual.

En el tratamiento de datos meteorológicos en la ciudad de Cuenca de los últimos 5 años, se estableció que el rango de velocidad promedio de viento oscila entre 0.5 m/s a 2.5 m/s. Esto abarca un 75% del total de datos, donde predomina la velocidad de 1 m/s con un 26 % y 27% de probabilidad en las parroquias de Yanuncay y El Vecino, respectivamente. Respecto a la dirección del viento, este se encuentra entre el norte-noreste y este-noreste, con 23% de probabilidad. El viento predominante es unidireccional y posee un bajo potencial eólico de acuerdo con el rango de velocidades promedio.

El mallado realizado a las edificaciones y al área circundante del dominio computacional, por motivo de velocidad de procesamiento, se determinó un tamaño ideal de celda promedio de 5 mm y de orden lineal. Esto se corroboró en la independencia de malla, que al disminuir el tamaño de la celda los resultados obtenidos no excedían el 5% de variación. Mientras que las métricas de calidad de la malla para los casos de estudios en UETS y UPS cumplieron con los

requerimientos asegurando la convergencia de los resultados obtenidos, para el *Skewness* se obtuvieron valores de 0.09 y 0.16, respectivamente; y para *Orthogonal Quality* valores de 0.93 y 0.87, respectivamente.

Se determinó que la orientación de la edificación con respecto al viento incidente influye en el incremento de velocidad e intensidad de turbulencia del viento. Si la diferencia es amplia entre el ángulo entre la edificación y la dirección del viento, entonces se ocasiona aumento de la turbulencia en zonas posteriores del edificio y disminuye la velocidad del viento, produciendo zonas no deseables para el montaje de un aerogenerador. También, mientras disminuya el recorrido del viento sobre el techo, aumenta la velocidad, tal como se observó en las simulaciones del edificio posterior de UETS.

La intensidad de turbulencia se incrementa a menores alturas debido a la cantidad de obstáculos que se presentan en el entorno urbano, y el efecto es contrario cuando el edificio tenga mayor altitud. Esto se evidenció con las gráficas de variación de altura contra la turbulencia. Otro aspecto que influye es la forma de la edificación, mientras más irregular la intensidad de turbulencia se incrementa, lo cual se refleja en el edificio de UETS.

La velocidad del viento disminuye cuando ingresa a las edificaciones, debido a la fuerza de arrastre que produce una pared sólida. Con el edificio posterior de UETS, se determinó que si la infraestructura dispone de una configuración escalonada y la dirección del viento es normal, favorece en el crecimiento de velocidad en la parte más alta del edificio. Esto es beneficioso al momento del montaje del aerogenerador, debido a que se necesita menor altura. En el caso de edificios situados detrás de otros de igual o menor altura, como en el caso de UPS, no es factible de colocar un aerogenerador la magnitud viento disminuye y aumenta la intensidad de turbulencia a menor altura de montaje.

En el estudio se ha demostrado que la ciudad de Cuenca dentro de las zonas urbanas se dispone de un bajo potencial eólico, debido a una baja frecuencia de vientos superiores a 3 m/s . Con respecto a los modelos de aerogeneradores de eje vertical (VAWT) comerciales actuales, se cuenta con una variedad de modelos cuya velocidad de arranque es de 1 m/s , con el recurso eólico disponible en la zona urbana de la ciudad de Cuenca, no existe la tecnología necesaria para que pueda generar energía sustentable para el consumo diario.

Se recomienda en las siguientes fases de estudio, se debería evaluar un diseño de un aerogenerador que sea apto para las velocidades bajas, también la evaluación del uso secciones cónicas como difusores y concentradores para disponer de velocidades y potencias mayores.

Es recomendable la simulación de varios modelos de techos que se puedan adoptar al urbanismo de Cuenca y mejoren el comportamiento del flujo del viento. Como complemento a ello, la medición in situ los parámetros de velocidad y dirección de viento en las edificaciones seleccionadas.

6 TRABAJOS FUTUROS

A continuación, se presentan algunas aristas de estudio que pueden desarrollarse en lo posterior con los resultados obtenidos de este estudio. Entre ellas están:

Incidencia de los modelos de techos que pueden adoptarse al urbanismo de Cuenca y de cómo esta variación influye directamente en el comportamiento del flujo de viento.

Implementación de concentradores de viento que aumenten la magnitud de la velocidad.

Diseño mecánico de un aerogenerador de eje vertical adaptado a las condiciones del recurso eólico disponible en Cuenca.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aldeán, J. M. (2014). Las fuentes de energía renovables y su influencia en el cambio de matriz energética: Su impulso desde el enfoque de la sustentabilidad de los recursos naturales especialmente de hidroenergía, por ser de mayor potencial en Ecuador. [Master's Thesis]. Quito, Ecuador: Flacso Ecuador.
- Bustamante, A. (2017). Caracterización de la isla de calor urbana por efectos de la morfología en la ciudad andina de Cuenca, Ecuador.
- Carriveau, R. (2011). Fundamental and Advanced Topics in Wind Power. BoD – Books on Demand.
- Cedeño, E. L., Alvear, P. S., Zurita, D. P., Yáñez, Y., & Gutiérrez, R. (2017). Estudio y evaluación de factibilidad del uso de energías alternativas para la estación SEK Limoncocha en Ecuador. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 4(3), 83-91.
- Enríquez Millán, M. A. (2014). Análisis del emplazamiento de un generador eólico en una vivienda urbana usando técnicas CFD.
- Escudero, J. (2008). Manual de energía eólica. Mundi-Prensa Libros.
- Evans, S. P., Kc, A., Bradney, D. R., Urmee, T. P., Whale, J., & Clausen, P. D. (2017). The suitability of the IEC 61400-2 wind model for small wind turbines operating in the built environment. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 2, 31. <https://doi.org/10.1051/rees/2017022>
- Ferreira, R. M. R., Acosta, H. C., & DE LA ENERGÍA, E. (2014). El desarrollo eólico en Brasil Ecuador y España: Reflexiones a partir del marco normativo. *Revista de estudios económicos y empresariales*, 26, 95-112.

- Flytpower. (s. f.). FS Vertical Wind Turbine Factory, Suppliers—China FS Vertical Wind Turbine Manufacturers. Recuperado 1 de diciembre de 2022, de <https://www.flytpower.com/fs-vertical-wind-turbine/>
- García, S. (2019). Estudio de viabilidad de sistema de aprovechamiento eólico urbano. 53.
- Herrero, C. (2016). Estudio de la velocidad del viento: Análisis espacial y ajuste a una función de distribución. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/22939>
- Icaza, D., Borge, D., & Galindo, S. P. (2021). Proposal of 100% renewable energy production for the City of Cuenca- Ecuador by 2050. *Renewable Energy*, 170, 1324-1341. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.067>
- IRENA. (2022). IRENA (2022), Renewable Energy Statistics 2022. <http://www.irena.org/Publications>
- Jurasz, J., Canales, F. A., Kies, A., Guezgouz, M., & Beluco, A. (2020). A review on the complementarity of renewable energy sources: Concept, metrics, application and future research directions. *Solar Energy*, 195, 703-724. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.087>
- Kc, A., Whale, J., & Urmee, T. (2019). Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: A review. *Renewable Energy*, 131, 268-283. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.050>
- Kumar, R., Raahemifar, K., & Fung, A. S. (2018). A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 281-291.
- Loor, J. F., Segarra, M. M., & Salas, S. (2021). Diseño de un sistema de almacenamiento de energía por aire comprimido anexo a un parque eólico instalable en Loja,

Ecuador. [Thesis, ESPOL. FCNM].

<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/52068>

Martin, S., Jung, S., & Vanli, A. (2020). Impact of near-future turbine technology on the wind power potential of low wind regions. *Applied Energy*, 272, 115251.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115251>

Mohtasham, J. (2015). Review Article-Renewable Energies. *Energy Procedia*, 74, 1289-1297. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.774>

Nalley, S., & LaRose, A. (2021). International Energy Outlook 2021. *Energy Information Agency*, 21.

Peralta, J., Lopez, Á., Barriga, A., Sosa, I., & Delgado, E. (2013). Análisis estadístico de la información meteorológica para la explotación de energías renovables en el Ecuador. *Conference Paper*,(2), 9-9.

Pérez, C. (2018). Análisis fluidodinámico 3D de un aerogenerador de baja potencia [Proyecto/Trabajo fin de carrera/grado, Universitat Politècnica de València].

<https://riunet.upv.es/handle/10251/110717>

Pishgar, S. H., Keyhani, A., & Sefeedpari, P. (2015). Wind speed and power density analysis based on Weibull and Rayleigh distributions (a case study: Firouzkooh county of Iran). *Renewable and sustainable energy reviews*, 42, 313-322.

Puerta León, A. (2018). Análisis de curvas velocidad de viento y altura: Propuesta de identificación de patrones.

Reinoso, F., Jara, N., Gómez, P., & Nieto, C. (2016). Caracterización del flujo de aire en colinas para el emplazamiento de parques eólicos. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, 15, 17-26.

- Tasneem, Z., Al Noman, A., Das, S. K., Saha, D. K., Islam, Md. R., Ali, Md. F., R Badal, Md. F., Ahamed, Md. H., Moyeen, S. I., & Alam, F. (2020). An analytical review on the evaluation of wind resource and wind turbine for urban application: Prospect and challenges. *Developments in the Built Environment*, 4, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100033>
- Toja, F., Peralta, C., Lopez-Garcia, O., Navarro, J., & Cruz, I. (2015). Roof region dependent wind potential assessment with different RANS turbulence models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 142, 258-271.
- Torres, J. L., Alvarez, J., Restrepo, D., Tamayo, J. M., Nieto, C., & Sierra, J. (2020). Technological and operational aspects that limit small wind turbines performance. *Energies*, 13(22), 6123.
- Torres, J. L., Nieto, C., & Sierra, J. (2020). Hybrid energy systems sizing for the Colombian context: A genetic algorithm and particle swarm optimization approach. *Energies*, 13(21), 5648.
- Vera, S., Cortés, M., Rao, J., Fazio, P., & Bustamante, W. (2015). Evaluación de modelos de turbulencia para predecir los flujos de masa de aire interzonas a través de una abertura de escalera para la convección natural y mixta en los edificios. *Revista ingeniería de construcción*, 30(2), 85-97. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732015000200001>
- Yang, A.-S., Su, Y.-M., Wen, C.-Y., Juan, Y.-H., Wang, W.-S., & Cheng, C.-H. (2016). Estimation of wind power generation in dense urban area. *Applied Energy*, 171, 213-230. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.007>

ANEXOS

ANEXO I: COMPORTAMIENTO DEL VIENTO

A continuación, se muestran la interacción del viento con las edificaciones de UETS según figura 52 y UPS acorde a la figura 53. Esto se realizó para las velocidades, determinadas en la distribución de Weibull con dirección norte-noreste.

Figura 52

Líneas de corriente del campo de viento al interactuar en el edificio objetivo de UETS, a) 0.5 m/s, b) 1 m/s, c) 1.5 m/s, d) 2 m/s y e) 2.5 m/s.

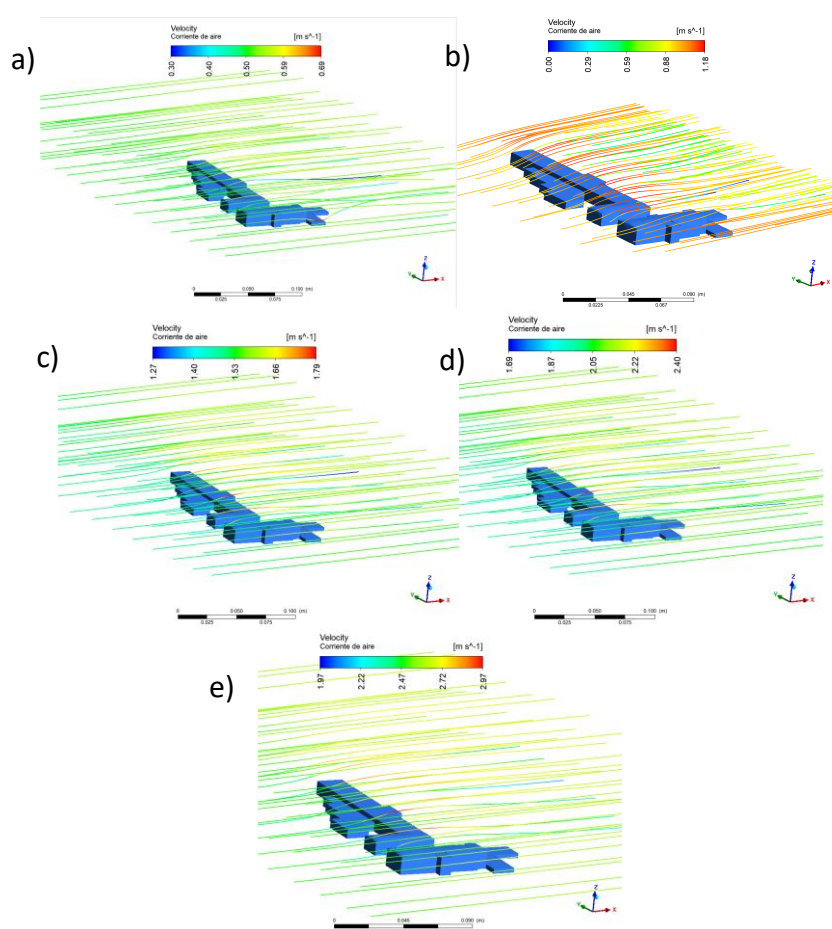
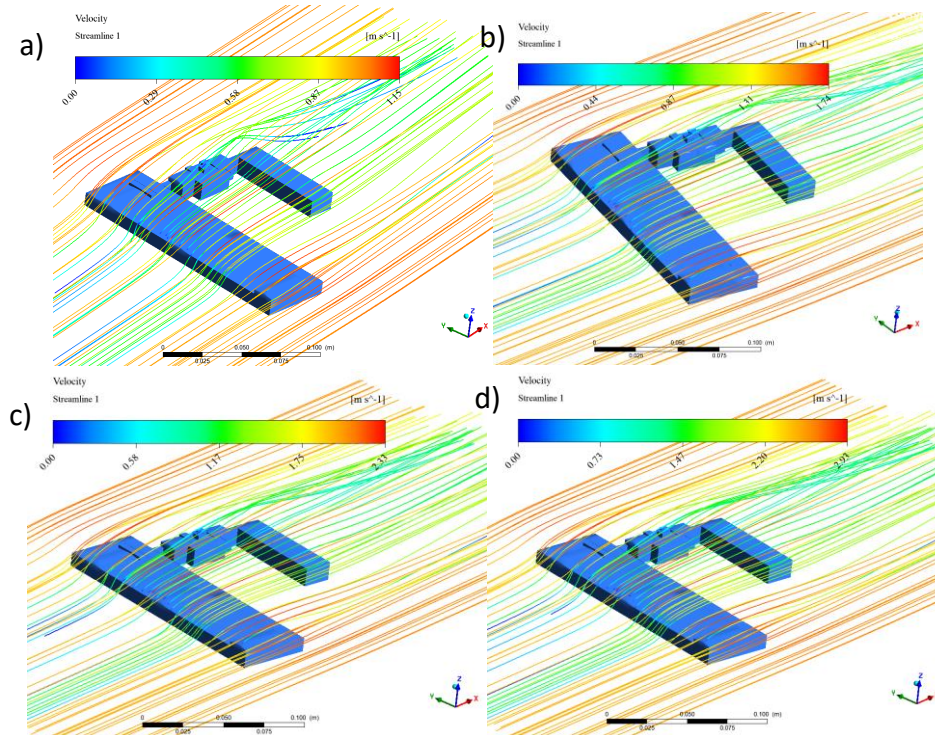


Figura 53

Líneas de corriente del campo de viento al interactuar en el edificio objetivo de UPS, a) 1 m/s, b) 1.5 m/s, c) 2 m/s y d) 2.5 m/s.



ANEXO II: CONTORNOS DE INTENSIDAD DE TURBULENCIA

El contorno de intensidad de turbulencia del viento a distintos planos horizontales y velocidades se muestra desde la figura 54 a la figura 58 en UETS, y desde la figura 59 a la figura 62 en UPS.

Figura 54

Contornos de intensidad de turbulencia del aire a 0,5 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS a a) 3 m, b) 6 m, c) 9 m, d) 12 m y e) 18 m de altura.

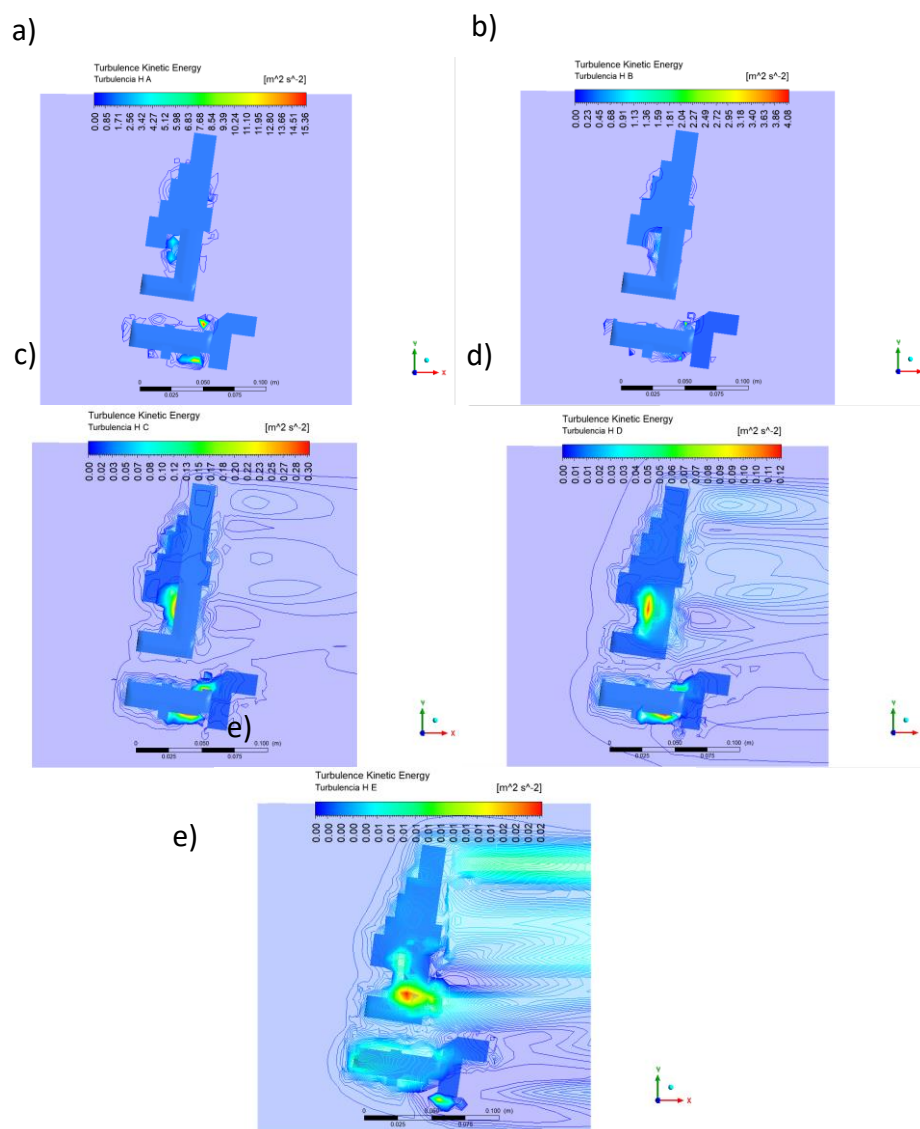


Figura 55

Contornos de intensidad de turbulencia del aire a 1 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS a a) 3 m, b) 6 m, c) 9 m, d) 12 m y e) 18 m de altura.

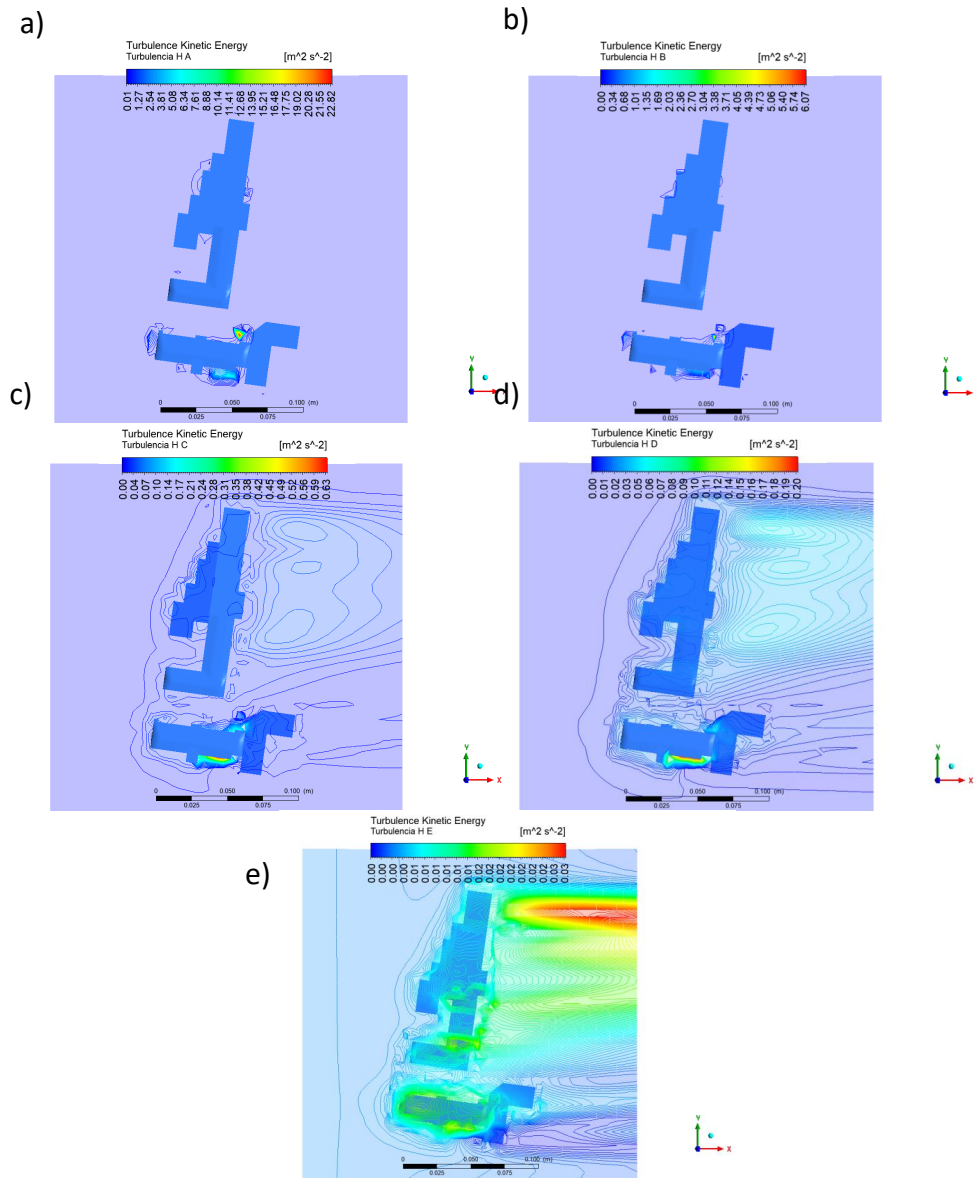


Figura 56

Contornos de intensidad de turbulencia del aire a 1.5 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS a a) 3 m, b) 6 m, c) 9 m, d) 12 m y e) 18 m de altura.

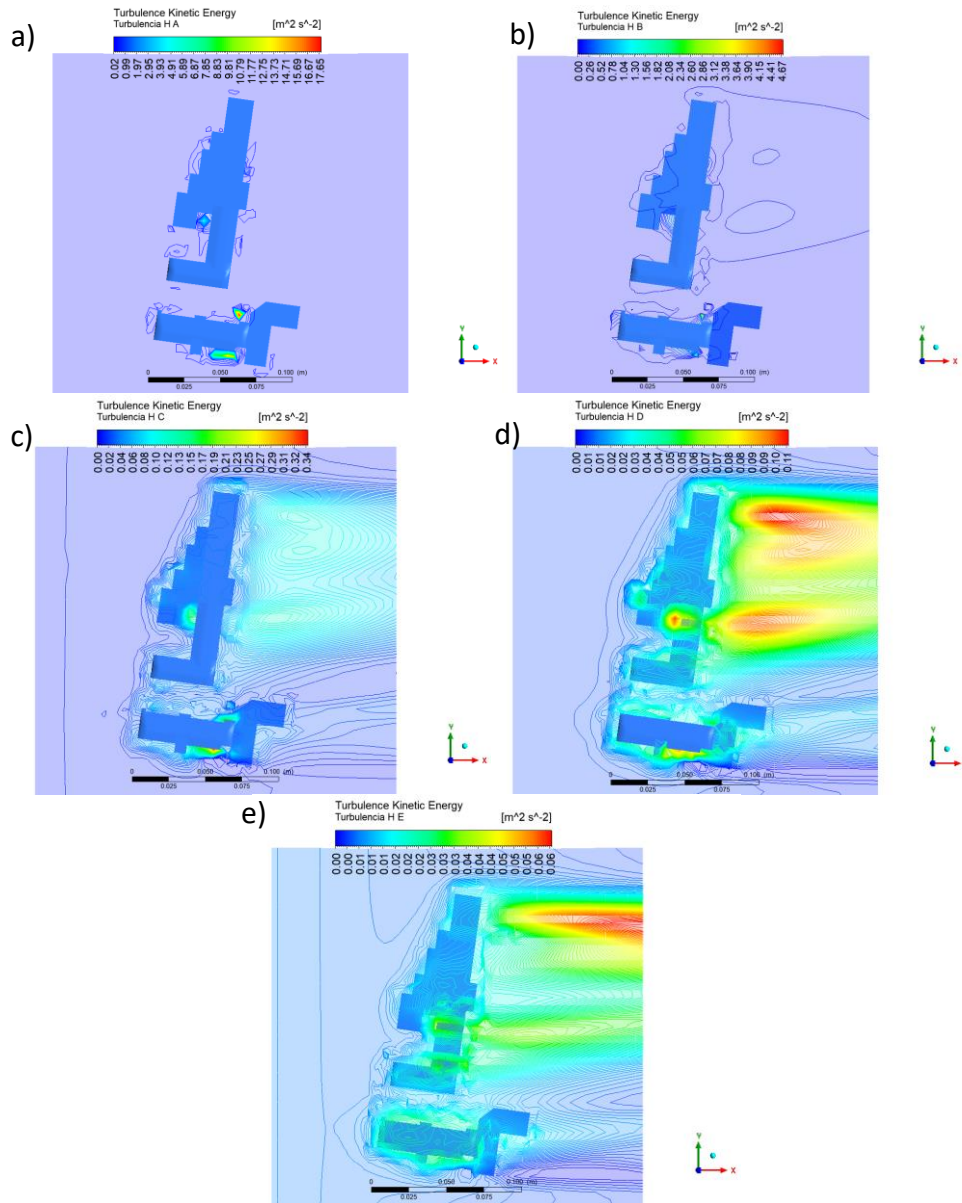


Figura 57

Contornos de intensidad de turbulencia del aire a 2 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS a a) 3 m, b) 6 m, c) 9 m, d) 12 m y e) 18 m de altura.

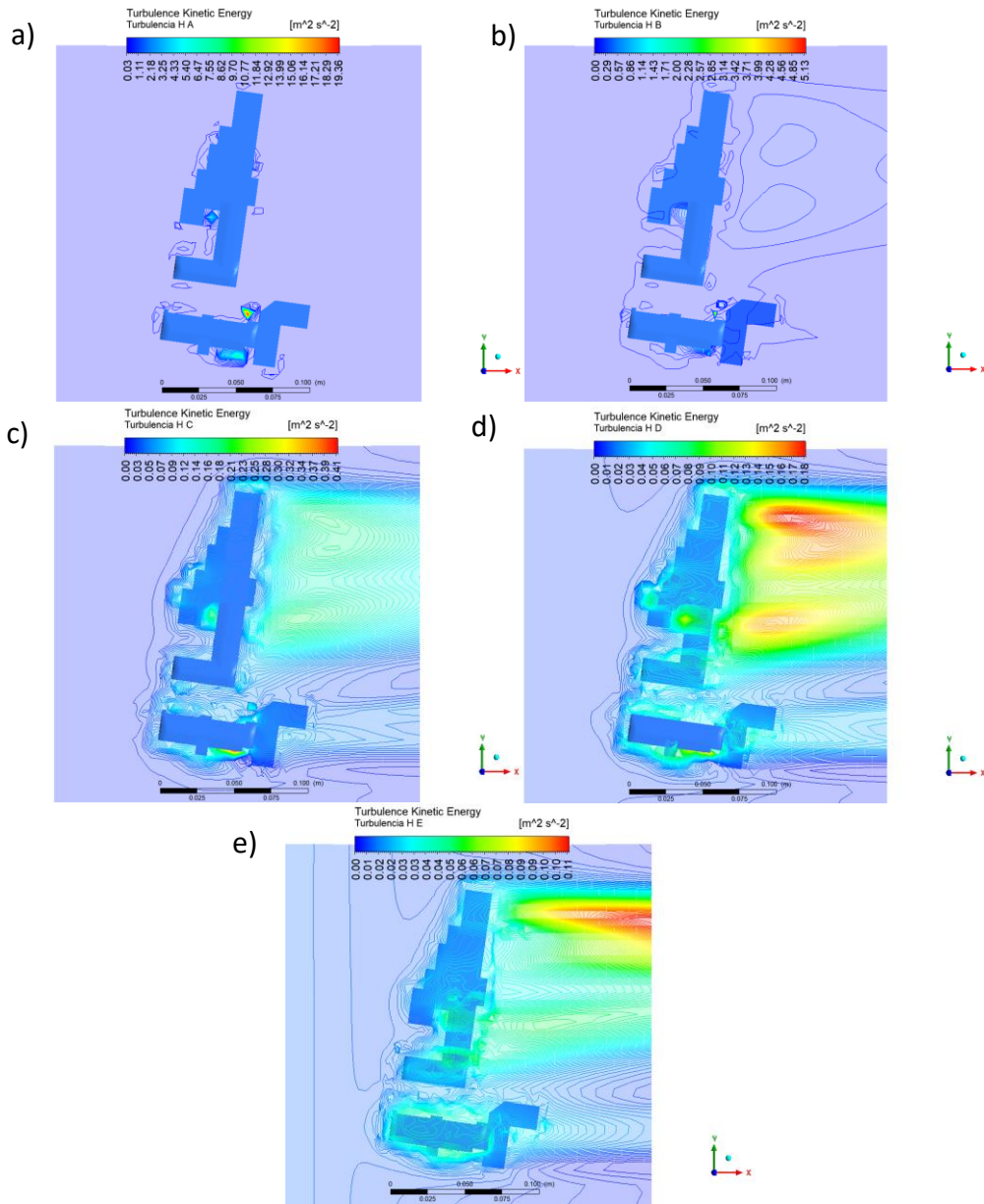


Figura 58

Contornos de intensidad de turbulencia del aire a 2.5 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS a a) 3 m, b) 6 m, c) 9 m, d) 12 m y e) 18 m de altura.

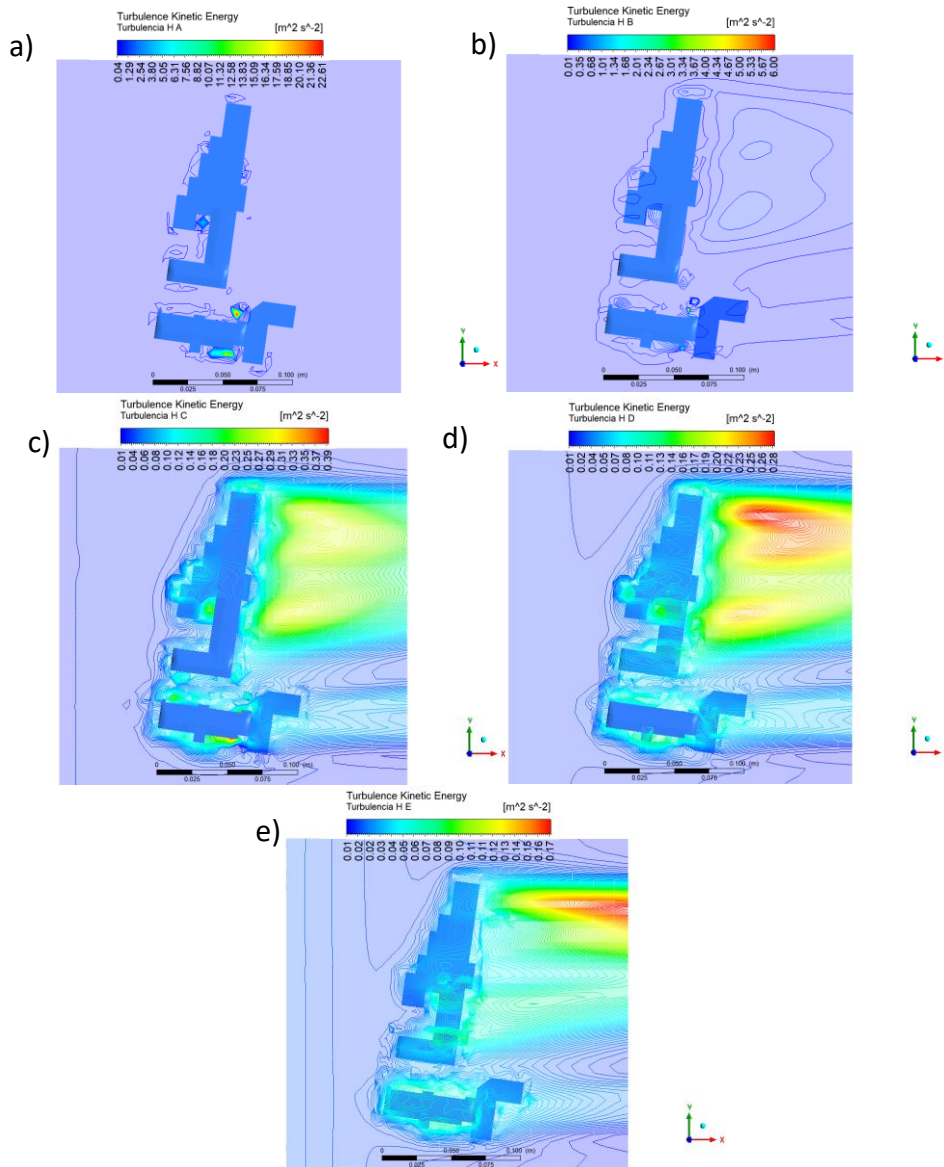


Figura 59

Contornos de intensidad de turbulencia del aire a 1 m/s al interactuar con las infraestructuras en UPS a) 15 m, b) 20 m y c) 30 m de altura.

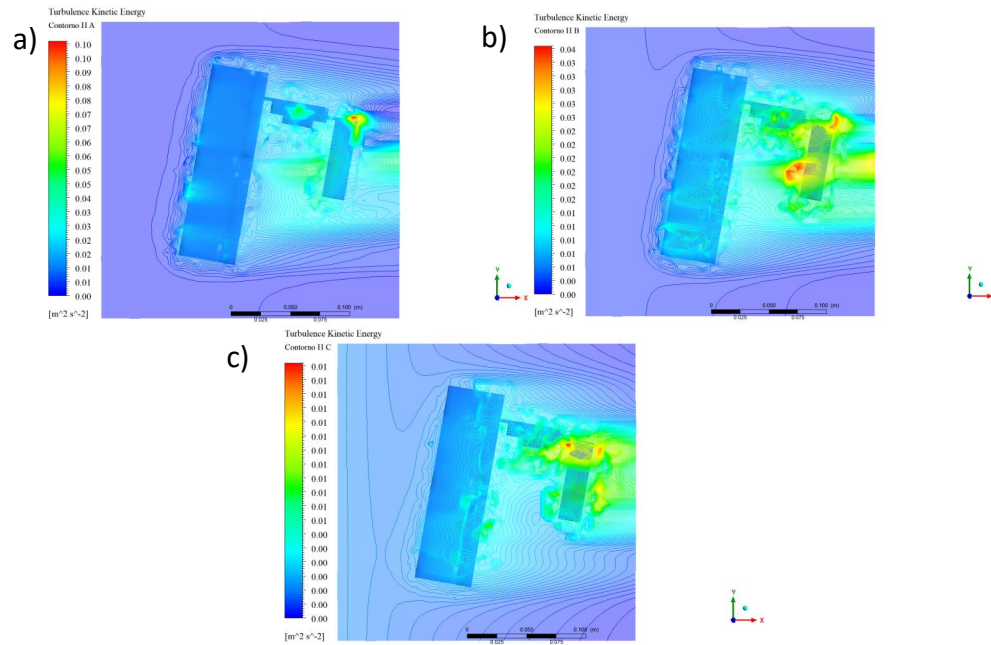


Figura 60

Contornos de intensidad de turbulencia del aire a 1.5 m/s al interactuar con las infraestructuras en UPS a) 15 m, b) 20 m y c) 30 m de altura.

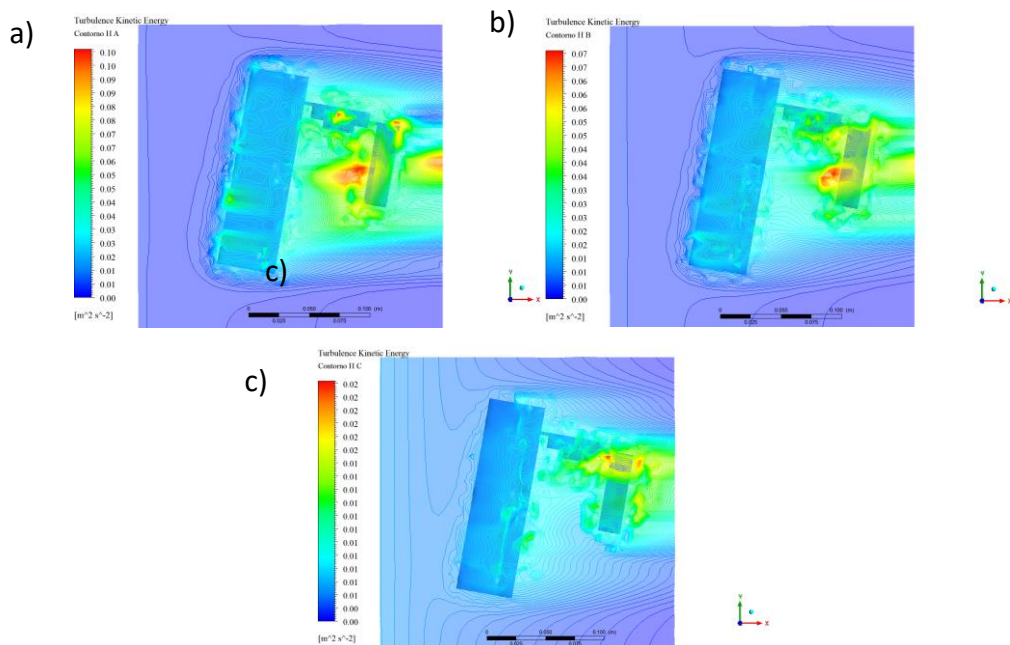


Figura 61

Contornos de intensidad de turbulencia del aire a 2 m/s al interactuar con las infraestructuras en UPS a) 15 m, b) 20 m y c) 30 m de altura.

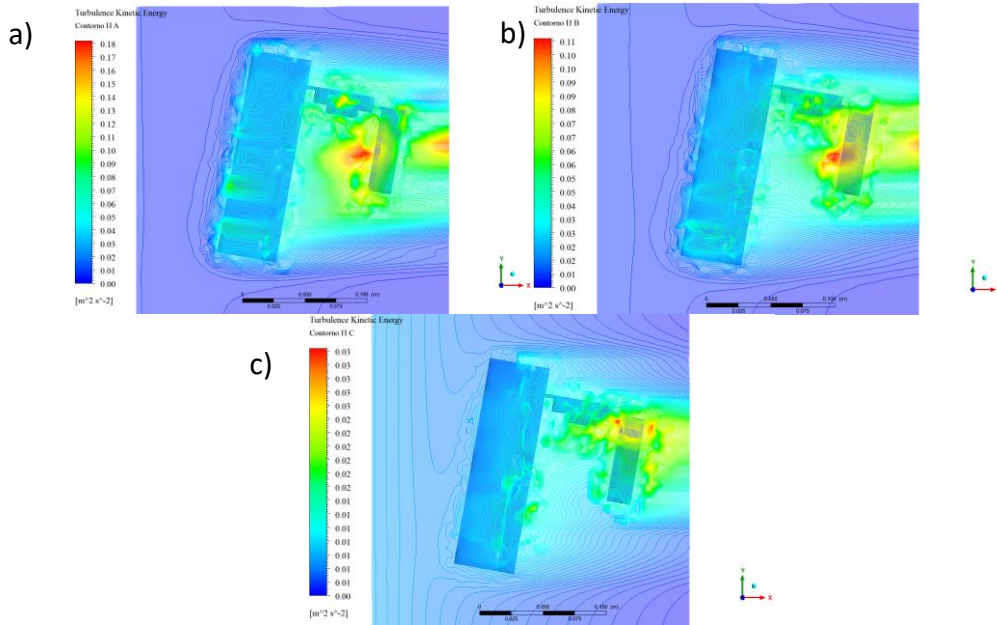
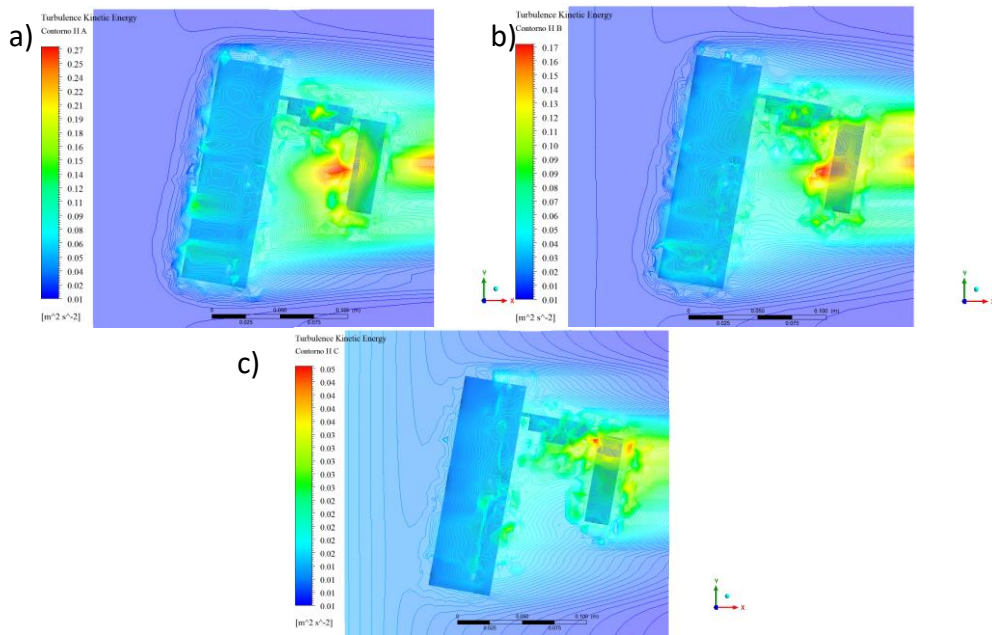


Figura 62

Contornos de intensidad de turbulencia del aire a 2.5 m/s al interactuar con las infraestructuras en UPS a) 15 m, b) 20 m y c) 30 m de altura.



ANEXO III: CONTORNOS DE VELOCIDAD DE VIENTO

El contorno de velocidades de viento del aire a distintos planos verticales se muestra desde la figura 63 a la figura 67 en UETS, y desde la figura 68 a la figura 71 en UPS.

Figura 63

Contornos de la velocidad pronosticada del aire a 0.5 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS en planos verticales a, a) 0 m, b) 10 m, c) 39 m y d) 69 m.

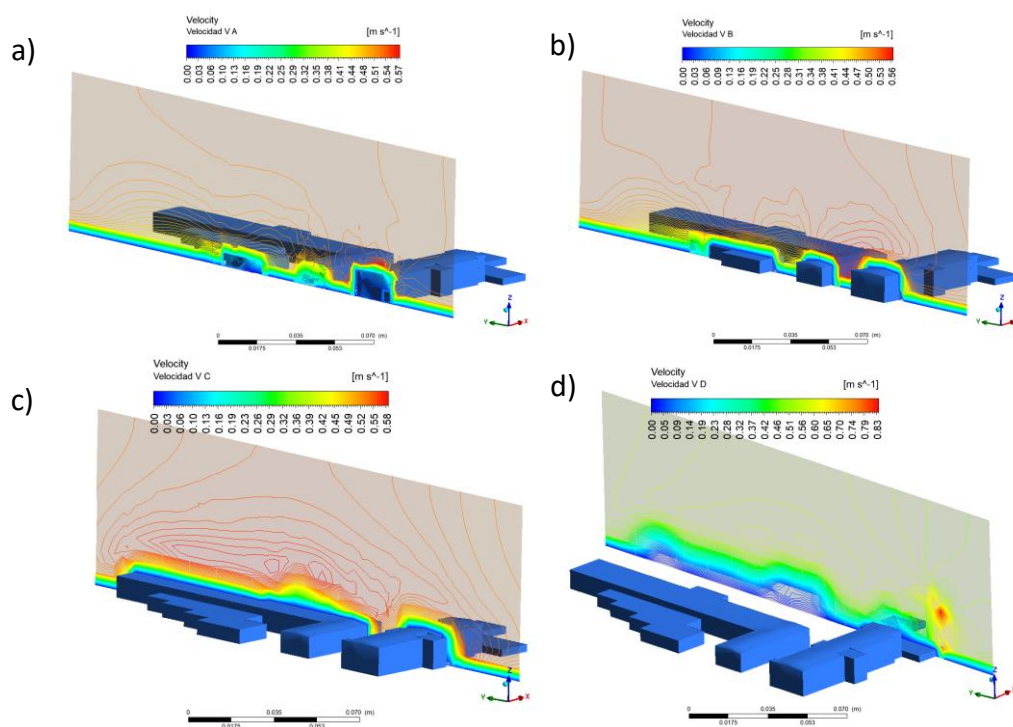


Figura 64

Contornos de la velocidad pronosticada del aire a 1 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS en planos verticales a, a) 0 m, b) 10 m, c) 39 m y d) 69 m.

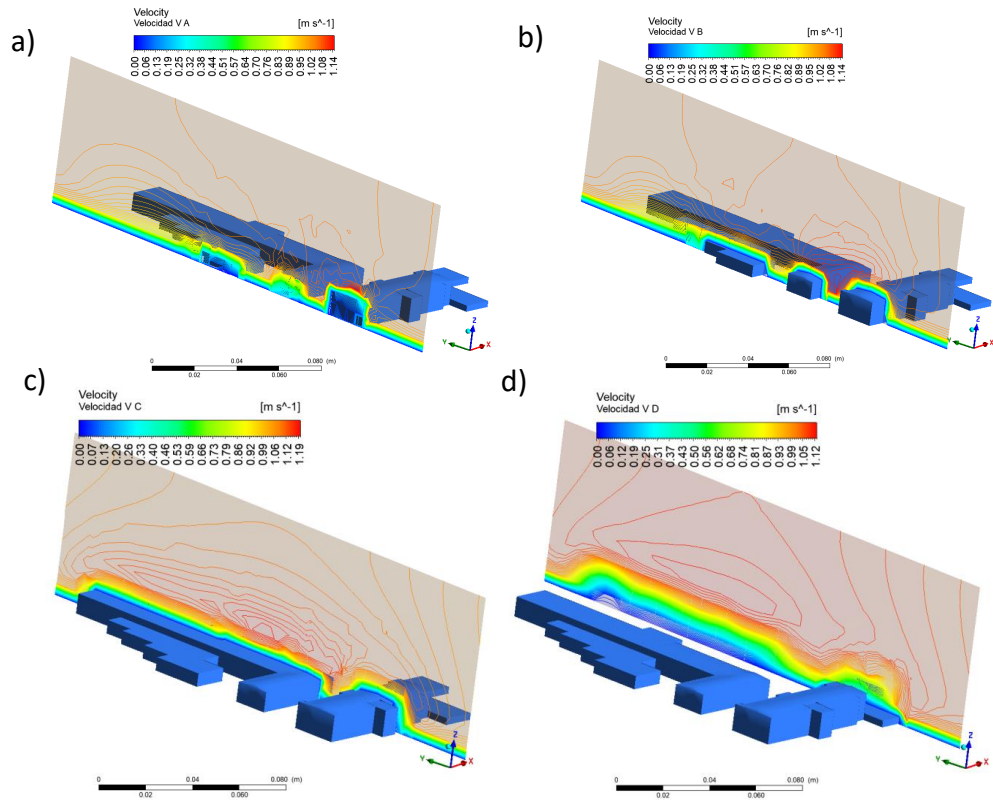


Figura 65

Contornos de la velocidad pronosticada del aire a 1.5 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS en planos verticales a, a) 0 m, b) 10 m, c) 39 m y d) 69 m.

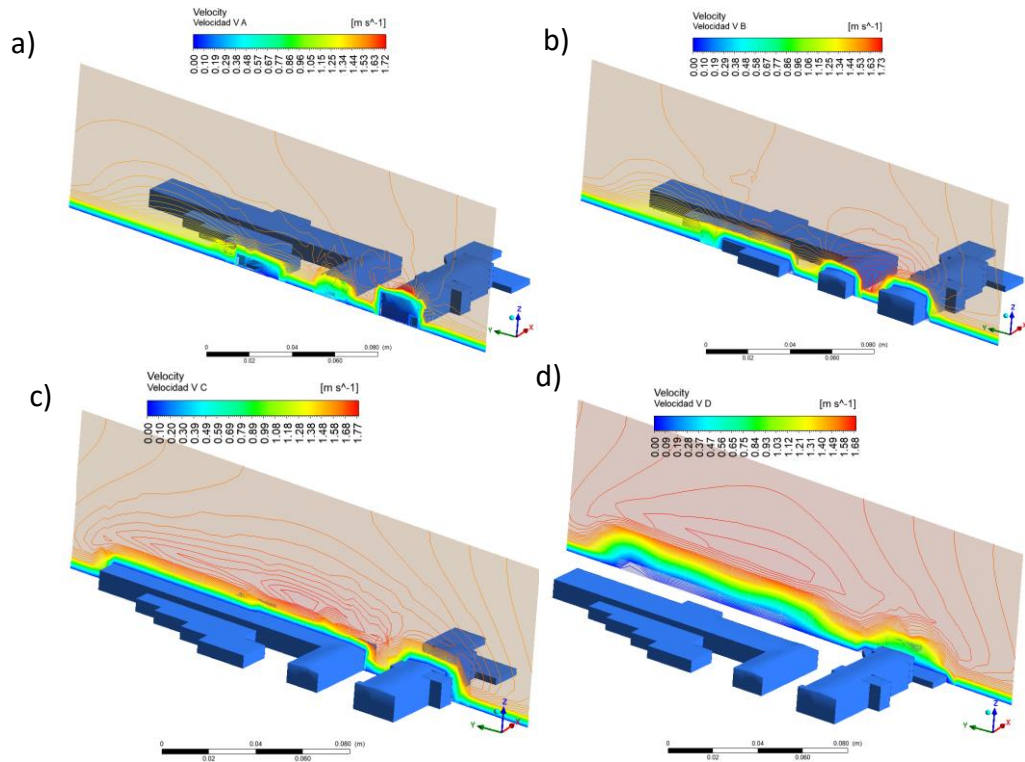


Figura 66

Contornos de la velocidad pronosticada del aire a 2 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS en planos verticales a, a) 0 m, b) 10 m, c) 39 m y d) 69 m.

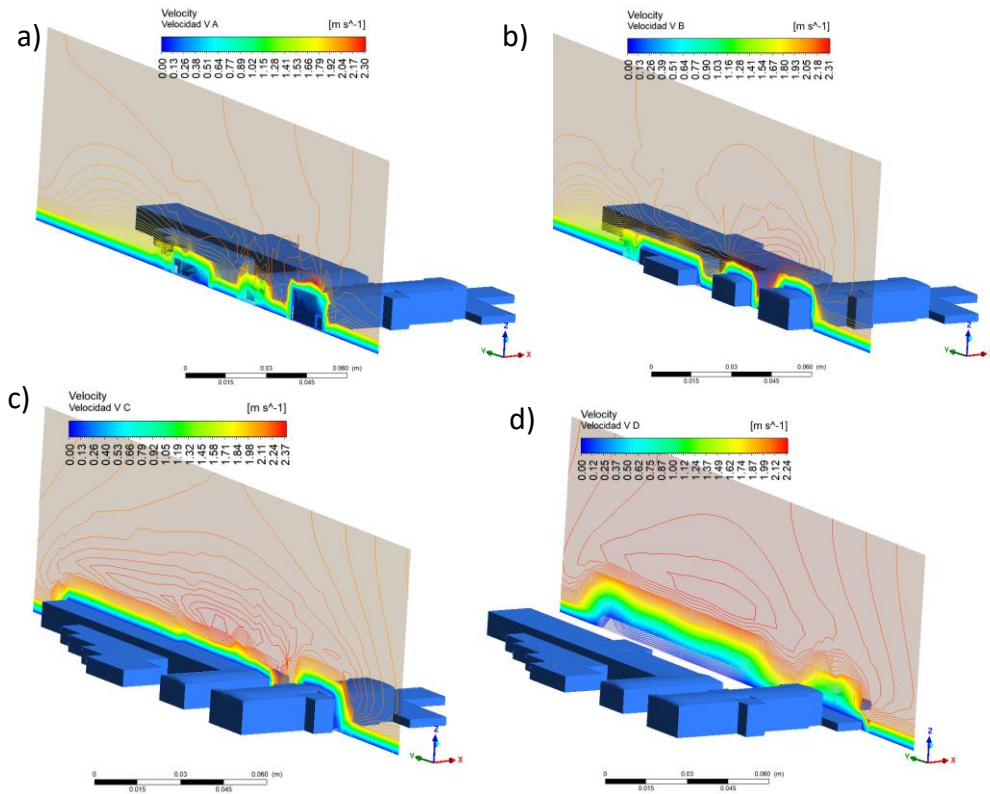


Figura 67

Contornos de la velocidad pronosticada del aire a 2.5 m/s al interactuar con las infraestructuras en UETS en planos verticales a, a) 0 m, b) 10 m, c) 39 m y d) 69 m.

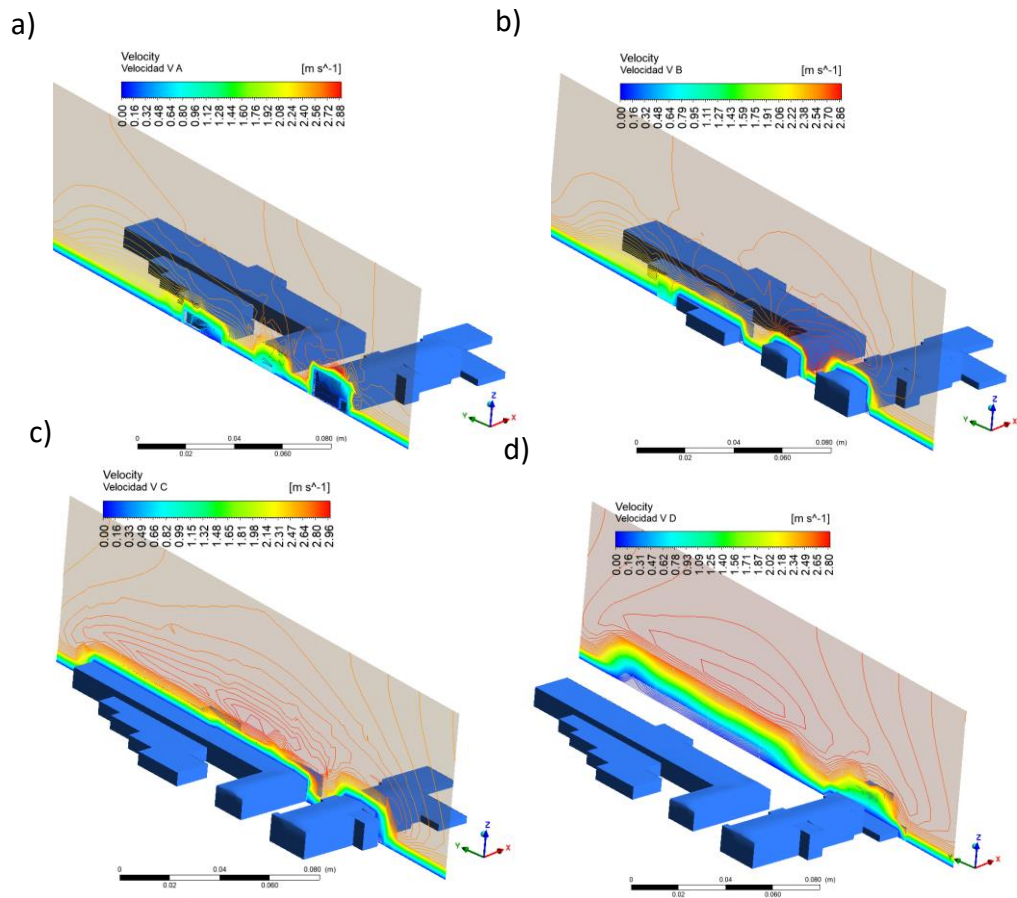


Figura 68

Contornos de velocidad pronosticada del aire a 1 m/s al interactuar con las infraestructuras de UPS en planos verticales a: a) 0 m, b) 30 m, c) 79 m y d) 120 m.

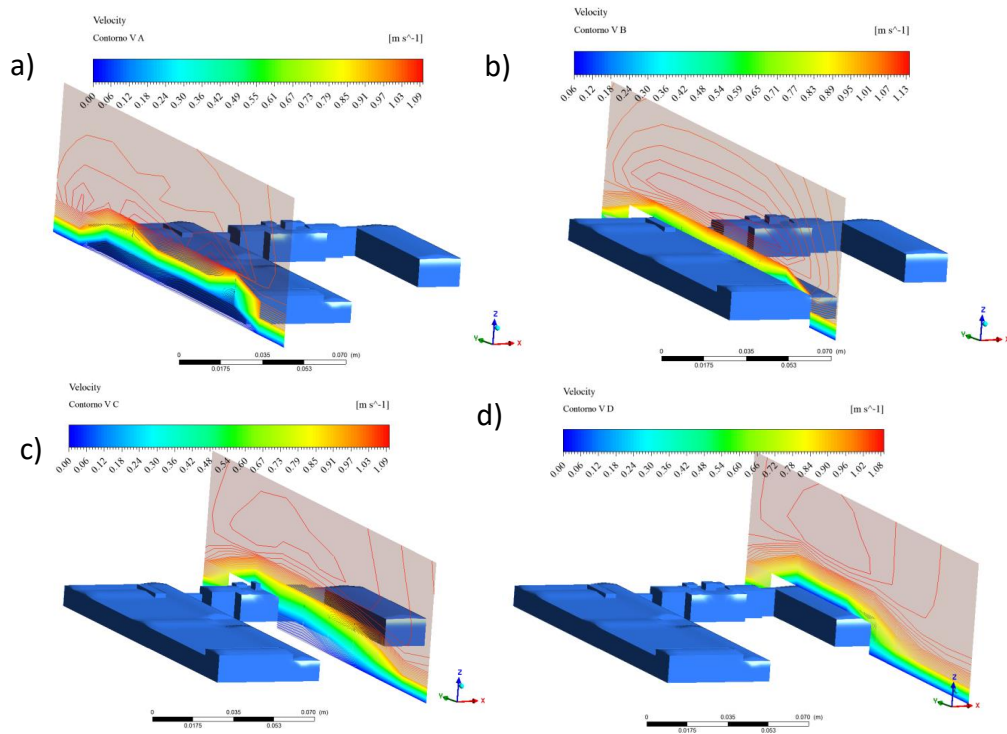


Figura 69

Contornos de velocidad pronosticada del aire a 1.5 m/s al interactuar con las infraestructuras de UPS en planos verticales a: a) 0 m, b) 30 m, c) 79 m y d) 120 m.

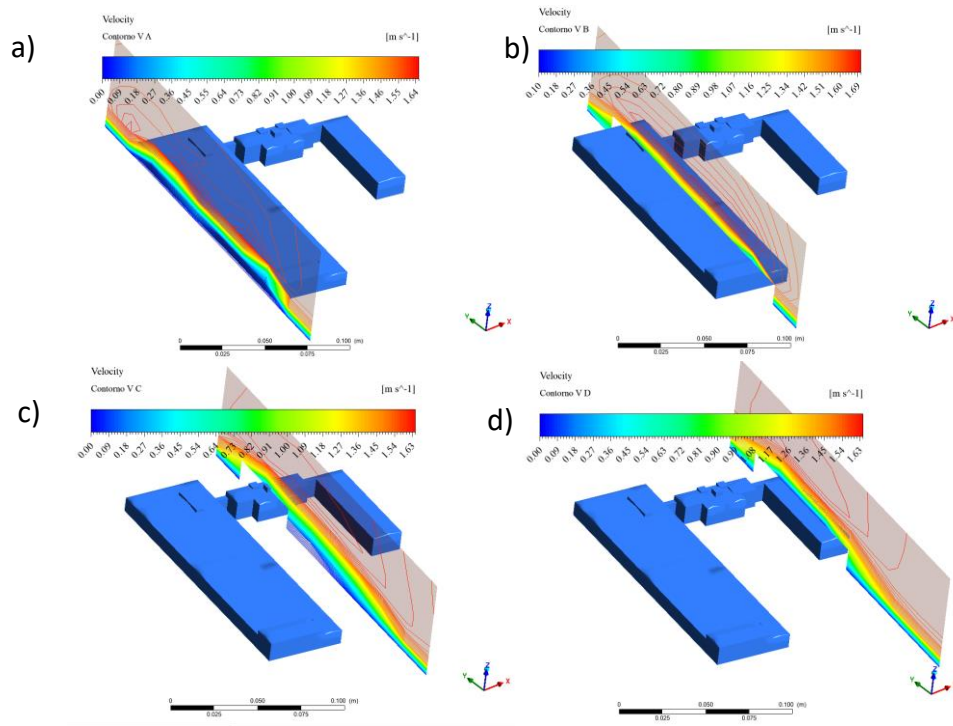


Figura 70

Contornos de velocidad pronosticada del aire a 2 m/s al interactuar con las infraestructuras de UPS en planos verticales a: a) 0 m, b) 30 m, c) 79 m y d) 120 m.

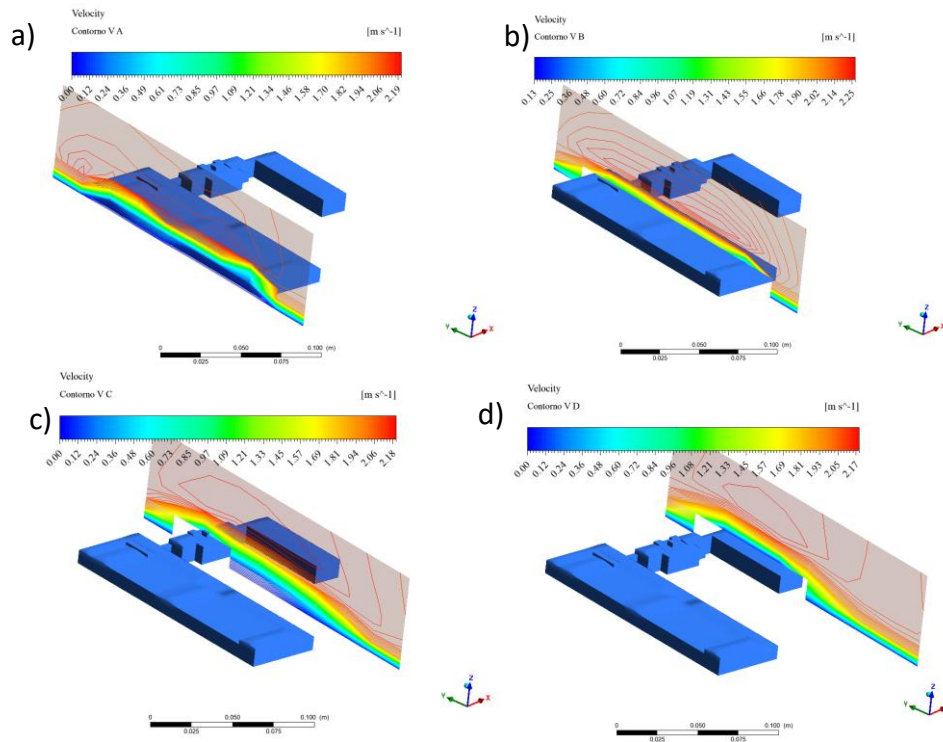
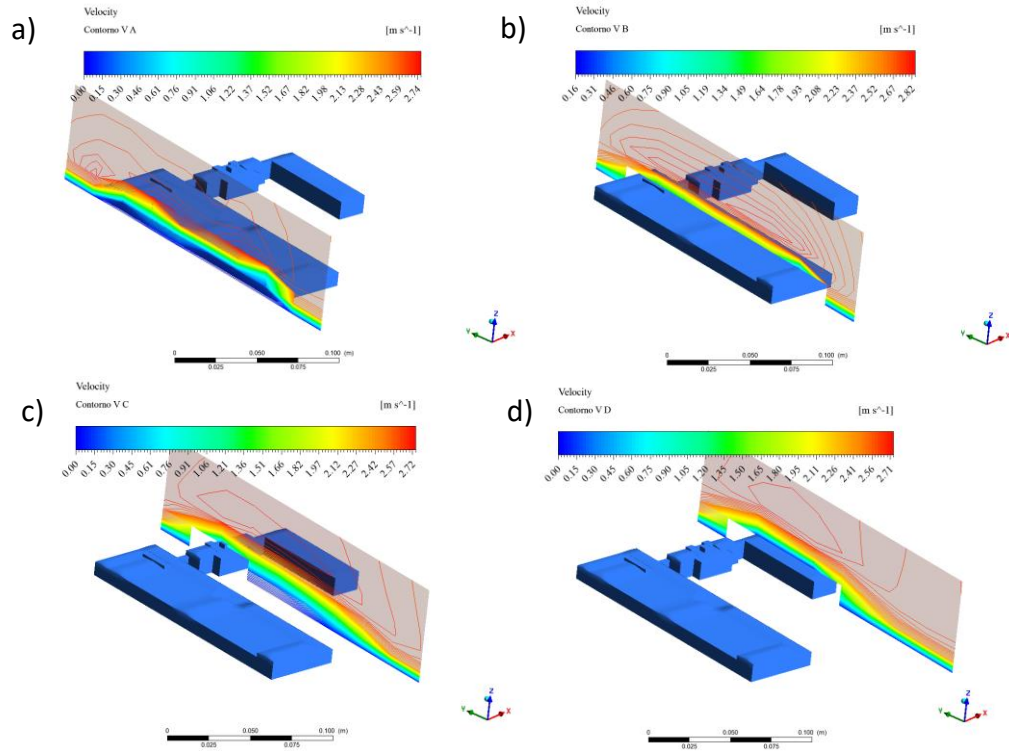


Figura 71

Contornos de velocidad pronosticada del aire a 2.5 m/s al interactuar con las infraestructuras de UPS en planos verticales a: a) 0 m, b) 30 m, c) 79 m y d) 120 m.

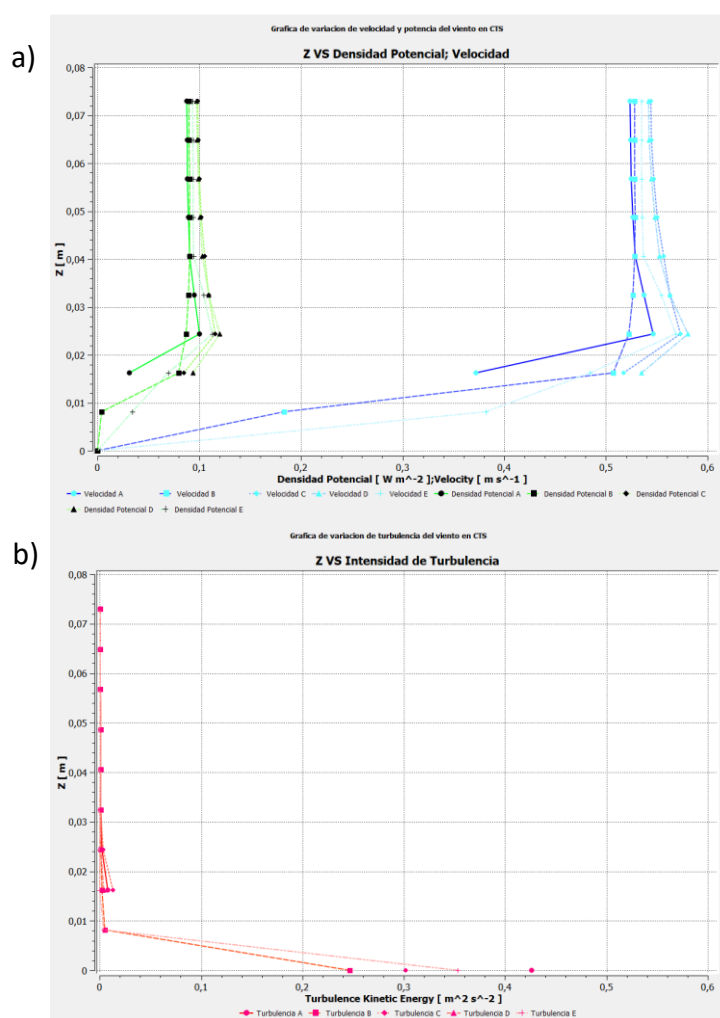


ANEXO IV: EVALUACIÓN DEL SITIO DE MONTAJE DEL AEROGENERADOR

Se evaluó el sitio de montaje del aerogenerador, a partir de la densidad potencial, velocidad e intensidad de turbulencia. Se muestra desde la figura 72 a la figura 76 en UETS, y desde la figura 77 a la figura 80 en UPS.

Figura 72

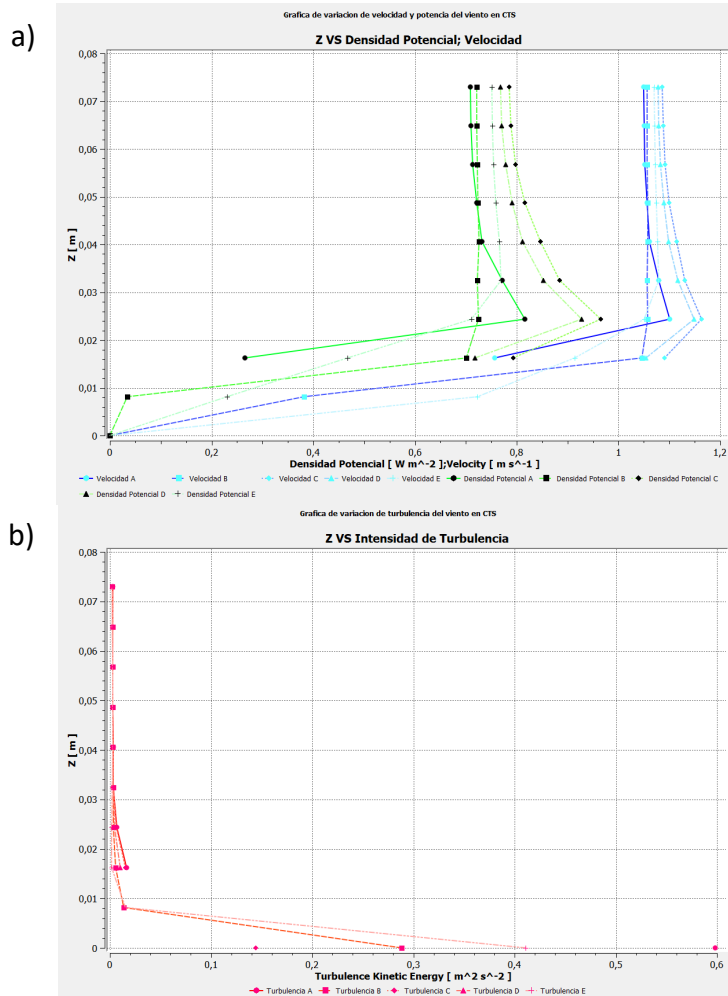
Velocidad e intensidad de turbulencia a 0.5 m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UETS.



Nota. Velocidad e intensidad de turbulencia para los distintos sitios para montaje del aerogenerador. En la parte superior, se muestra el perfil de velocidades. En la parte inferior, se muestra el perfil de intensidad de turbulencia.

Figura 73

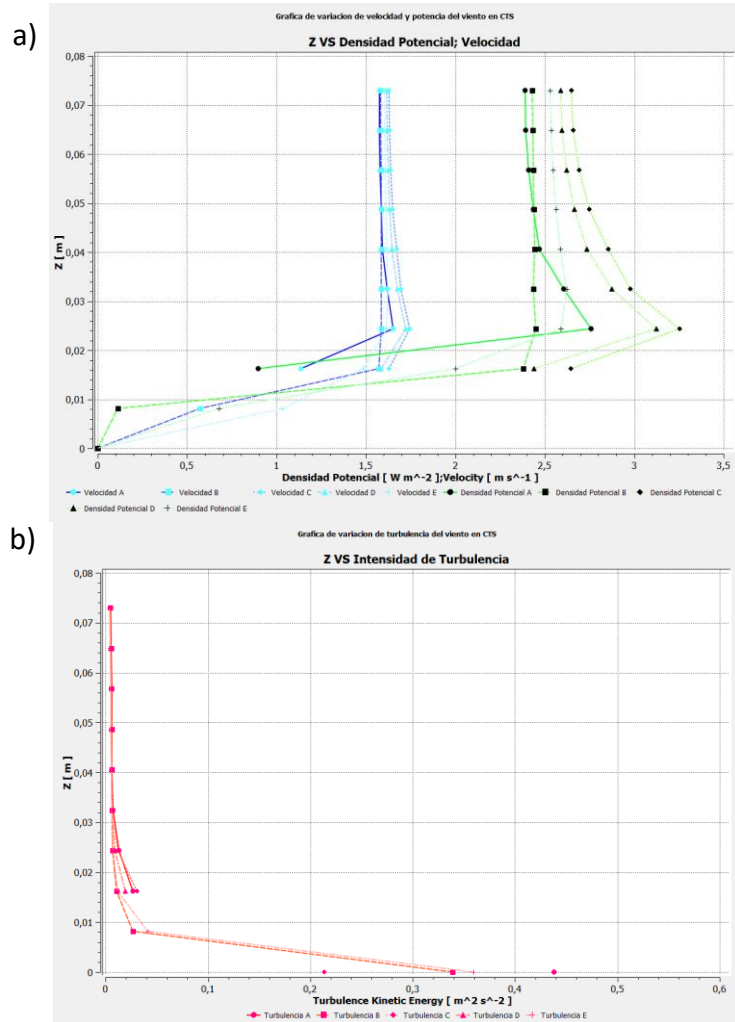
Velocidad e intensidad de turbulencia a 1 m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UETS.



Nota. Velocidad e intensidad de turbulencia para los distintos sitios para montaje del aerogenerador. En la parte superior, se muestra el perfil de velocidades. En la parte inferior, se muestra el perfil de intensidad de turbulencia.

Figura 74

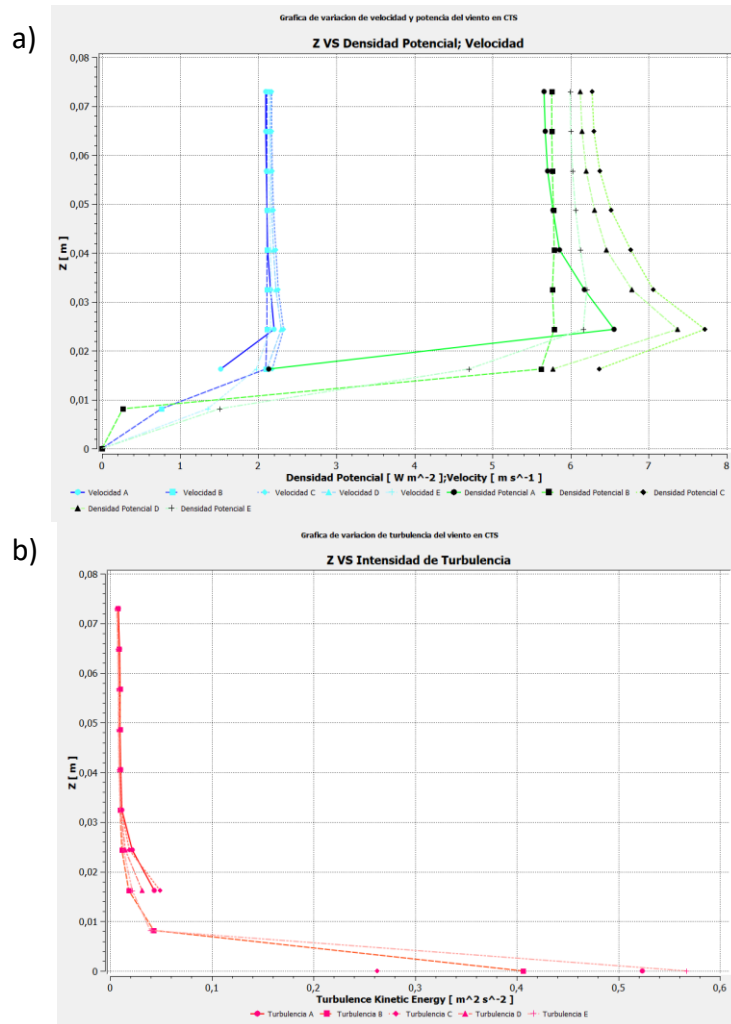
Velocidad e intensidad de turbulencia a 1.5 m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UETS.



Nota. Velocidad e intensidad de turbulencia para los distintos sitios para montaje del aerogenerador. En la parte superior, se muestra el perfil de velocidades. En la parte inferior, se muestra el perfil de intensidad de turbulencia.

Figura 75

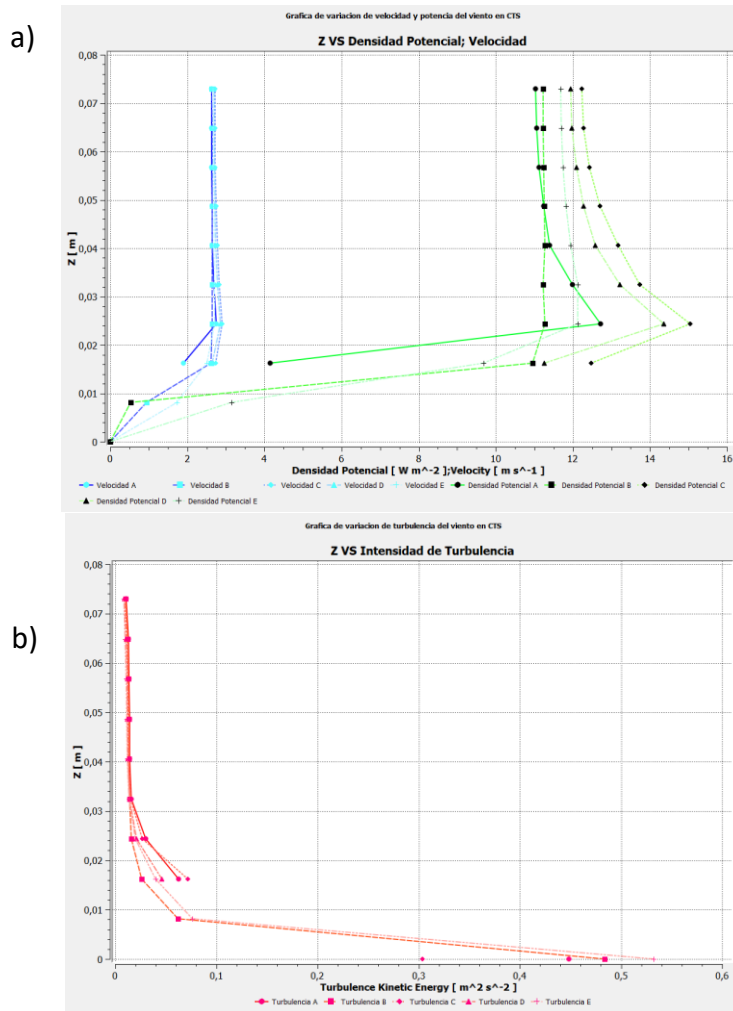
Velocidad e intensidad de turbulencia a 2 m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UETS.



Nota. Velocidad e intensidad de turbulencia para los distintos sitios para montaje del aerogenerador. En la parte superior, se muestra el perfil de velocidades. En la parte inferior, se muestra el perfil de intensidad de turbulencia.

Figura 76

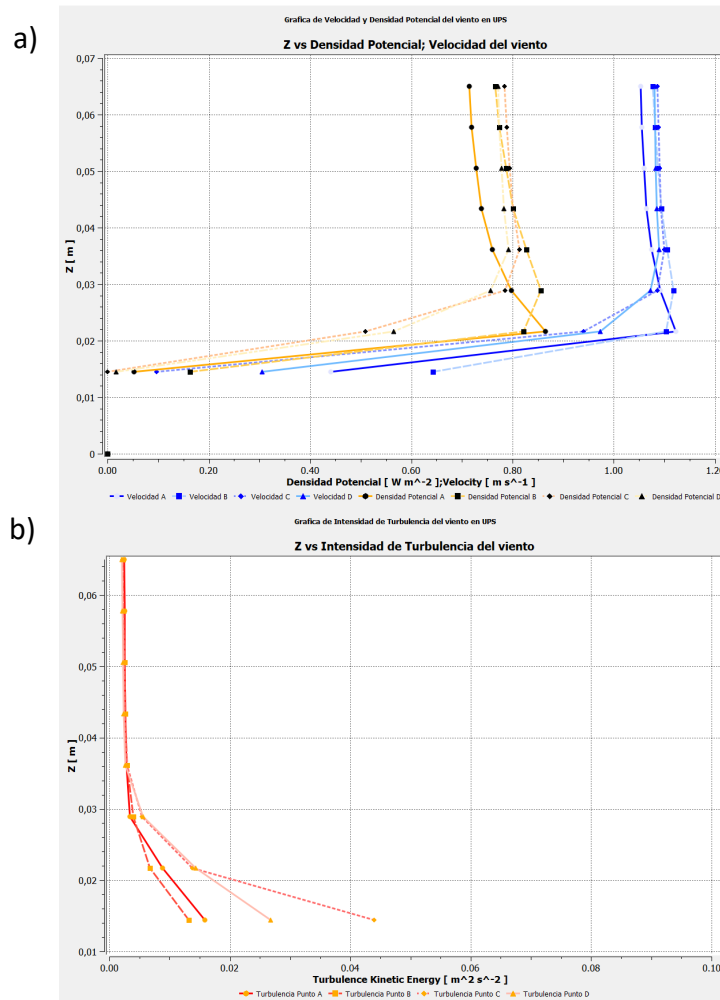
Velocidad e intensidad de turbulencia a 2.5 m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UETS.



Nota. Velocidad e intensidad de turbulencia para los distintos sitios para montaje del aerogenerador. En la parte superior, se muestra el perfil de velocidades. En la parte inferior, se muestra el perfil de intensidad de turbulencia.

Figura 77

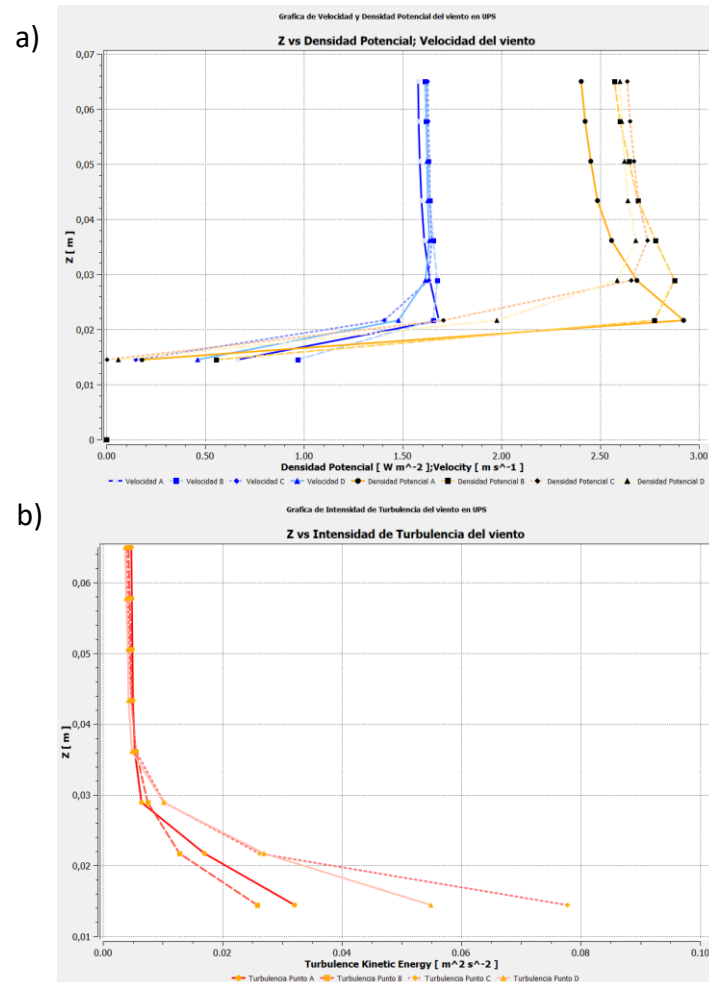
Velocidad e intensidad de turbulencia a 1 m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UPS.



Nota. Velocidad e intensidad de turbulencia para los distintos sitios para montaje del aerogenerador. En la parte superior, se muestra el perfil de velocidades. En la parte inferior, se muestra el perfil de intensidad de turbulencia.

Figura 78

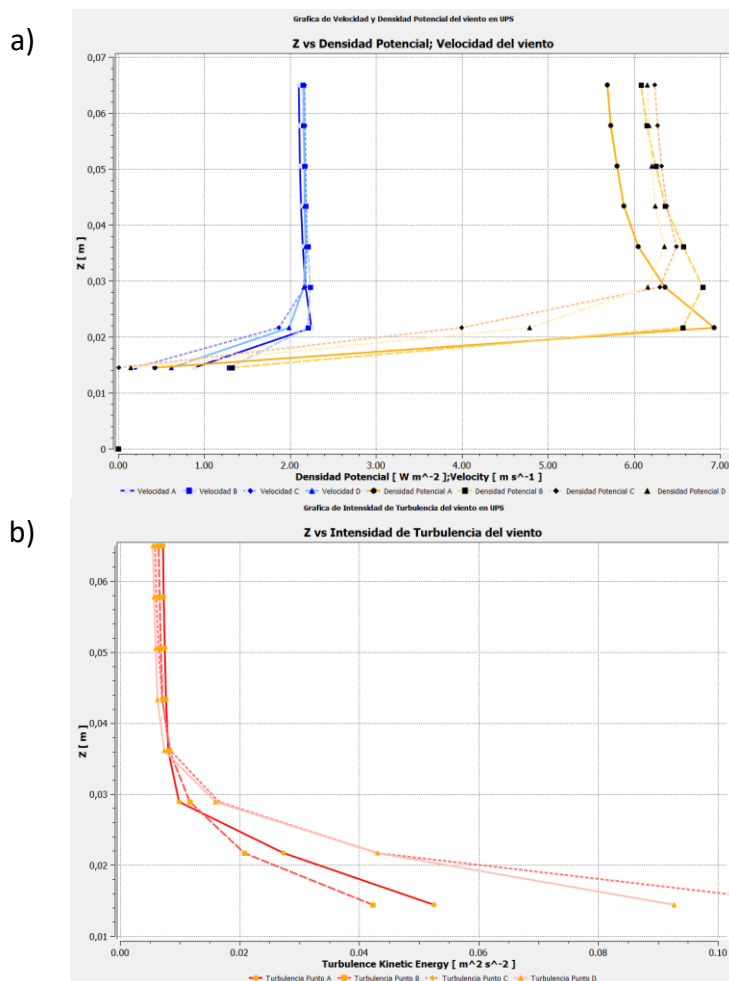
Velocidad e intensidad de turbulencia a 1.5 m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UPS.



Nota. Velocidad e intensidad de turbulencia para los distintos sitios para montaje del aerogenerador. En la parte superior, se muestra el perfil de velocidades. En la parte inferior, se muestra el perfil de intensidad de turbulencia.

Figura 79

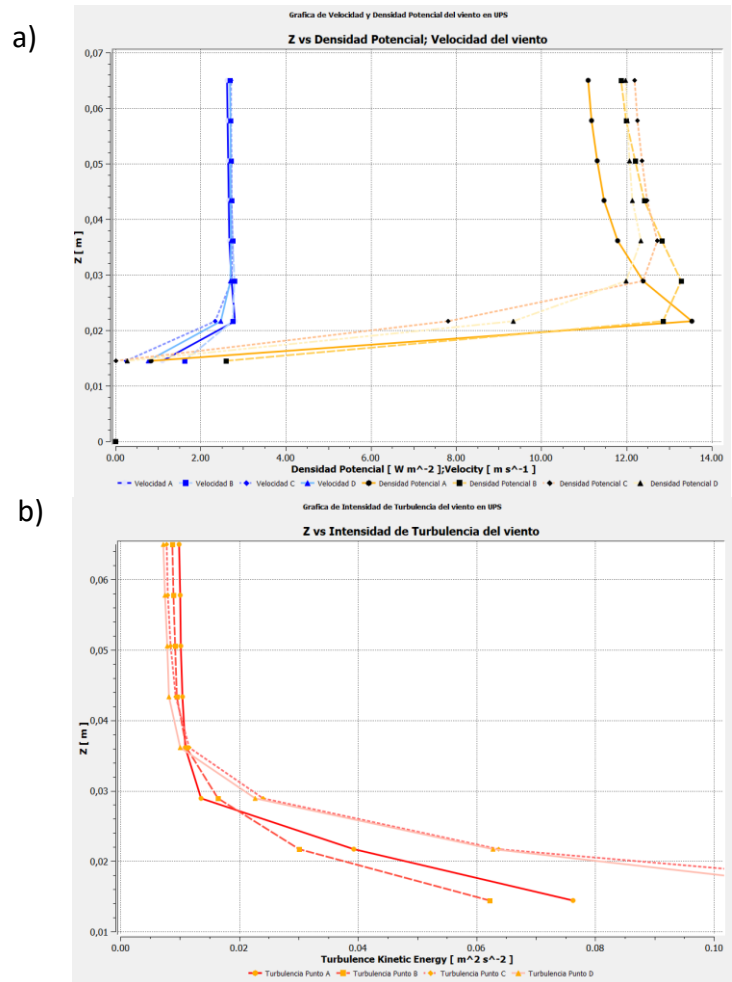
Velocidad e intensidad de turbulencia a 2 m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UPS.



Nota. Velocidad e intensidad de turbulencia para los distintos sitios para montaje del aerogenerador. En la parte superior, se muestra el perfil de velocidades. En la parte inferior, se muestra el perfil de intensidad de turbulencia.

Figura 80

Velocidad e intensidad de turbulencia a 2.5 m/s sobre el techo de los edificios objetivo en UPS.



Nota. Velocidad e intensidad de turbulencia para los distintos sitios para montaje del aerogenerador. En la parte superior, se muestra el perfil de velocidades. En la parte inferior, se muestra el perfil de intensidad de turbulencia.