

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



TESIS

**“METODOLOGÍA DE POSICIONAMIENTO ÓPTIMO DE
AEROGENERADORES URBANOS PARA REDUCIR SUS COSTOS DE
ENERGÍA”**

**PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN CIENCIAS CON
MENCIÓN EN ENERGÉTICA**

ELABORADO POR:

MSc. CHRISTIAN VLADIMIR RODRIGUEZ DÍAZ

ASESORES:

Dr. PERCY ALBERTO RÍOS VILLACORTA Dr. JAIME EULOGIO LUYO KUONG

LIMA, PERÚ

2024

Dedicatoria

A toda mi familia por su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores Dr. Alberto Ríos y Dr. Jaime Luyo por sus consejos durante la elaboración de la presente tesis.

Un especial agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) y al Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT), instituciones que hicieron posible mi participación como becario en el presente programa doctoral (Convenio N° 207-2015-FONDECYT).

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
ÍNDICE DE CONTENIDO	III
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE ANEXOS	VIII
NOMENCLATURA	IX
RESUMEN.....	XII
PALABRAS CLAVE	XII
ABSTRACT	XIII
KEYWORDS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XIV
 CAPÍTULO I.....	 1
ASPECTOS METODOLÓGICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.1. ESQUEMA DE TESIS	1
1.2. REALIDAD PROBLEMÁTICA	2
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	5
1.4. OBJETIVOS, HIPÓTESIS Y VARIABLES DE INVESTIGACIÓN	6
1.4.1. OBJETIVOS.....	6
1.4.2. HIPÓTESIS	6
1.4.3. VARIABLES	6
1.4.3.1. VARIABLE INDEPENDIENTE	6
1.4.3.2. VARIABLE DEPENDIENTE	7
1.5. ARTÍCULOS ACEPTADOS Y PUBLICADOS	7
1.5.1. PAPER 1: REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA SOBRE AEROGENERADORES URBANOS .	7
1.5.2. PAPER 2: VALIDACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS DE UN EDIFICIO Y UN AEROGENERADOR	8
1.5.3. PAPER 3: METODOLOGÍA DE POSICIONAMIENTO DE AEROGENERADORES URBANOS	8
1.5.4. CONEXIÓN ENTRE LOS PAPERS	8
1.6. APORTES DE LA TESIS.....	9
1.7. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	12
1.8. ALCANCE	15
 CAPÍTULO II.....	 16
REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA DEL DISEÑO DE AEROGENERADORES URBANOS USANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	16
2.1. INTRODUCCIÓN	16
2.2. METODOLOGÍA	21
2.2.1. ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA	21
2.2.2. CRITERIOS DE INCLUSIÓN	21
2.2.3. SELECCIÓN DE ESTUDIOS	22

2.2.4.	EXTRACCIÓN Y SÍNTESIS DE DATOS.....	22
2.3.	RESULTADOS.....	22
2.3.1.	INFORMACIÓN GENERAL	22
2.3.2.	PREGUNTA 1: ETAPAS DEL DISEÑO CFD	25
2.3.3.	PREGUNTA 2: MODELOS Y MÉTODOS.....	32
2.3.4.	PREGUNTA 3: VARIABLES PRINCIPALES.....	36
2.3.5.	PREGUNTA 4: TENDENCIAS DE INVESTIGACIÓN	38
2.3.5.1.	AEROGENERADORES MONTADOS EN EDIFICIOS.....	39
2.3.5.2.	AEROGENERADORES INTEGRADOS EN EDIFICIOS.....	50
CAPÍTULO III		55
VALIDACIÓN BASADA EN DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL DE UN EDIFICIO DE GRAN ALTURA Y UN AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL USANDO DOS MODELOS DE TURBULENCIA		55
3.1.	INTRODUCCIÓN	55
3.2.	MODELAMIENTO	66
3.2.1.	EDIFICIO	68
3.2.1.1.	ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA	68
3.2.1.2.	MÉTRICAS COMPARATIVAS	71
3.2.2.	AEROGENERADOR.....	72
3.2.2.1.	ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA	72
3.2.2.2.	MÉTRICAS COMPARATIVAS	74
3.3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	75
3.3.1.	EDIFICIO	75
3.3.1.1.	ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA	75
3.3.1.2.	MÉTRICAS COMPARATIVAS	78
3.3.2.	AEROGENERADOR.....	82
3.3.2.1.	ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA	82
3.3.2.2.	MÉTRICAS COMPARATIVAS	85
CAPÍTULO IV		123
METODOLOGÍA PARA EL POSICIONAMIENTO ÓPTIMO DE AEROGENERADORES MONTADOS EN EDIFICIOS USANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL Y ALGORITMOS GENÉTICOS.....		89
4.1.	INTRODUCCIÓN	89
4.2.	METODOLOGÍA	94
4.2.1.	EVALUACIÓN DEL SITIO.....	95
4.2.2.	DATOS DE VIENTO	96
4.2.3.	VALIDACIÓN DE MODELOS	96
4.2.3.1.	EDIFICIO	97
4.2.3.2.	AEROGENERADOR.....	99
4.2.4.	EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO.....	100
4.2.5.	DISEÑO O SELECCIÓN DEL AEROGENERADOR.....	101

4.2.6.	OPTIMIZACIÓN DEL POSICIONAMIENTO	102
4.3.	RESULTADOS.....	104
4.3.1.	EVALUACIÓN DEL SITIO.....	105
4.3.2.	DATOS DE VIENTO	106
4.3.3.	VALIDACIÓN DE MODELOS	108
4.3.3.1.	EDIFICIO	108
4.3.3.2.	AEROGENERADOR.....	109
4.3.4.	EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO.....	111
4.3.5.	DISEÑO O SELECCIÓN DEL AEROGENERADOR.....	113
4.3.6.	OPTIMIZACIÓN DEL POSICIONAMIENTO	114
CAPÍTULO V		119
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		119
5.1.	CONCLUSIONES	119
5.1.1.	CONCLUSIONES DEL PAPER 1	119
5.1.2.	CONCLUSIONES DEL PAPER 2	120
5.1.3.	CONCLUSIONES DEL PAPER 3	121
5.2.	RECOMENDACIONES	122
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		124
ANEXOS.....		137

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE VIENTO DENTRO DE UN AMBIENTE URBANO.....	4
FIGURA 2: POSICIONAMIENTO DEL ROTOR DE UN AEROGENERADOR INSTALADO SOBRE UN EDIFICIO	4
FIGURA 3: DIAGRAMA PRISMA	23
FIGURA 4: ESTUDIOS PRIMARIOS PUBLICADOS POR AÑO.....	24
FIGURA 5: ETAPAS DE DISEÑO DE UN <i>UWT</i>	27
FIGURA 6: MAGNITUD NORMALIZADA DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO: VISTA EN PLANTA A LA ALTURA MEDIA DEL ARREGLO DE CASAS (IZQUIERDA), Y VISTA EN ELEVACIÓN DE UNA CASA (DERECHA)	39
FIGURA 7: LÍNEAS DE FLUJO DE VELOCIDADES ALREDEDOR DEL AEROGENERADOR Y LOS EDIFICIOS	40
FIGURA 8: CONFIGURACIÓN UTILIZADA EN LA INVESTIGACIÓN DE BIANCHI ET AL.....	41
FIGURA 9: LOTTE WORLD TOWER.....	43
FIGURA 10: VECTORES DE VELOCIDAD DEL AEROGENERADOR PROPUESTO POR LI ET AL.	44
FIGURA 11: DETALLES DEL EXPERIMENTO DEL AEROGENERADOR H-DARRIEUS.....	45
FIGURA 12: LÍNEAS DE FLUJO DE VELOCIDAD ALREDEDOR DEL <i>VAWT</i>	46
FIGURA 13: MECANISMO DIFUSOR CON BRIDAS INSTALADO SOBRE LA AZOTEA DE UN EDIFICIO	47
FIGURA 14: METODOLOGÍA PROPUESTA POR ARTEAGA-LÓPEZ ET AL.....	48
FIGURA 15: UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL	49
FIGURA 16: VISTA ILUSTRATIVA DE UN NUEVO <i>BIWT</i>	51
FIGURA 17: DETALLE DEL SISTEMA DOUBLE SKIN FAÇADE	52
FIGURA 18: POTENCIA DE SALIDA Y RPM DEL AEROGENERADOR AMPAIR 300, EN FLUJO LIBRE, Y DENTRO DE UN CONDUCTO	52
FIGURA 19: SISTEMA DOUBLE SKIN FAÇADE	53
FIGURA 20: METODOLOGÍA USADA EN LA VALIDACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS DEL EDIFICIO Y AEROGENERADOR.....	66
FIGURA 21: GEOMETRÍA DEL EDIFICIO DE GRAN ALTURA USADO EN LA VALIDACIÓN	69
FIGURA 22: DOMINIO COMPUTACIONAL USADO EN LAS SIMULACIONES.....	69
FIGURA 23: PERFILES DE U , k Y ε	70
FIGURA 24: SECCIONES VERTICALES ALREDEDOR Y SOBRE EL EDIFICIO PARA COMPARAR LOS RESULTADOS DE U Y k	71
FIGURA 25: GEOMETRÍA DE LOS PERFILES DU 91-W2-250, RISO A1-21 Y NACA 64-418.....	72
FIGURA 26: DETALLES DEL DOMINIO COMPUTACIONAL USADO PARA LA SIMULACIÓN DEL AEROGENERADOR	74
FIGURA 27: PERFILES VERTICALES DE U PARA DISTINTAS POSICIONES. ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA ..	76
FIGURA 28: PERFILES VERTICALES DE k PARA DISTINTAS POSICIONES. ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA ..	77
FIGURA 29: DETALLES DE LA MALLA COARSE. SIMULACIÓN DEL EDIFICIO	78
FIGURA 30: PERFILES VERTICALES DE U PARA DISTINTAS POSICIONES. COMPARACIÓN DE MODELOS DE TURBULENCIA	79

FIGURA 31: PERFILES VERTICALES DE k PARA DISTINTAS POSICIONES. COMPARACIÓN DE MODELOS DE TURBULENCIA	80
FIGURA 32: CONTORNOS DE U EN LA SECCIÓN MEDIA DEL DOMINIO COMPUTACIONAL	81
FIGURA 33: CONTORNOS DE k EN LA SECCIÓN MEDIA DEL DOMINIO COMPUTACIONAL	82
FIGURA 34: DETALLES DE LA MALLA FINA (FINE)	84
FIGURA 35: DISTRIBUCIÓN DEL C_p SOBRE LAS PAREDES DEL ÁLABE EN LAS SECCIONES 25%, 35%, 60%, 82% Y 92% DE SU LONGITUD TOTAL, PARA $U = 10, 15$ Y 24 M/S.....	86
FIGURA 36: CONTORNOS DE PRESIÓN EN LAS POSICIONES 25%, 35%, 60%, 82% Y 92% DEL ÁLABE, PARA $U = 10$ M/S.....	88
FIGURA 37: METODOLOGÍA DE POSICIONAMIENTO ÓPTIMO DE AEROGENERADORES URBANOS.....	95
FIGURA 38: DOMINIO COMPUTACIONAL PARA LA SIMULACIÓN DEL EDIFICIO.....	98
FIGURA 39: GEOMETRÍA DEL ÁLABE DEL AEROGENERADOR MEXICO	99
FIGURA 40: COMPORTAMIENTO DEL VIENTO EN UN ENTORNO URBANO	101
FIGURA 41: DISPOSICIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL POSICIONAMIENTO	103
FIGURA 42: ESPACIO DISPONIBLE PARA LA INSTALACIÓN DEL AEROGENERADOR MEXICO	105
FIGURA 43: ESPACIO ALTERNATIVO PARA LA INSTALACIÓN DE AEROGENERADORES	106
FIGURA 44: VELOCIDADES PROMEDIO DIARIAS DEL VIENTO.....	106
FIGURA 45: ROSA DE VIENTO CONSTRUIDA CON LOS DATOS DE VIENTO DE LA ESTACIÓN CAMPO DE MARTE	107
FIGURA 46: PERFILES VERTICALES DE U Y k . ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA.....	109
FIGURA 47: DETALLES DE LA MALLA MEDIUM (EDIFICIO).....	110
FIGURA 48: REPRESENTACIÓN DE LAS DIRECCIONES DE VIENTO SIMULADAS EN LA EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO.....	111
FIGURA 49: PLANOS USADOS PARA ANALIZAR LAS VELOCIDADES DE VIENTO.....	112
FIGURA 50: VELOCIDADES DEL VIENTO SUPERIORES A 3 M/S (ROJO) Y MENORES (VERDE) ENCIMA DE LA AZOTEA DEL EDIFICIO	112
FIGURA 51: RESTRICCIONES GEOMÉTRICAS SOBRE LA AZOTEA DEL EDIFICIO.....	113
FIGURA 52: CURVA DE POTENCIA DEL AEROGENERADOR MEXICO	114
FIGURA 53: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN.....	115
FIGURA 54: VALORES DE LA FUNCIÓN OBJETIVO DURANTE EL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN	115
FIGURA 55: POBLACIÓN INICIAL Y MEJOR INDIVIDUO DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN.....	116
FIGURA 56: PLANO USADO EN EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL COSTO DE LA ENERGÍA	117
FIGURA 57: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL COSTO DE LA ENERGÍA AL VARIAR LOS FACTORES DE REFUERZO DEL EDIFICIO	118

LISTA DE TABLAS

TABLA 1: CARACTERÍSTICAS DE AEROGENERADORES COMERCIALES INSTALADOS EN AMBIENTES URBANOS	3
TABLA 2: RANKING DE CITACIONES	25
TABLA 3: ETAPAS DE DISEÑO DE LOS <i>UWT</i> s INCLUIDAS EN LOS ESTUDIOS PRIMARIOS	30
TABLA 4: MODELOS Y MÉTODOS USADOS EN LOS ESTUDIOS PRIMARIOS	34
TABLA 5: DOMINIO COMPUTACIONAL Y CARACTERÍSTICAS DE LAS MALLAS	36
TABLA 6: VARIABLES PRINCIPALES ANALIZADAS EN LOS ESTUDIOS PRIMARIOS	38
TABLA 7: ESTUDIOS DE VALIDACIÓN NUMÉRICA DE EDIFICIOS DE GRAN ALTURA	58
TABLA 8: ESTUDIOS DE VALIDACIÓN NUMÉRICA DE AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL	62
TABLA 9: CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁLABES DEL AEROGENERADOR MEXICO	73
TABLA 10: <i>HR</i> Y <i>NMSE</i> DEL EDIFICIO	81
TABLA 11: COMPARACIÓN DE LAS FUERZAS DE EMPUJE Y TORQUE PARA UN <i>U</i> DE 10 M/S. ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA. MODELO DE TURBULENCIA REALIZABLE $k - \varepsilon$	82
TABLA 12: COMPARACIÓN DE LAS FUERZAS DE EMPUJE Y TORQUE PARA UN <i>U</i> DE 10 M/S. ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA. MODELO DE TURBULENCIA SST $k - \omega$	83
TABLA 13: <i>HR</i> Y <i>MSE</i> DEL AEROGENERADOR MEXICO EN DISTINTAS SECCIONES.....	87
TABLA 14: RESUMEN DEL <i>HR</i> Y <i>MSE</i> DEL AEROGENERADOR MEXICO	87
TABLA 15: PARÁMETROS GENERALES DE LAS SIMULACIONES CFD	97
TABLA 16: PARÁMETROS CFD PARA LA SIMULACIÓN DEL EDIFICIO.....	98
TABLA 17: PARÁMETROS CFD PARA LA SIMULACIÓN DEL AEROGENERADOR	100
TABLA 18: PARÁMETROS DEL GA	104
TABLA 19: OCURRENCIA DE VELOCIDADES DE VIENTO (%)	108

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	137
ANEXO 2: MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN.....	139

NOMENCLATURA

α = Coeficiente de Hellman (-).
 β = Ángulo de giro ($^{\circ}$).
 Γ_k = Difusividad efectiva de k (kg/m.s).
 Γ_{ω} = Difusividad efectiva de ω (kg/m.s).
 ε = Disipación turbulenta (m^2/s^3).
 θ = Ángulo de paso de sección ($^{\circ}$).
 μ = Viscosidad dinámica (kg/m.s).
 μ_t = Viscosidad turbulenta (kg/m.s).
 ρ = Densidad (kg/m^3).
 σ = Solidez (-).
 $\sigma_{\varepsilon}, \sigma_k, C_{\varepsilon 1}$ y $C_{\varepsilon 2}$ = Coeficientes de cierre del modelo Realizable $k - \varepsilon$ (-).
 ω = Tasa de disipación específica (1/s).
 $\dot{\omega}$ = Velocidad de rotación (rad/s).
 $1D$ = Unidimensional.
 $2D$ = Dos dimensiones.
 $3D$ = Tres dimensiones.
 A_f = Factor de amplificación de velocidad (-).
 BEM = Momento del elemento de pala.
 $BIWT$ = Aerogenerador integrado con el edificio.
 $BMWT$ = Aerogenerador montado sobre el edificio.
 C = Circular.
 C_b = Costo base (\$).
 C_n = Coeficiente de fuerza normal (-).
 C_p = Coeficiente de presión (-).
 C_P = Coeficiente de potencia (-).
 C_T = Coeficiente de torque (-).
 C_t = Coeficiente de fuerza tangencial (-).
 C_z = Costo por altura de la torre (\$/m).
 CFD = Dinámica de fluidos computacional.
 CoE = Costo de la energía (\$/kWh).
 CY = Cilíndrico.
 D = Desviación o error (%).
 D_b y W_b = Valores de umbral para el Hit Rate (-).
 D_{ω} = Difusión cruzada ($\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}^2$).
 DES = Detached Eddy Simulation.

DNS = Direct Numerical Simulation.
 ER = Error Rate (%).
 EAC = Energía anual calculada (kWh).
 EAM = Energía anual medida (kWh).
 F = Factor de refuerzo del edificio (-).
 F_n = Fuerza normal (N).
 F_t = Fuerza tangencial (N).
 $FAC2$ = Factor of two of observations (-).
 FB = Fractional Bias (-).
 GA = Algoritmo genético.
 H = Altura del edificio (m).
 $HAWT$ = Aerogenerador de eje horizontal.
 HBD = Alta densidad de edificios.
 HR = Hit Rate (-).
 k = Energía cinética turbulenta (m^2/s^2).
 LBD = Baja densidad de edificios.
 LES = Large Eddy Simulation.
 MNB = Mean Normalized Bias.
 MRF = Moving Reference Frame.
 MSE = Mean Square Error (-).
 n_j = Número de mediciones de velocidad por intervalo.
 N = Número de muestras.
 $NMSE$ = Normalized Mean Square Error (-).
 $NREL$ = National Renewable Energy Laboratory.
 $\bar{O}$ = Promedio de los valores pronosticados.
 O_i = Valor pronosticado para la muestra i .
 OCT = Octogonal.
 OF = Función objetivo.
 $\bar{p}$ = Presión promedio (Pa).
 $\bar{P}$ = Promedio de los valores medidos.
 P_b = Generación de k debido a la flotabilidad ($kg/m.s^3$).
 P_i = Valor medido para la muestra i .
 P_k = Producción de k ($kg/m.s^3$).
 $\bar{P}_k$ = Generación de k debido a los gradientes de velocidad promedio ($kg/m.s^3$).
 P_N = Potencia nominal (kW).
 P_ω = Producción de ω ($kg/m^3.s^2$).

RANS = Reynolds-Averaged Navier-Stokes.

REC = Rectangular.

RMSE = Root Mean Square Error (-).

S_i = Espacio disponible para la instalación del rotor del aerogenerador.

SRL = Revisión sistemática de la literatura.

ST = Estructurada.

SWT = Aerogenerador de baja potencia.

T = Temperatura (°C).

TI = Intensidad turbulenta (%).

TSR = Relación de velocidad de la punta (-).

u_r = Velocidad medida a la altura de referencia h_r (m/s).

u_z = Velocidad extrapolada a la altura h_z (m/s).

$\bar{u}_i$ = Velocidad promedio (m/s).

u'_i = Velocidad fluctuante (m/s).

U = Velocidad del viento (m/s).

U_i = Velocidad de viento medida (m/s).

U_{prom} = Velocidad de viento promediada por intervalo (m/s).

URANS = Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes.

UST = No estructurada.

UWT = Aerogenerador urbano.

VAWT = Aerogenerador de eje vertical.

X_L = Longitud de recirculación adimensional (-).

y^+ = Altura adimensional de la primera celda (-).

Y_ω = Disipación de ω (kg/m³.s²).

Y_k = Disipación de k (kg/m.s³).

Y_M = Contribución de la dilatación fluctuante a la tasa de disipación general (kg/m.s³).

W_s = Ancho de una calle (m).

RESUMEN

En las últimas décadas, la generación distribuida viene siendo promovida para satisfacer parcialmente la demanda energética de distintas ciudades alrededor del mundo. Los aerogeneradores instalados en ambientes urbanos (aerogeneradores urbanos, *UWTs*) son una opción viable para abastecer parcialmente dicha demanda. Estudios anteriores han abordado el diseño de *UWTs*, pero la literatura científica muestra aún una brecha de conocimiento en cuanto al posicionamiento óptimo de *UWTs* instalados sobre las azoteas de los edificios (*BMWTs*).

La presente investigación involucra el desarrollo de una nueva metodología de posicionamiento óptimo de *BMWTs*, basada en dinámica de fluidos computacional (*CFD*) y algoritmos genéticos (*GA*), que impacta económicamente en la generación eléctrica. La nueva metodología incluye las etapas de evaluación del sitio, análisis de datos del viento, validación de modelos numéricos, evaluación del recurso eólico, diseño o selección del aerogenerador y optimización del posicionamiento. Las simulaciones *CFD* emplean dos modelos de turbulencia tipo *Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS)*. La validación de los modelos utilizados para representar el edificio y el aerogenerador se lleva a cabo mediante estudios de independencia de malla y la comparación entre resultados numéricos y datos experimentales disponibles en la literatura.

Los resultados numéricos del proceso de validación sugieren que las simulaciones individuales del edificio y del aerogenerador deben realizarse con los modelos de turbulencia *Realizable $k - \varepsilon$* y el *SST $k - \omega$* , respectivamente. Las simulaciones conjuntas del edificio y aerogenerador (aplicaciones urbanas) pueden realizarse utilizando el modelo *SST $k - \omega$* . El posicionamiento óptimo del aerogenerador produce un costo de la energía (*CoE*) de 3.05146 \$/kWh. En el análisis de sensibilidad del *CoE* variando el factor de refuerzo del edificio (*F*) se encontró que, a medida que *F* aumenta, la posición del mejor *CoE* disminuye en altura. Notar también que a medida que *F* aumenta, este parámetro se convierte en el más importante en la reducción del *CoE* del *BMWT*.

PALABRAS CLAVE

Aerogenerador urbano, Posicionamiento óptimo de aerogeneradores, Dinámica de fluidos computacional, Algoritmos genéticos.

ABSTRACT

In recent decades, distributed generation has been promoted to partially meet the energy demand of various cities around the world. The wind turbines installed in urban environments (Urban Wind Turbines, *UWTs*) are a viable option for partially supplying this demand. Previous studies have addressed the design of *UWTs*, but the scientific literature still shows a knowledge gap regarding the optimal positioning of *UWTs* installed on building rooftops (Building Mounted Wind Turbines, *BMWTs*).

This research involves the development of a new methodology for the optimal positioning of *BMWTs*, based on Computational Fluid Dynamics (*CFD*) and Genetic Algorithms (*GA*), which has economic implications for the power generation. The new methodology includes the stages of site assessment, wind data analysis, validation of numerical models, wind resource assessment, wind turbine design, and positioning optimization. *CFD* simulations employ two *Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS)* turbulence models. Validation of the models used to represent the building and the wind turbine is carried out through mesh independence studies and comparison between numerical results and experimental data available in the literature.

The numerical results of the validation process suggest that individual simulations of the building and the wind turbine should be performed using the *Realizable $k - \varepsilon$* and the *SST $k - \omega$* turbulence models, respectively. Joint simulations of the building and the wind turbine (urban applications) can be performed using the *SST $k - \omega$* model. The optimal positioning of the wind turbine results in a *CoE* of 3.05146 \$/kWh. In the sensitivity analysis of the *CoE* by varying the building reinforcement factor (*F*), it was found that as *F* increases, the position of the best *CoE* decreases in height. It is also noted that as *F* increases, this parameter becomes the most important in reducing the *CoE* of the *BMWT*.

KEYWORDS

Urban wind turbine, Micrositing, Computational fluid dynamics, Genetic algorithms.

INTRODUCCIÓN

La presente tesis desarrolló una metodología de posicionamiento óptimo de aerogeneradores urbanos que impacta sobre su economía de generación eléctrica. Ya que el estado del arte es una etapa crucial en el desarrollo de un trabajo de investigación, se llevó a cabo inicialmente una revisión sistemática de la literatura (*SLR*), la cual permitió determinar cuáles son las tendencias en investigación relacionadas con el diseño basado en dinámica de fluidos computacional (*CFD*) y posicionamiento óptimo de aerogeneradores urbanos (*UWTs*). Entre los hallazgos se destaca que la simulación de los aerogeneradores montados sobre edificios (*BMWTs*) ha evolucionado desde los análisis *2D* hacia los *3D*, incorporando más detalles a los *UWTs* y al modelado de entornos urbanos. Dentro de las investigaciones que involucraron *BMWTs* y aerogeneradores integrados a edificios (*BIWTs*), se desarrollaron nuevos *UWTs* y dispositivos de amplificación de la velocidad del viento.

Después, se validaron dos modelos numéricos, un edificio (edificio de gran altura) y un aerogenerador de eje horizontal (*MEXICO*). Estos modelos numéricos fueron usados para predecir el comportamiento del viento que pasa a través de un ambiente urbano y la cantidad de energía eólica captada por el rotor del aerogenerador, respectivamente. En el proceso de validación, los resultados numéricos se compararon con mediciones experimentales extraídas de la literatura. Este proceso incluyó también estudios de independencia de malla. Es importante destacar que los resultados numéricos obtenidos con ambos modelos de turbulencia (*Realizable $k - \varepsilon$* y *SST $k - \omega$*) coincidieron con las mediciones experimentales. Particularmente, el modelo *Realizable $k - \varepsilon$* superó al *SST $k - \omega$* en la predicción del patrón de flujo sobre la azotea del edificio de gran altura. Se obtuvieron *Hit Rates (HR)* superiores a 0.813 y 0.375 para la velocidad (*U*) y la energía cinética turbulenta (*k*), respectivamente, y se encontró el mejor valor del Normalized Mean Square Error (*NMSE*) correspondiente a 0.022 utilizando el modelo *Realizable $k - \varepsilon$* . Por otro lado, el modelo *SST $k - \omega$* mostró mejores resultados que el modelo *Realizable $k - \varepsilon$* al simular el aerogenerador. El mejor valor de *HR* (0.485) se calculó mediante el modelo *Realizable $k - \varepsilon$* , pero se obtuvo un mejor valor de *MSE* (0.37) mediante el modelo *SST $k - \omega$* .

Luego, se propuso la nueva metodología de posicionamiento óptimo de *BMWTs* que considera el uso de *CFD* y algoritmos genéticos (*GA*), la cual incluyó las etapas de evaluación del sitio, análisis de datos del viento, validación de modelos numéricos, evaluación del recurso eólico, diseño o selección del aerogenerador y optimización del posicionamiento de este. Entre los resultados se destaca que el *GA* converge en la generación 27 logrando un costo de la energía

(CoE) de 3.05146 \$/kWh (mejor individuo) en la posición 5.322 m, 5.282 m, 60.896 m (x, y, z). Este hallazgo confirma que la metodología propuesta es efectiva, ya que al posicionar de manera óptima el aerogenerador se logró reducir su CoE (3.05146 \$/kWh) en comparación con otros posicionamientos no óptimos donde el CoE alcanza valores de 5.70054 \$/kWh. Por ello, la metodología propuesta en la presente tesis impacta económicamente en la generación eléctrica del aerogenerador urbano. El aerogenerador estudiado produjo 1 407.17 kWh/año con un costo total de \$ 85 879.

Finalmente, en el análisis de sensibilidad del CoE variando el factor de refuerzo del edificio (F) se encontró que, a medida que F aumenta, la posición del CoE más bajo (óptimo) disminuye en altura (dirección z). Para $F = 1, 5, 10, 15, 20$ y 25 , se obtuvieron valores del $CoE = 3.05146, 5.02261, 7.36298, 9.45926, 11.46483$ y 13.40085 \$/kWh, respectivamente. Tener en cuenta también que a medida que F aumenta, este parámetro se convierte en el más importante para reducir el CoE del *BMWT*.

Los aspectos metodológicos de la presente investigación se encuentran en el Capítulo I. Los detalles de la *SLR* son mostrados en el Capítulo II. El Capítulo III aborda la validación de los modelos numéricos. En el Capítulo IV se presenta la metodología propuesta y su aplicación a un caso de estudio. Las conclusiones y recomendaciones se encuentran el Capítulo V.

CAPÍTULO I

ASPECTOS METODOLÓGICOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Esquema de la tesis

La presente tesis cuenta con 5 capítulos. En el presente capítulo (Capítulo I), se presentan los aspectos metodológicos de la investigación. Inicialmente, se presenta la realidad problemática relacionada al tema de estudio, la cual se fundamenta con datos extraídos de la literatura científica. Después, se plantean los objetivos, hipótesis y variables de investigación. Seguido, se describe brevemente los artículos generados a partir de la presente investigación y se explica la relación existente entre ellos, los objetivos e hipótesis, y los capítulos 2, 3 y 4 de la presente tesis. Luego, se analizan los aportes del presente trabajo. Finalmente, se evidencia la justificación para la realización de la presente tesis, y se detalla el alcance y las limitaciones de la investigación.

El Capítulo II detalla la revisión sistemática de la literatura (*Systematic Literature Review, SLR*) sobre el diseño basado en dinámica de fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics, CFD*) de aerogeneradores urbanos (*Urban Wind Turbines, UWTs*). La revisión consideró inicialmente un protocolo, el cual detalla las estrategias que se siguen para lograr extraer información útil de distintos artículos y tesis revisadas para lograr responder de forma satisfactoria a 4 preguntas de investigación planteadas. Las respuestas a las preguntas de investigación planteadas en el Capítulo II permitieron identificar las etapas del diseño *CFD*, los modelos y métodos, las variables principales y las tendencias en investigación relacionadas con los *UWTs*.

Notar que los Capítulos III y IV de la presente tesis están relacionados directamente con los objetivos específicos. El capítulo III presenta la validación de los modelos numéricos de un edificio de gran altura y un aerogenerador de eje horizontal mediante el uso de *CFD* y 2 modelos de turbulencia. Los resultados de esta validación son usados en el Capítulo IV, en el cual se desarrolla una nueva metodología de posicionamiento óptimo de *UWTs* usando *CFD* y algoritmos genéticos (*GA*) para la reducción de los costos de energía (*CoE*) de la instalación eólica. La nueva metodología planteada cuenta con diversas etapas, las cuales incluyen el tratamiento estadístico de datos del viento, la evaluación del recurso eólico alrededor y sobre el edificio simulado, el diseño o selección del aerogenerador a ser instalado y la optimización del posicionamiento de

dicho aerogenerador sobre la azotea de un edificio. Estas etapas son utilizadas para resolver un caso de estudio y encontrar el posicionamiento óptimo de un aerogenerador, para el cual se tendrá el menor CoE .

Finalmente, las conclusiones y recomendaciones derivadas de esta investigación se presentan en el Capítulo V. Las referencias bibliográficas consultadas, así como los anexos, se evidencian al final de este documento de tesis.

1.2. Realidad problemática

Los aerogeneradores convencionales de baja potencia presentan buen rendimiento al ser instalados en zonas sin obstáculos cercanos y operando con altas velocidades de viento. Notar que los aerogeneradores convencionales son aquellos de eje horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT*), generalmente de 3 álabes, y de eje vertical (*Vertical Axis Wind Turbine, VAWT*) como *Savonius* y *Darrieus*. Por otro lado, estos aerogeneradores muestran una disminución en su rendimiento al ser instalados en ambientes urbanos (*Urban Wind Turbines, UWTs*), generalmente sobre la azotea de los edificios (Vranešević et al., 2023), debido a los problemas específicos de imprevisibilidad de la dirección (Dilimulati et al., 2018; Tominaga, 2023) y bajas velocidades del viento (Thangavelu et al., 2019; Cooney et al., 2017), producto de las perturbaciones en el flujo de aire originadas por los obstáculos (edificios principalmente) encontrados allí (Anup et al., 2019).

Debido a esto, los *UWTs* producen menos energía eléctrica que aquellos instalados en zonas sin obstáculos cercanos (Krishnan y Paraschivoiu, 2016). Dicha disminución en la producción de energía, asociada al rendimiento de los aerogeneradores, se presenta como el problema central de esta investigación. Nótese en la **Tabla 1** las características de 7 aerogeneradores comerciales de baja potencia instalados en ambientes urbanos. En dicha tabla se destacan las potencias nominales (P_N) de los aerogeneradores, y las diferencias (desviaciones) entre la producción de energía que fue calculada (EAC) a partir de las curvas de potencia de los mismos (suministrada por los fabricantes) y aquella medida en campo (EAM). En la **Tabla 1**, se muestran diferencias en la producción de energía de hasta 66%, las cuales se atribuyen a los problemas de imprevisibilidad en la dirección y bajas velocidades del viento antes mencionados. Los problemas de imprevisibilidad de la dirección y bajas velocidades del viento, generalmente, no son atendidos de forma adecuada por los diseñadores, ocasionando que los aerogeneradores se instalen en

zonas donde se reduce la cantidad de energía eólica que puede ser captada y convertida posteriormente en energía eléctrica.

Tabla 1

Características de aerogeneradores comerciales instalados en ambientes urbanos

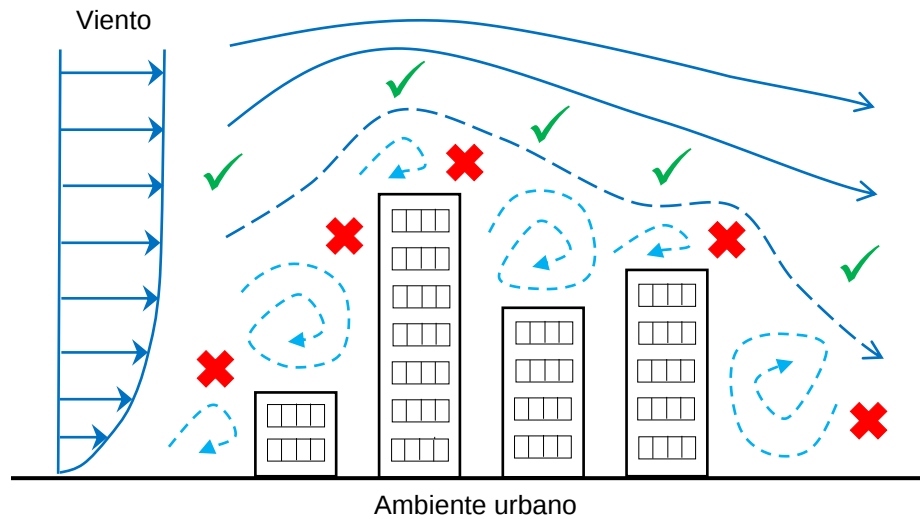
Parámetro	Fortis Montana	Turby	Swift	Kharios N1000	Zephyr Air Dolphin	Fortis Passaat	Ampair
Potencia (kW)	4	1.6	1.5	1	1	1	0.6
Tipo	<i>HAWT</i>	<i>VAWT</i>	<i>HAWT</i>	<i>VAWT</i>	<i>HAWT</i>	<i>HAWT</i>	<i>HAWT</i>
<i>EAC</i> (kWh)	2 804	790	419	225	516	674	546
<i>EAM</i> (kWh)	2 691	266	243	144	393	578	245
Desviación (%)	4	66	42	36	24	14	55

Nota. Tomado de Tominaga (2023) y Ani et al. (2013).

Nótese en la **Figura 1** el comportamiento del flujo de viento dentro de un ambiente urbano. Al instalar un *UWT*, se busca que el eje de su rotor se encuentre lo suficientemente alto, de tal manera que los obstáculos cercanos (superficies de los edificios) se ubiquen lo más alejados posible de los álabes del rotor. Los obstáculos generan que el flujo de viento cambie de dirección y aumente su nivel de turbulencia (Juan et al., 2021) (flujo desordenado, líneas celestes). Si este flujo turbulento incide sobre el rotor del aerogenerador puede causar un desbalance en sus álabes, lo cual generaría, con el paso del tiempo, la rotura de estos. Asimismo, este flujo turbulento generalmente tiene una baja densidad de energía eólica, es decir, bajas velocidades. Por ello, no se recomienda la instalación de los aerogeneradores en zonas cercanas a las superficies de los edificios (zonas marcadas con una X). En cambio, a medida que nos alejamos de la superficie de los edificios, el flujo de viento aparece más ordenado (bajos niveles de turbulencia, líneas continuas azules) y en estas zonas si se recomienda la instalación de los aerogeneradores (zonas marcadas con $\sqrt{}$).

Figura 1

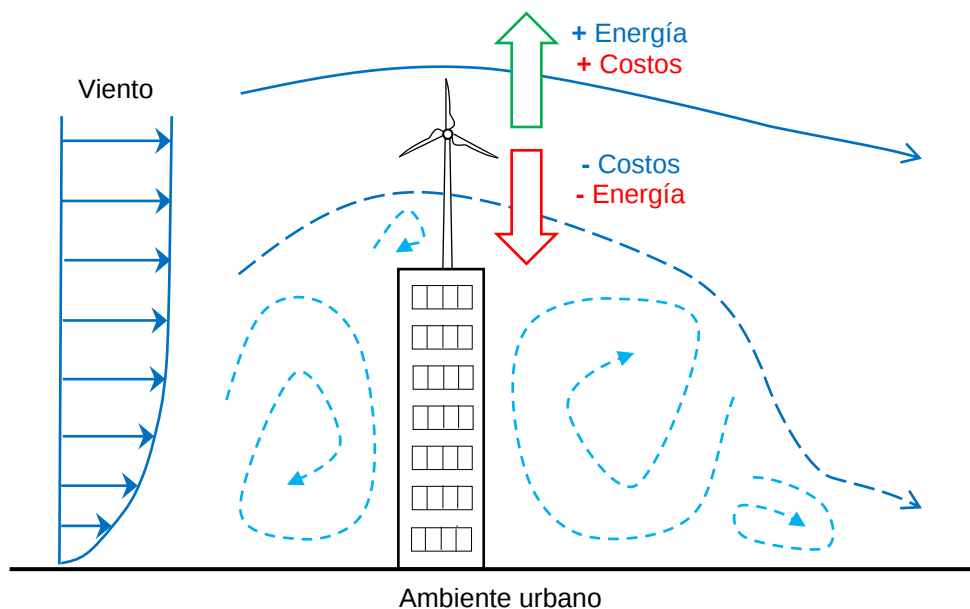
Comportamiento del flujo de viento dentro de un ambiente urbano



Por otro lado, mientras más alto es colocado el rotor del *UWT*, los costos de instalación aumentan (se requiere una torre de mayor tamaño), pero se cuenta con mayor densidad de energía eólica (vientos con mayor velocidad) que puede ser captada y transformada en energía eléctrica por el *UWT* (ver **Figura 2**).

Figura 2

Posicionamiento del rotor de un aerogenerador instalado sobre un edificio



En el conocimiento del autor, la altura a la que se coloca el rotor del *UWT* se determina generalmente de manera empírica, ya que no se conoce con certeza los niveles de turbulencia y dirección que tendrá el flujo de viento luego de incidir sobre los edificios ubicados dentro de los ambientes urbanos. Debido a esto, no se puede asegurar que el aerogenerador instalado dentro del ambiente urbano captará el viento suficiente (cantidad de energía eólica) para producir la energía eléctrica requerida por el usuario.

Para afrontar el problema de imprevisibilidad en la dirección del viento, se pueden realizar simulaciones numéricas del flujo del viento que atraviesa un determinado ambiente urbano, de tal forma que se comprenda mejor la fenomenología asociada. Por otro lado, el problema de las bajas velocidades del viento puede superarse parcialmente colocando el eje del rotor del *UWT* a una mayor altura. Consecuentemente, se puede determinar cuál sería el posicionamiento óptimo del rotor del *UWT*, instalado sobre la azotea de un edificio (*Building Mounted Wind Turbine, BMWT*), de manera que el flujo de viento que incide sobre este mantenga bajos niveles de turbulencia y altas velocidades, logrando que se maximice la captación de energía eólica, pero minimizando la altura del rotor para que no se incurran en altos costos de instalación del sistema eólico.

1.3. Formulación del problema

Es importante notar que el estado del arte del diseño y posicionamiento de los *UWTs* fue realizado en el Capítulo II de la presente tesis. Tomando en consideración lo indicado en la sección anterior y la información incluida en el Capítulo II, se plantea la siguiente pregunta general de investigación (**PG**):

- **PG:** ¿De qué manera el posicionamiento óptimo de los aerogeneradores urbanos impacta económicamente en la generación eléctrica?

Asimismo, se formulan las siguientes preguntas específicas (**PE**):

- **PE1:** ¿Cuál es el error obtenido en la validación de modelos numéricos de un edificio y un aerogenerador urbano?
- **PE2:** ¿Una metodología de posicionamiento óptimo de aerogeneradores urbanos que considera el uso de *CFD* y *GA* permite reducir los costos de energía del sistema eólico?

1.4. Objetivos, hipótesis y variables de investigación

1.4.1. Objetivos

El objetivo general de la investigación (**OG**) se establece como:

- **OG:** Desarrollar una metodología de posicionamiento óptimo de aerogeneradores urbanos que impacte económicamente en la generación eléctrica.

Los objetivos específicos (**OE**) se definen como:

- **OE1:** Validar los modelos numéricos de un edificio y un aerogenerador usando *CFD*.
- **OE2:** Desarrollar una metodología de posicionamiento óptimo de aerogeneradores urbanos que considera el uso de *CFD* y *GA* para reducir los costos de energía.

1.4.2. Hipótesis

La hipótesis general (**HG**) de la presente tesis es:

- **HG:** La metodología de posicionamiento óptimo de aerogeneradores urbanos desarrollada impacta económicamente en la generación eléctrica.

Las hipótesis específicas (**HE**) se definen como:

- **HE1:** Los errores entre los resultados numéricos y los datos experimentales en la validación de los modelos del edificio y aerogenerador son relativamente pequeños.
- **HE2:** La metodología de posicionamiento óptimo de aerogeneradores urbanos que utiliza *CFD* y *GA* permite reducir los costos de energía del sistema eólico.

1.4.3. Variables

Mayor detalle de las variables de estudio puede ser encontrado en las matrices de consistencia (**Anexo 1**) y operacionalización (**Anexo 2**).

1.4.3.1. Variable independiente

La variable independiente del **PG/OG/HG** corresponde al posicionamiento óptimo del aerogenerador.

1.4.3.2. Variable dependiente

La variable dependiente del **PG/OG/HG** es el impacto económico de la generación eléctrica.

1.5. Artículos aceptados y publicados

A continuación, se listan los artículos aceptados y publicados en revistas científicas indexadas en SCOPUS (papers), los cuales fueron generados a partir de esta tesis:

- Rodriguez, C. V., Ríos, A., & Luyo, J. E. (2021). CFD Design of Urban Wind Turbines: A Review and Critical Analysis. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 11(2), 618-637 **[PUBLICADO]**.
- Rodriguez, C. V., Ríos, A., & Luyo, J. E. (2024). High-rise Building and a Horizontal Axis Wind Turbine CFD Models Validation Using Two RANS Turbulence Models. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, XX(X), XXX-XXX **[ACEPTADO]**.
- Rodriguez, C. V., Ríos, A., & Luyo, J. E. (2024). Methodology for Optimal Micrositing of Building Mounted Wind Turbines Using Computational Fluid Dynamics and Genetic Algorithms. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, XX(X), XXX-XXX **[ACEPTADO]**.

1.5.1. Paper 1: Revisión sistemática de la literatura sobre aerogeneradores urbanos

En esta etapa de la investigación, se desarrolla una *SLR* sobre el diseño *CFD* de *UWTs*. Inicialmente, se propone un protocolo, el cual detalla la estrategia de búsqueda de información, el criterio de inclusión de los estudios primarios, la selección de estudios, y la extracción y síntesis de datos. La información recopilada en esta parte de la investigación logra responder a 4 preguntas de investigación relacionadas con las etapas del diseño *CFD*, los modelos y métodos usados en las simulaciones, las variables principales y las tendencias en investigación sobre *UWTs*. Los resultados muestran que el modelo de turbulencia más utilizado en las simulaciones es el $k - \varepsilon$ (42% de los estudios). Asimismo, se puede determinar que el factor de amplificación de velocidad máxima, el coeficiente de potencia y el coeficiente de par de los aerogeneradores descritos en los estudios primarios son de 1.8, 0.4627 y 0.4195, respectivamente. El detalle del desarrollo de la *SLR* se encuentra en el Capítulo II de la presente tesis.

1.5.2. Paper 2: Validación de modelos numéricos de un edificio y un aerogenerador

En esta parte de la investigación, se validan los resultados de los modelos numéricos de un edificio de gran altura y un aerogenerador de eje horizontal utilizando *CFD* y los modelos de turbulencia *Realizable $k - \varepsilon$* y *SST $k - \omega$* , con el propósito de determinar cuál modelo exhibe la mejor exactitud al compararse con datos experimentales disponibles en la literatura. Para ello, se desarrollan los modelos para el edificio y el aerogenerador. Después, se realizan estudios de independencia de malla para ambos modelos. Finalmente, se comparan los resultados numéricos de ambos modelos utilizando métricas de validación, como el *Hit Rate (HR)*, *Normalized Mean Square Error (NMSE)* y *Mean Square Error (MSE)*. Los resultados muestran que el modelo *Realizable $k - \varepsilon$* logra resultados superiores ($NMSE = 0.022$) en comparación con el modelo *SST $k - \omega$* ($NMSE = 0.039$) al predecir el patrón de flujo sobre la azotea del edificio. Por el contrario, en las simulaciones del aerogenerador, el modelo *SST $k - \omega$* ($MSE = 0.370$) supera al modelo *Realizable $k - \varepsilon$* ($MSE = 0.445$). El desarrollo de la validación de los modelos numéricos se detalla en el Capítulo III.

1.5.3. Paper 3: Metodología de posicionamiento de aerogeneradores urbanos

Esta parte de la investigación se enfoca en el desarrollo de una metodología para el posicionamiento óptimo de *BMWTs* utilizando *CFD* y *GA*. Para ello, se realiza una evaluación del sitio de interés. Después, se lleva a cabo un tratamiento estadístico para determinar las velocidades y direcciones del viento que se utilizarían en las etapas siguientes de la metodología. Estas velocidades y direcciones del viento son simuladas dentro de un entorno urbano mediante *CFD*. Luego, se selecciona un *BMWT* adecuado. Además, las zonas con bajas velocidades de viento y altos niveles altos de turbulencia restringen el espacio de búsqueda utilizado en la optimización del posicionamiento del aerogenerador basada en *GA*. Finalmente, se realiza un análisis de sensibilidad utilizando el factor de refuerzo del edificio (F). Los resultados muestran que la energía producida anualmente por el *BMWT* es el parámetro clave para reducir el CoE , el cual alcanza un valor de 3.05146 \$/kWh. Los detalles de la metodología planteada se encuentran en el Capítulo IV de la presente tesis.

1.5.4. Conexión entre los papers

En esta tesis, se desarrollaron 3 papers relacionados con los objetivos de investigación planteados en la sección anterior. Los papers por separado cumplen con los **OE**, permiten verificar las **HE**, y ayudan a responder las **PE**. El **Paper 1** involucra el desarrollo de una *SLR*, la

cual permite determinar cuáles son las tendencias en investigación relacionadas con el diseño y posicionamiento óptimo de *UWTs*. Por ello, los resultados del **Paper 1** ayudan en la identificación del problema de estudio, el planteamiento de los objetivos y la justificación de la presente tesis. Ya que el estado del arte es una etapa previa a la realización de una tesis doctoral, esta no fue considerada como un **OE**. En el **Paper 2** se realiza la validación de dos modelos numéricos, de un edificio y un aerogenerador de eje horizontal, los cuales son usados para predecir el comportamiento del viento que pasa a través de un ambiente urbano y la cantidad de energía eólica captada por el rotor del aerogenerador, respectivamente. Los resultados del **Paper 2** resuelven el **OE1**, permiten validar la **HE1** y responden a la **PE1**. Finalmente, en el **Paper 3** se lleva a cabo el desarrollo de una nueva metodología de posicionamiento óptimo de *UWTs*. Dicha metodología incluye las fases de evaluación del sitio, análisis de datos del viento, validación de modelos numéricos, evaluación del recurso eólico, diseño o selección del aerogenerador y optimización del posicionamiento de este. Notar que los resultados del **Paper 2** corresponden a la etapa de validación de modelos numéricos del **Paper 3**. En el **Paper 3** también se evalúa un caso de estudio con la metodología planteada para determinar cuál sería el posicionamiento óptimo de un aerogenerador instalado en un ambiente urbano particular, de tal modo que se reduzca su *CoE*. Esta evaluación también incluye un análisis de sensibilidad del *CoE* relacionando la altura de la torre y el *F*. Los resultados del **Paper 2** y **Paper 3** resuelven el **OE2**, permiten evaluar la **HE2**, y responden a la **PE2**. Los resultados y conclusiones obtenidos a partir de los papers satisfacen el **OG**, verifican la **HG** y responden a la **PG** de la presente tesis.

1.6. Aportes de la tesis

El presente trabajo de investigación tiene un aporte significativo al campo del posicionamiento óptimo de *BMWTs*, ya que se desarrolla una nueva metodología, basada en *CFD* y *GA* reduciendo el *CoE* de dichas instalaciones. Esta nueva metodología ayuda a cerrar parcialmente algunas brechas en el conocimiento descritas ampliamente en el **Paper 1**, **Paper 2** y **Paper 3**.

En el **Paper 2** se aborda la validación de los resultados de dos modelos numéricos, uno representando a un edificio de gran altura y otro representando a un aerogenerador de eje horizontal, los cuales fueron simulados usando los modelos de turbulencia *Realizable $k - \varepsilon$* y *SST $k - \omega$* . Este enfoque es considerado como un aporte significativo ya que en el pasado no se validaron ambos modelos numéricos en el mismo trabajo. El beneficio que trae consigo la validación de ambos modelos radica en la obtención de hallazgos específicos a la validación de los modelos en forma individual y en conjunto.

Los resultados del **Paper 2** demuestran la importancia de realizar estudios de independencia de malla por cada modelo de turbulencia utilizado, ya que al realizar el estudio solo para un modelo, se pierde precisión en el cálculo con el otro modelo de turbulencia. Este hecho es demostrado numéricamente en el **Paper 2**, donde se obtuvieron resultados distintos para los 2 modelos de turbulencia empleados al usar distintos niveles de refinamiento en las mallas. Dichos resultados también confirman que para las simulaciones individuales del edificio y del aerogenerador, se debería utilizar los modelos de turbulencia *Realizable $k - \varepsilon$* y *SST $k - \omega$* , respectivamente. Por otro lado, para simulaciones que involucran al edificio y aerogenerador en conjunto, los resultados obtenidos sugieren que debe emplearse el modelo *SST $k - \omega$* . Por ello, esto es considerado como una contribución al estado del arte del posicionamiento de *UWTs*.

En el **Paper 3** se desarrolla la nueva metodología de posicionamiento óptimo de *BMWTs* y se aplica a un caso de estudio, obteniendo hallazgos importantes acerca de las mejores zonas para la instalación de los *UWTs*. Otra de las contribuciones del **Paper 3** radica en la inclusión de la etapa de evaluación del sitio dentro de la metodología propuesta. Esta etapa es raramente incluida en las metodologías de posicionamiento de *UWTs*, pero es importante como etapa preliminar para la elección del lugar (sobre la azotea de algún edificio) donde se instalará el aerogenerador. Asimismo, en esta etapa se puede elegir la forma del espacio de búsqueda (zona para la instalación del aerogenerador), la cual es usada en la optimización del posicionamiento.

Otra contribución del **Paper 3** se relaciona con la importancia que se da a la validación de los modelos numéricos del edificio y aerogenerador dentro de la nueva metodología. En investigaciones pasadas no se validan a detalle ambos modelos, por ello, no se tiene certeza del nivel de exactitud de las predicciones realizadas con dichos modelos en relación con mediciones experimentales, lo cual resta confiabilidad a los resultados obtenidos. Notar que los detalles de la validación del edificio y aerogenerador usados en la presente tesis se encuentran en el **Paper 2**.

Las simulaciones del viento pasando alrededor de los edificios dentro de los ambientes urbanos se realizan generalmente considerando una sola velocidad y dirección. Para ello, se construyen dominios computacionales con forma rectangular. En cambio, en el **Paper 3** se considera un dominio computacional con 16 lados (hexadécágono), el cual permite la simulación de 16 direcciones diferentes de viento. Esto también es considerado como un aporte, ya que se puede simular un mayor número de direcciones y con ello obtener una mayor precisión en la estimación del potencial eólico del ambiente urbano de interés. Este enfoque es especialmente importante

en el estudio del potencial eólico urbano en áreas donde el viento es multidireccional y no muestra una dirección claramente predominante. Asimismo, la configuración de la malla estructurada empleada en la discretización del dominio computacional también es un aporte, ya que generalmente se usan mallas no estructuradas cuando se tienen dominios computacionales de este tipo. El beneficio del uso de la malla estructurada radica en su mayor precisión de cálculo cuando la cara de los elementos está colocada en forma perpendicular a la dirección del flujo simulado.

Notar que en el **Paper 3** también se simularon múltiples velocidades de viento, las cuales fueron obtenidas a partir de un tratamiento estadístico. El enfoque usado para la elección de las velocidades y direcciones de viento que fueron simuladas usando *CFD* también es considerado como una contribución importante de la presente investigación. Este enfoque permite obtener un ahorro computacional al reducir el número total de escenarios simulados (velocidad y dirección de viento particular) sin perder mucha precisión en el cálculo al incluir solo aquellos escenarios que ocurren la mayor parte del tiempo en la zona de estudio. En el **Paper 3** se redujo notablemente el número de simulaciones realizadas sin perjudicar el nivel de precisión en el cálculo del potencial eólico de la zona de estudio.

Otro aporte derivado del **Paper 3** se relaciona con la optimización del posicionamiento del aerogenerador sobre la azotea del edificio, ya que generalmente las investigaciones que involucran la simulación de *UWTs* no toman en cuenta este enfoque. Asimismo, la implementación del criterio de convergencia del *GA*, el cual reduce el número de poblaciones simuladas (generaciones), también es considerado como una contribución al desarrollo de metodologías de posicionamiento de *UWTs* y ayuda a cerrar parcialmente las brechas en esta área del conocimiento. También es importante mencionar que el análisis de las bajas velocidades de viento (por debajo de 3 m/s) y altos niveles de turbulencia (mayor al 20%) es un aporte de esta tesis, ya que dicho análisis no se realiza en optimizaciones (**Paper 3**), pero es importante para reducir el área de búsqueda del *GA* permitiendo que la optimización pueda ser más rápida.

Se tiene modelos de costos para instalaciones eólicas de gran potencia, pero no se cuenta con datos suficientes de proyectos eólicos urbanos, lo cual no permite que se genere una estructura de costos adecuada para este tipo de instalaciones. Por ello, en el **Paper 3** se propuso un modelo simplificado de *CoE* para poder evaluar la instalación del *BMWT* estudiado. Este modelo simplificado también es considerado como una contribución importante al estado del arte del

posicionamiento de *UWTs* y permitirá que se puedan comparar futuras instalaciones eólicas urbanas en función de sus costos.

Asimismo, en el **Paper 3** se realiza un análisis de sensibilidad del *CoE* variando F , el cual contribuye al estado del arte revelando hallazgos adicionales relacionados al estudio de costos de los sistemas eólicos urbanos. La importancia del análisis de F radica en que valores muy altos de este parámetro hacen inviable un proyecto eólico urbano, por ello, es importante incluirlo en futuras investigaciones. Notar que este análisis de sensibilidad particular no fue realizado en investigaciones pasadas.

Se espera que los hallazgos de esta tesis doctoral proporcionen orientación a investigadores en el campo del posicionamiento óptimo de *UWTs*, con el fin de reducir el *CoE* de estos sistemas e incentivar el uso de tecnologías basadas en *BMWTs*.

1.7. Justificación e importancia de la investigación

Las instalaciones de generación de energía eléctrica que usan fuentes de energías renovables han aumentado en los últimos años. La Agencia Internacional de Energía estima que con las políticas actuales y las nuevas a ser implementadas, la participación de las tecnologías de generación eléctrica basadas en energías renovables no convencionales a nivel mundial será del 54% al año 2050 (IEA, 2023). Estas fuentes de energías renovables utilizadas en la generación eléctrica principalmente son la solar y la eólica. Mientras que la energía solar está disponible solo durante 12 horas al día, la energía eólica puede ser aprovechada todo el día con cierta intermitencia.

Para producir energía eléctrica a través del aprovechamiento del recurso eólico, se utilizan los aerogeneradores de baja y alta potencia. Los aerogeneradores de alta potencia, instalados en grandes áreas aisladas, son usados para la generación eléctrica centralizada. Mientras que los aerogeneradores de baja potencia se presentan como una opción viable para la generación distribuida al ser instalados en ambientes urbanos (Tummala et al., 2016; Pellegrini et al., 2021). Notar que el crecimiento de la generación distribuida alrededor del mundo está transformando el planeamiento y operación tradicional de las redes de distribución eléctrica (Kumar et al., 2022).

Una opción tecnológica para abastecer de forma parcial la demanda eléctrica de las ciudades es a través de tecnologías de conversión que utilizan energías renovables, como los aerogeneradores. Los aerogeneradores pueden ser incorporados en las redes de distribución de

energía eléctrica o conectados a las cargas que serán abastecidas directamente (generación distribuida). En este sentido, el planeamiento óptimo del emplazamiento y tamaño de la generación distribuida es crítico para asegurar la eficiencia operacional de la red de distribución y las cargas abastecidas en términos de calidad de energía, estabilidad de voltaje, confiabilidad y rentabilidad (Ehsan y Yang, 2018). Asimismo, ha sido probado que la generación distribuida puede minimizar las pérdidas de potencia en las redes de distribución y utilización debido a su instalación cercana a los centros de consumo (Vita, 2017).

A pesar de que se viene investigando hace varios años sobre el diseño de *UWTs*, la literatura científica muestra aún algunas brechas de conocimiento en este campo. Uno de los factores que no permite el rápido desarrollo de estas tecnologías es la falta de mediciones de direcciones y velocidades del viento dentro de los ambientes urbanos (Simões y Estanqueiro, 2016). Por ello, para superar las dificultades que trae consigo la no disponibilidad de datos del viento, herramientas numéricas basadas en *CFD* son generalmente utilizadas. Dichas herramientas numéricas pueden predecir con precisión el comportamiento del viento e incluso la potencia mecánica en el eje de aerogeneradores sometidos a condiciones de operación particulares.

Adicionalmente, es conocido que la eficiencia de los aerogeneradores de baja potencia depende en gran medida de su geometría (Shen et al., 2016) y de las condiciones de operación a las cuales están expuestos. En el presente trabajo de investigación, la geometría del rotor del aerogenerador se mantendrá fija, mientras que el posicionamiento de dicho rotor será modificado, de tal manera que mejoren las condiciones de dirección y velocidad del viento, con las cuales trabajará esta máquina, logrando que capte mayor cantidad de energía eólica para su posterior transformación en energía eléctrica. Notar que la mejora en la captación de energía eólica, por parte del aerogenerador, también permite que su eficiencia aerodinámica mejore. A pesar de los esfuerzos realizados en el pasado, es evidente que existe la necesidad de continuar con las investigaciones en esta área del conocimiento de forma que se diseñen *BMWTs* más eficientes y estos se instalen en lugares donde se maximice su captación de energía eólica.

Los beneficios que traerá consigo el presente trabajo pueden ser resaltados desde diversos puntos de vista:

Técnico. Aumento de la cantidad de energía eólica captada y transformada a través de los álabes del *BMWT*. Como se muestra en el trabajo de Shiraz et al. (2019), el posicionamiento de los aerogeneradores fue crucial para aumentar su generación de energía eléctrica de 256 kWh (caso

menos favorable) a 408 kWh (caso más favorable) durante los meses de invierno en la ciudad de Montreal (Canadá). Asimismo, la metodología propuesta en esta tesis permitirá posicionar los *BMWTs* de forma que se puedan cubrir demandas parciales o totales de energía de los residentes del edificio estudiado. Por ejemplo, como se aprecia en la investigación de Arteaga-López et al. (2019), es posible cubrir demandas totales de pequeños edificios (60 000 kWh/año) dentro de zonas urbanas usando arreglos adecuados de *BMWTs*.

Económico. Al aumentar la cantidad de energía eólica captada por los álabes del *BMWT*, también aumentará la cantidad de energía eléctrica generada por este, lo cual reducirá el costo de la energía de las instalaciones basadas en *BMWTs*. Este hecho se deduce de la investigación de Rodríguez-Hernandez et al. (2019), en la cual se analizaron 28 *SWTs* (entre 0.3 y 3.5 kW de potencia nominal) en 18 locaciones distintas dentro de la zona metropolitana del Valle de México, y se encontró que el valor presente neto de las instalaciones de *SWTs* era positivo solamente en algunas locaciones estudiadas, variando hasta en \$ 800 entre la mejor locación (mayor valor presente neto) y la peor locación. Esto realza la importancia de posicionar en el lugar adecuado al aerogenerador.

Ambiental. Al abastecer parcialmente a las cargas residenciales y comerciales con energía eléctrica obtenida a partir de energía eólica, se reducirán las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por la quema de combustibles fósiles, usados en los procesos convencionales de generación eléctrica (Moreira Chagas et al., 2020). Notar que las centrales termoeléctricas presentan emisiones de 856 g-CO₂/kWh (a gas natural), mientras que las centrales eólicas emiten alrededor de 46 g-CO₂/kWh, según el estudio de Feng et al. (2014). Si bien es cierto que los datos consignados corresponden a grandes centrales, se puede deducir que por cada kWh generado por los *BMWTs*, se reducirá la cantidad de CO₂ emitido al ambiente.

Social. Disponibilidad de una nueva metodología para el posicionamiento óptimo de *BMWTs*, que podría utilizarse en futuros planes de generación distribuida. Notar que la generación distribuida puede reducir las pérdidas de energía hasta en un 63% en un sistema de distribución eléctrico de 69 barras, como es indicado por Ehsan y Yang (2018).

Académico. La generación de una nueva metodología para el posicionamiento óptimo de *BMWTs* fomentará futuras investigaciones en este campo. Notar que se han planteado pocas metodologías de posicionamiento óptimo de *BMWTs* en el pasado, como se puede discutir en el Capítulo II de la presente tesis.

1.8. Alcance

La presente investigación involucrará el desarrollo de una nueva metodología basada en *CFD* y *GA* para el posicionamiento óptimo de *BMWTs* bajo un enfoque fluidodinámico. No se incluirán análisis estructurales detallados del aerogenerador y edificio simulados. Solo se considera el costo de la energía eléctrica, a partir del costo del aerogenerador y su torre; no son incluidos los costos de mantenimiento y operación del aerogenerador, ni los incentivos y exoneraciones tributarias de promoción para la introducción y despliegue de esta nueva tecnología de generación con fuente eólica. Los procesos de simulación numérica basados en *CFD* serán realizados utilizando dos modelos de turbulencia tipo *Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS)*. La verificación de los modelos del edificio y aerogenerador será llevada a cabo mediante estudios de independencia de malla. Los resultados numéricos obtenidos durante el proceso de verificación serán contrastados con mediciones experimentales disponibles en la literatura científica. La capa límite atmosférica será modelada a partir de los datos de velocidades y direcciones del viento promedio encontrados en la base de datos del Senamhi (emplazamiento particular), la cual se encuentra disponible en internet, sin considerar la rugosidad del suelo. No se considerarán rugosidades en las superficies del aerogenerador, piso del ambiente urbano y paredes del edificio. Asimismo, se considerarán condiciones atmosféricas estándar a 0 m.s.n.m. en los cálculos. Se simulará la rotación del rotor del aerogenerador mediante la técnica *Moving Reference Frame (MRF)* y los resultados representarán un instante de tiempo de giro del rotor.

CAPÍTULO II

REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA DEL DISEÑO DE AEROGENERADORES URBANOS USANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

2.1. Introducción

Desde hace algunas décadas, se viene promoviendo a nivel mundial la incorporación de energías renovables en la generación de energía eléctrica para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la combustión de los combustibles fósiles. Además, las energías renovables tienen otros beneficios como la diversificación de los recursos energéticos, aportan con energía a países sin recursos fósiles, mejoran la estructura de los sistemas energéticos, contribuyen al desarrollo sostenible y aumentan el empleo donde se llevan a cabo proyectos de energías renovables (Li et al., 2015).

Dentro de las energías renovables, la hidráulica, solar y eólica son las más populares. Un inconveniente de la generación de energía eléctrica utilizando energía hidráulica radica en la necesidad de construir represas de agua que provocan la inundación del hábitat terrestre de algunos animales y plantas (Dursun y Gokcol, 2011). En cuanto a la energía solar, esta solo está disponible durante 12 horas al día. Por otro lado, la energía eólica está disponible todo el día con diferente intensidad. Así, la energía eólica representa una alternativa viable para la generación de energía eléctrica.

La energía eólica se aprovecha mediante aerogeneradores, los cuales se pueden clasificar según sus potencias como aerogeneradores de alta potencia (*large-scale*) o baja potencia (*small-scale*). Los aerogeneradores de alta potencia (grandes) se utilizan en parques eólicos, que se ubican generalmente en lugares alejados de las zonas urbanas. Por el contrario, los aerogeneradores de baja potencia (pequeños) se pueden instalar en entornos urbanos, es decir, *UWTs*, para generar energía eléctrica y abastecer parcialmente a las cargas residenciales y comerciales.

El momento del elemento de pala (*Blade Element Momentum, BEM*) es la teoría unidimensional (1D) más utilizada en la predicción de las cargas y el rendimiento de los aerogeneradores (Jamieson, 2011). Notar que la teoría *BEM* es adecuada para el diseño de aerogeneradores que operan bajo un flujo uniforme del viento, como aquellos aerogeneradores instalados en lugares alejados de las ciudades. Por otro lado, el uso del enfoque *CFD* se ha convertido en una práctica

común para la investigación en el campo de la ingeniería eólica, donde viene ayudando a los ingenieros en el diseño de aerogeneradores más eficientes (Ghasemian et al., 2017). Tener en cuenta que para la realización de cálculos basados en *CFD* se requiere una capacidad computacional superior que para aquellos que utilizan la formulación *BEM*, el cual muestra una menor precisión en comparación con el primero.

En particular, para el diseño y posicionamiento de los *UWTs* se debe tener en cuenta los niveles de turbulencia, y las velocidades y direcciones del viento que se encuentran en los entornos urbanos. Estas condiciones se pueden simular adecuadamente por medio de *CFD*, el cual puede predecir de forma más precisa las características del viento alrededor de los aerogeneradores y edificios en comparación con otros enfoques numéricos (Ghasemian et al., 2017). Las simulaciones *CFD* permiten diseñar aerogeneradores adecuados para condiciones de operación particulares, como las encontradas dentro de los ambientes urbanos, lo cual es un factor clave para el funcionamiento estable de los *UWTs* (J. Chen y Wang, 2017).

En cuanto a los artículos de revisión, los avances en tecnología de aerogeneradores fueron documentados por Clausen y Wood (2000), los cuales concluyeron que los nuevos métodos para el diseño de álabes de pequeños aerogeneradores deberían aumentar el rendimiento de estos. Ishugah et al. (2014) revisaron las tecnologías de aerogeneradores, el comportamiento del viento, la evaluación del recurso eólico, y los beneficios económicos, sociales y ambientales del aprovechamiento de la energía eólica en entornos urbanos. Los autores concluyeron que la tecnología de *UWTs* es un nuevo campo de estudio donde se han desarrollado ideas novedosas para la explotación sostenible del recurso eólico. Tummala et al. (2016) presentaron una revisión sobre el diseño, control y fabricación de álabes de pequeños *HAWTs*. Asimismo, los autores categorizaron a los *VAWTs* en base a estudios experimentales y numéricos. Más recientemente, Anup et al. (2019) revisaron estudios relacionados con la tecnología de *UWTs* para comprender las características de su rendimiento e identificar las brechas en el campo del conocimiento relacionadas con dicha tecnología. En el estudio se concluyó que algunos investigadores informaron sobre una disminución entre el 25% y 35% del rendimiento de los aerogeneradores, lo que se atribuyó a altos niveles de intensidad turbulenta (*TI*) mayores al 18%. Los autores también investigaron si el uso del estándar internacional de diseño *IEC 41400-2*, usado para pequeños aerogeneradores, es válido para aplicaciones urbanas. Los autores encontraron que los modelos de predicción del viento incorporados en el estándar no son adecuados para determinar el lugar correcto donde se deberían instalar los *UWTs* dentro del ambiente urbano.

Ghasemian et al. (2017) revisaron trabajos relacionados con simulaciones *CFD* de *VAWTs*. Los autores presentaron recomendaciones para el modelado de la turbulencia, esquemas numéricos y características del dominio computacional. También investigaron parámetros como la relación de velocidad de punta (*Tip Speed Ratio, TSR*), la velocidad del viento incidente (U), la solidez (σ) y las características del álabe. Los autores concluyeron que el flujo del viento que incide sobre el *UWT* está sesgado y es fluctuante debido a la presencia de edificios y otros obstáculos que se encuentran en los entornos urbanos. Además, Kumar et al. (2018) destacaron los principales desarrollos de *VAWTs* centrándose en la integración con el entorno urbano. También se discutieron algunas recomendaciones para futuros estudios de *UWTs*. Los autores concluyeron que investigaciones adicionales en este campo serían fundamentales para hacer de los *VAWTs* una tecnología de generación eléctrica viable en aplicaciones de generación distribuida.

Ayhan y Sağlam (2012) informaron sobre los resultados de su investigación relacionada con las aplicaciones de la energía eólica, incluida la aerodinámica del viento sobre los edificios. Los autores concluyeron que se debe usar *CFD* en el modelamiento del flujo del viento sobre los edificios para encontrar el posicionamiento adecuado que tendrían los aerogeneradores instalados en entornos urbanos. Toja-Silva et al. (2018) mostraron una revisión sobre *CFD* aplicada a la explotación de la energía eólica urbana. Su trabajo contenía aspectos técnicos relacionados con la simulación de la aerodinámica de edificios y la energía eólica urbana. Los autores concluyeron que se han realizado pocas simulaciones de aerogeneradores instalados sobre las azoteas de los edificios. Asimismo, los autores concluyeron que el coeficiente de potencia (C_p) de los aerogeneradores colocados dentro de dispositivos de amplificación de velocidad de viento puede ser diez veces mayor que en condiciones de campo abierto. Por otro lado, Wong et al. (2017) revisaron varios sistemas de amplificación del flujo del viento para proporcionar información sobre los avances recientes en este tipo de dispositivos integrados con la estructura de los edificios. Los autores destacaron que algunos sistemas de amplificación lograron aumentar la potencia de salida de los aerogeneradores hasta en 910% para $U = 6$ m/s.

Por otro lado, se tiene a las revisiones sistemáticas de la literatura (*Systematic Literature Reviews, SLRs*), que son un medio para identificar y evaluar la literatura científica disponible y relevante de un tema en particular (Kitchenham, 2004). Con respecto a las *SLRs* de aerogeneradores, la mayoría de ellas están relacionadas con el campo de la salud, como aquellas donde se exploró la relación entre el ruido (Onakpoya et al., 2015) y el impacto visual (Freiberg et al., 2019) que producen los *UWTs* sobre la salud de los residentes de una zona

urbana. Los resultados de Onakpoya et al. (2015) sugirieron que el ruido que generan los *UWTs* durante su operación puede estar asociado con los problemas de sueño que tienen algunos residentes de la zona estudiada. Mientras tanto, los resultados de Freiberg et al. (2019) indicaron que la exposición visual de los *UWTs* aumentó la perturbación en el sueño de los residentes.

En el pasado también se desarrollaron *SLRs* sobre generación de energía eléctrica a partir de aerogeneradores (Vargas et al., 2019) y acerca de las barreras para la implementación de parques eólicos terrestres (*onshore*) (Diógenes et al., 2020). Con respecto al primer estudio, los autores utilizaron 18 palabras clave en la búsqueda de la literatura científica relacionada con el tema. Durante la búsqueda se encontraron 2 825 artículos. En la etapa de selección, 145 artículos fueron elegidos para los análisis finales. En cuanto al estudio sobre las barreras para la implementación de parques eólicos *onshore*, se identificaron un total de 9 367 artículos. Después de la lectura de los artículos, se consideró que 477 artículos contenían información relevante para la *SLR*. Más recientemente, Nunes et al. (2020) realizaron una *SLR* sobre *HAWTs* amplificados por dispositivos tipo tobera-difusor. En esta *SLR*, se encontraron 426 estudios, de los cuales 155 se utilizaron para los análisis finales. Los autores encontraron que los dispositivos tendían a estrechar las curvas del C_p , reduciendo el intervalo óptimo de operación de los *HAWTs* estudiados. Los autores también recomendaron que los *HAWTs* amplificados con estos dispositivos deberían diseñarse considerando una optimización simultánea de las geometrías del rotor y la tobera-difusor.

En la literatura también se encuentran algunos informes sobre el análisis de proyectos de ingeniería eólica como el proyecto *WINEUR* (van Bussel y Mertens, 2005), cuyo objetivo fue determinar la viabilidad de la implementación de *UWTs* en ciudades. Los *UWTs* evaluados en el proyecto *WINEUR* tenían P_N entre 1 y 20 kW. Los autores mencionaron que fue complejo determinar la ubicación óptima de los *UWTs* debido al comportamiento imprevisto del viento que se encuentra en los ambientes urbanos. Adicionalmente, algunos estudios de casos relacionados con proyectos de *UWTs* fueron analizados en el trabajo de Fields et al. (2016). En dicho trabajo, se concluyó que la industria de *UWTs* ha experimentado diversos resultados, entre algunos positivos y varios negativos. En los proyectos con resultados positivos, los aerogeneradores se colocaron en edificios más altos que los obstáculos circundantes. Por otro lado, la viabilidad de la instalación de los *UWTs* no fue suficiente y no estuvo bien definida en aquellos proyectos con resultados negativos. Asimismo, el rendimiento de los *UWTs* se sobreestimó debido a que los valores de *EAM* y *EAC* diferían en más del 20%.

En cuanto a los *UWTs* integrados con edificios altos, se tiene a aquellos instalados en el *Bahrain World Trade Center*, que son torres gemelas de 240 m de altura y 50 pisos. Esta edificación fue diseñada para aprovechar la energía eólica a través de *HAWTs* con rotores de 3 álabes, 29 m de diámetro y 225 kW de potencia, que fueron instalados en los puentes de conexión de las torres gemelas. La instalación fue diseñada para generar entre el 11% y 15% del consumo de energía eléctrica de las torres (Smith y Killa, 2007). Similarmente, *Pearl River Tower* es un edificio de 309 m de altura y 71 pisos que fue diseñado para la amplificación de U que pasa a través suyo (Q. S. Li et al., 2016). Un total de 4 *VAWTs* de 8 m de altura se instalaron en cuatro aberturas dentro del edificio. Se tiene también al *Strata SE1*, el cual es un edificio residencial de 148 m de altura y 43 pisos, que cuenta con 3 *HAWTs* de 19.5 kW cada uno ubicado en la parte superior de la torre. Se espera que estos aerogeneradores produzcan al menos 50 MWh de electricidad al año, lo que representaría alrededor del 8% del consumo total de energía eléctrica del edificio (Alexander y Walton, 2011).

En resumen, el diseño de *UWTs* es un campo relativamente nuevo que debe estudiarse más a fondo para obtener una mejor idea de cuáles serían los aerogeneradores más adecuados para operar bajo las condiciones de viento imprevisible de los ambientes urbanos; dichas condiciones pueden disminuir el rendimiento energético de los aerogeneradores, cuando estos no son instalados en las zonas adecuadas (posicionamiento adecuado). En este sentido, el enfoque *CFD* se presenta como una herramienta poderosa para la evaluación del potencial energético del viento y el comportamiento de los aerogeneradores que operan en condiciones de viento urbano. Por lo expuesto, es necesario estudiar el diseño *CFD* y posicionamiento de los *UWTs*. Consecuentemente, en esta parte de la investigación se desarrolla un protocolo para la *SLR* asociada con el diseño *CFD* y posicionamiento de *UWTs*, con la cual se obtendrá aquella literatura científica adecuada para el análisis y discusión de los avances más recientes en este campo de estudio. En la *SLR* se propusieron las siguientes preguntas de investigación:

- **Pregunta 1:** ¿Cuáles son las etapas del diseño *CFD* de los *UWTs*?
- **Pregunta 2:** ¿Cuáles son los modelos y métodos utilizados en el diseño *CFD* y posicionamiento de los *UWTs*?
- **Pregunta 3:** ¿Cuáles son las variables principales analizadas en estos estudios?
- **Pregunta 4:** ¿Cuáles son las tendencias de investigación en este campo?

La respuesta a estas preguntas de investigación permite identificar los avances recientes y tendencias futuras relacionadas con el campo del diseño *CFD* y posicionamiento adecuado de *UWTs*.

2.2. Metodología

Como afirma Kitchenham (2004), la diferencia entre una *SLR* y una revisión bibliográfica convencional se fundamenta en que la *SLR* comienza definiendo un protocolo de revisión, el cual especifica los métodos que se utilizarán para realizar la revisión sistemática, mientras que la revisión convencional no lo hace. A continuación, se presentan los métodos utilizados para la búsqueda, selección, análisis y síntesis de la información necesaria para responder a las preguntas de investigación planteadas.

2.2.1. Estrategia de búsqueda

La búsqueda de literatura científica relacionada con el tema se realizó usando bases de datos electrónicas y búsqueda manual.

Las bases de datos electrónicas incluyeron *Scopus* y *Web of Science*. Este tipo de búsqueda se realizó utilizando una cadena de palabras representativas encontradas en los títulos, resúmenes y palabras clave de los artículos científicos. Esta cadena de palabras representativas, aplicadas a las bases de datos electrónicas, fue la siguiente:

("CFD" OR "computational fluid dynamics" OR "numerical" OR aerodynamic) AND (assessment OR design OR analysis OR study OR methodology) AND ("wind turbines" OR "wind turbine" OR "wind energy" OR "wind technology" OR "urban energy" OR "urban wind") AND ("urban environment" OR "urban area" OR "city" OR "cities" OR "building integrated" OR "building-mounted" OR "roof-mounted" OR "building-roof")

Para la búsqueda manual, se consideraron repositorios de tesis de distintas universidades e instituciones (literatura gris).

2.2.2. Criterios de inclusión

La búsqueda y selección de la literatura se restringió a artículos científicos y tesis (estudios primarios) escritos en idioma inglés. Se consideraron artículos publicados únicamente en revistas indexadas y tesis disponibles en internet desde el 1 de enero del 2000 hasta el 27 de marzo del

2020. Los artículos de revisión no fueron incluidos en esta *SLR*. Se incluyeron estudios primarios relacionados únicamente con el diseño *CFD* y posicionamiento de *UWTs*. Estos estudios presentaron al menos dos etapas del proceso de diseño *CFD* y posicionamiento de *UWTs*, el cual incluye a la validación o verificación, evaluación del potencial eólico (recurso eólico), diseño de aerogeneradores, modelado de sistemas eléctricos e integración con la red eléctrica. Se excluyeron aquellos estudios primarios que analizaron solamente la evaluación del recurso eólico o las características de los aerogeneradores.

2.2.3. Selección de estudios

La selección de estudios primarios comprendió dos partes. La primera parte incluyó el análisis de títulos y resúmenes de artículos solamente, encontrados en la búsqueda de estudios primarios. Durante los análisis, se descartaron aquellos estudios que no cumplieron los criterios de inclusión de la sección anterior. En la segunda parte, se leyeron y analizaron en su totalidad aquellos estudios que no fueron descartados en la primera parte. La información necesaria para responder a las preguntas de investigación fue extraída de los estudios leídos en su totalidad.

2.2.4. Extracción y síntesis de datos

Se extrajo sistemáticamente información relevante de todos los estudios primarios analizados en su totalidad. El conjunto de datos extraído de los estudios se sintetizó y presentó en tablas y figuras como se aprecia en la sección 2.3. Los análisis críticos fueron realizados en base a los resultados obtenidos para responder a las preguntas de investigación planteadas.

2.3. Resultados

2.3.1. Información general

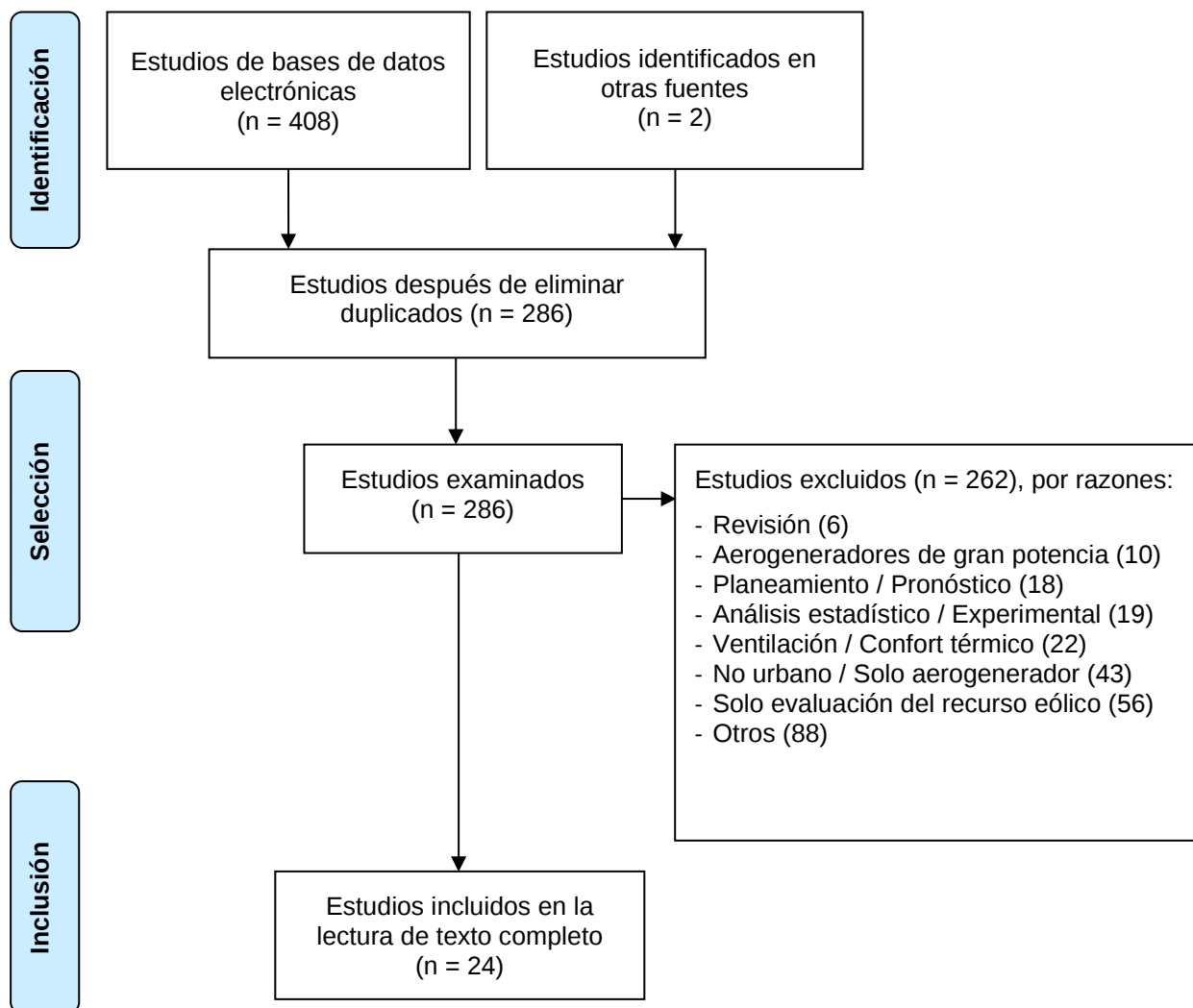
Se encontraron 247 artículos en *Scopus* y 161 en *Web of Science* (408 en total). Además, 2 tesis fueron incluidas en este estudio (literatura gris). Después de excluir los documentos duplicados, quedaron 286 estudios primarios. En la primera parte de la selección de estudios, los análisis de los títulos y resúmenes de los estudios primarios solo fueron realizados utilizando los criterios de inclusión detallados en la Sección 2.2.2. Después de los análisis, se obtuvieron 24 estudios para lectura de texto completo como se ve en la **Figura 3**. Notar que estos 24 estudios provienen de 19 fuentes bibliográficas.

Las principales razones para excluir los 262 artículos se enumeran en la **Figura 3**. En particular, 6 artículos correspondieron a trabajos de revisión y 10 estudios estuvieron relacionados con

aerogeneradores de gran potencia ubicados en zonas aisladas. Además, se excluyeron 18 artículos que contenían estudios de planificación o pronóstico. También se excluyeron los análisis estadísticos, los cuales estudian los parámetros de la curva de distribución de *Weibull*. Obsérvese que un número considerable de estudios excluidos corresponde a artículos relacionados únicamente con el diseño de aerogeneradores o la evaluación del recurso eólico, siendo estos 43 y 56, respectivamente. Fueron excluidos también aquellos estudios relacionados principalmente con energía solar, calor antropogénico, perfiles aerodinámicos, balance de energía sobre la superficie terrestre y análisis de factibilidad.

Figura 3

Diagrama PRISMA

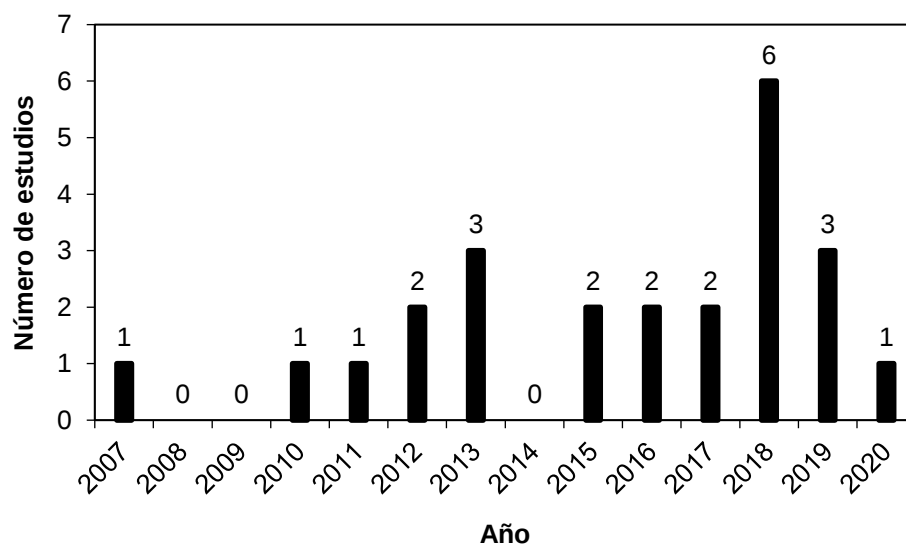


Nota. Adaptado de PRISMA.

Los estudios seleccionados fueron publicados entre 2007 y 2020 (ver **Figura 4**). En general, no existen muchos estudios asociados con el diseño *CFD* de *UWTs*. Nótese en la figura que el número de estudios publicados ha aumentado en los últimos años. Esto podría deberse al reciente desarrollo de procesadores con mayor potencia computacional, lo cual permite la utilización de modelos numéricos más complejos. Asimismo, notar que, en el año 2020 solo se registró un estudio, ya que la fecha límite de búsqueda fue el 27 de marzo del 2020.

Figura 4

Estudios primarios publicados por año



A continuación, la **Tabla 2** fue construida en base al número de veces que cada estudio primario fue citado. Esta tabla incluye solamente a los 24 estudios primarios analizados a detalle en la *SLR* (**Figura 3**). De acuerdo con la **Tabla 2**, los artículos de Balduzzi, Bianchini, Carnevale, et al. (2012) y Chong et al. (2013) fueron citados más veces que los demás trabajos. Notar que ambos artículos provienen de la misma revista (*Applied Energy*). Seguido, el artículo de Heath et al. (2007) presentó también un número relativamente alto de citaciones. Estos 3 artículos representaron alrededor del 60% del número total de citas. Mayores detalles de los hallazgos encontrados en estos 24 estudios primarios son presentados en las siguientes secciones.

Tabla 2*Ranking de citaciones*

N°	Autor	Fuente	Citaciones
1	Balduzzi, Bianchini, Carnevale, et al. (2012)	<i>Applied Energy</i>	146
2	Chong et al. (2013)	<i>Applied Energy</i>	79
3	Heath et al. (2007)	<i>Wind Energy</i>	78
4	Balduzzi, Bianchini, y Ferrari (2012)	<i>Renewable Energy</i>	46
5	Park et al. (2015)	<i>Energies</i>	21
6	Larin et al. (2016)	<i>Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics</i>	16
7	Krishnan y Paraschivoiu (2016)	<i>Sustainable Cities and Society</i>	15
8	Dilimulati et al. (2018)	<i>Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics</i>	14
9	Bianchi et al. (2013)	<i>Journal of Turbomachinery-Transactions of the ASME</i>	13
10	Arteaga-López et al. (2019)	<i>Energy</i>	9
11	Colley (2012)	<i>University of Huddersfield</i>	6
12	Guerri et al. (2010)	<i>Wind Engineering</i>	6
13	Hang et al. (2018)	<i>International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology</i>	6
14	Hassanli et al. (2018)	<i>Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics</i>	6
15	Riva et al. (2017)	<i>Politecnico Di Milano</i>	5
16	Zhu et al. (2018)	<i>Journal of Renewable and Sustainable Energy</i>	5
17	Soebiyanto et al. (2017)	<i>Chemical Engineering Transactions</i>	4
18	Cho et al. (2011)	<i>International Journal of Technology</i>	3
19	Kim et al. (2016)	<i>Remote Sensing</i>	3
20	Jafari et al. (2018)	<i>Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics</i>	2
21	Z. Li et al. (2019)	<i>Advances in Mechanical Engineering</i>	1
22	Abu-Thuraia et al. (2018)	<i>Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering</i>	0
23	Jafari et al. (2019)	<i>Energy Science y Engineering</i>	0
24	Zabarjad Shiraz et al. (2020)	<i>Sustainable Cities and Society</i>	0

2.3.2. Pregunta 1: Etapas del diseño CFD

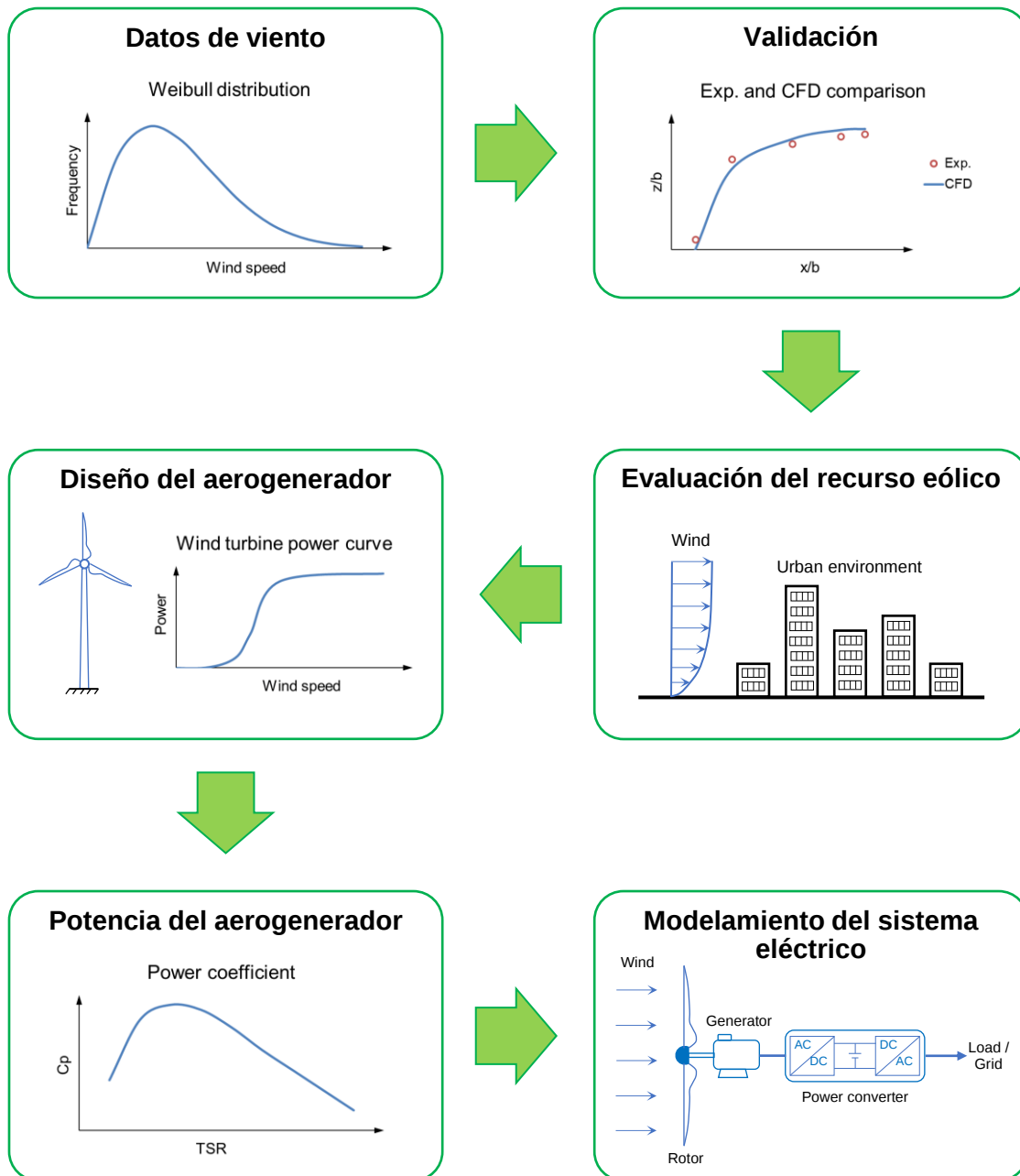
Dado que la eficiencia en costos y tiempo de cálculo de las etapas de diseño de las máquinas es fundamental en la industria de los aerogeneradores (Plaza et al., 2015), se hace necesaria la identificación y análisis detallado de dichas etapas de diseño. Por ello, a continuación, se explican cada una de las etapas del diseño CFD de los *UWTs* (ver **Figura 5**) encontradas en los estudios primarios analizados (listados en la **Tabla 2**):

- **Datos del viento:** Consiste en la recopilación y procesamiento de datos de velocidades (U) y direcciones del viento, los cuales son medidos cerca de la zona de interés.
- **Validación:** En primer lugar, se lleva a cabo un estudio de independencia de malla para determinar el número de elementos de malla necesarios para la simulación del dominio computacional. El dominio puede incluir al entorno urbano y/o a los *UWTs*. Luego, se comparan los resultados numéricos con las mediciones experimentales para conocer la concordancia entre ellos (nivel de error del modelo numérico).
- **Evaluación del recurso eólico:** Se realiza una simulación del entorno urbano (que podría incluir al *UWT* o no) con el fin de hallar el mejor posicionamiento para la instalación del *UWT* o para determinar el potencial de energía eólica en la zona de interés.
- **Diseño del aerogenerador:** Consiste en el diseño del *UWT*. Alternativamente, se puede seleccionar un *UWT* previamente diseñado.
- **Potencia del aerogenerador:** Estimación de la potencia de salida del *UWT* para las condiciones del viento específicas del entorno urbano estudiado.
- **Modelamiento del sistema eléctrico:** Modelamiento numérico del sistema eléctrico del *UWT* necesario para suministrar energía a una carga o integrarse con la red eléctrica.

Las etapas que contenían simulaciones *CFD* fueron validación, evaluación del recurso eólico y diseño de aerogeneradores. Tener en cuenta que la recopilación y el procesamiento de información adicional necesaria para modelar y simular el *UWT*, el entorno urbano y el sistema eléctrico se incluyeron implícitamente dentro de las etapas antes mencionadas.

Figura 5

Etapas de diseño de un UWT



Las etapas de diseño contenidas en los estudios primarios, y analizados en esta *SLR*, se muestran también en la **Tabla 3**. Los datos del viento utilizados en los estudios se relacionan principalmente con bases de datos de mediciones del viento de lugares específicos, los cuales fueron utilizados en las simulaciones *CFD*. Tener en cuenta que las técnicas convencionales para

estimar las características del viento implican la instalación de anemómetros y la medición de U por lo menos durante todo un año (Heath et al., 2007). Las mediciones del viento generalmente son realizadas por institutos, universidades y centros meteorológicos que solamente presentan los datos de mediciones de puntos específicos, pero no las mediciones detalladas del campo de velocidades del viento sobre un área, dentro de una ciudad, como en Allwine y Flaherty (2006). Notar que dichas mediciones detalladas pueden ser importantes para validar modelos numéricos en la etapa de validación. Por otro lado, Kim et al. (2016) llevaron a cabo una campaña de teledetección durante dos meses para obtener datos del viento en Seúl. Estas mediciones luego se ampliaron hasta un año. Se emplearon sensores remotos *Lidar* y *Sodar*. Algunos autores no mencionaron las fuentes de sus datos de viento.

En la etapa de validación, los resultados numéricos de las simulaciones *CFD* se compararon principalmente con mediciones realizadas en túnel del viento (**Tabla 3**), las cuales incluyeron velocidades del viento, presiones, torque y coeficientes adimensionales. En particular, tres autores no mostraron sus resultados de validación. Nótese que los resultados numéricos de un estudio pueden perder veracidad si los autores no presentan claramente los resultados de la etapa de validación. Notar también que no habría suficientes mediciones del viento, disponibles en la literatura científica, para validar completamente los resultados numéricos del comportamiento del viento en ambientes urbanos.

Dentro de la etapa de evaluación del recurso eólico, la mayoría de los autores (50% de los estudios) simularon un solo edificio en sus análisis *CFD*. Mientras tanto, Zhu et al. (2018) tuvieron en cuenta 2 edificios. Asimismo, algunos autores consideraron un arreglo de edificios para estudiar el comportamiento del flujo de viento. Por otro lado, otros autores consideraron un entorno urbano completo (29% de los estudios); estos estudios mostraron un comportamiento del flujo del viento más realista que los arreglos antes mencionados. Nótese que en todos los estudios primarios se realizaron simplificaciones geométricas a los ambientes urbanos, lo cual claramente afecta al modelamiento del flujo del viento como se muestra en Ricci et al. (2017). Como se aprecia en la **Tabla 3**, no se consideró la etapa de evaluación del recurso eólico en el trabajo de Chong et al. (2013), ya que estos autores solo consideraron una parte del edificio en sus experimentos, mas no en sus simulaciones numéricas.

Con respecto a las velocidades del viento simuladas, los autores utilizaron mayormente un solo valor de U a una altura específica, como referencia para el cálculo de la capa límite atmosférica. Este cálculo se realizó por medio de la ley de potencia o la ley logarítmica, las cuales no imitan

completamente el comportamiento real del viento, lo que afectaría también el modelamiento del flujo pasando alrededor de los edificios. La afectación al comportamiento del viento, a su vez, modifica el valor de la potencia de salida de los aerogeneradores simulados en un lugar específico. De manera similar, la mayoría de los autores prefirieron simular solamente una dirección del viento, la de mayor incidencia. Por el contrario, Hassanli et al. (2018), Zhu et al. (2018) y Jafari et al. (2019) simularon varias direcciones del viento para tener un espectro completo del potencial de este en la zona de estudio. En particular, Soebiyanto et al. (2017) consideraron las velocidades y direcciones del viento dependiendo de las estaciones del año, lo cual sería una representación más realista dentro de un entorno urbano.

Se prefirió la selección de aerogeneradores (71% de los estudios) al diseño. En particular, los estudios destinados a lograr un mejor rendimiento de los aerogeneradores eligieron el diseño en lugar de la selección. Por el contrario, se optó por la selección del aerogenerador cuando los análisis del factor de amplificación de velocidad del viento (A_f) y la producción de energía fueron los objetivos principales. Tener en cuenta que el ángulo de inclinación del aerogenerador puede modificar su coeficiente de potencia (C_p), por lo que la selección de la tipología del aerogenerador es muy importante para estimar la energía total producida por este (Balduzzi, Bianchini, y Ferrari, 2012). Ya que en la investigación de Cho et al. (2011) solo se calculó el A_f , sin considerar un tipo de *UWT*, no se tuvo en cuenta la etapa de diseño del aerogenerador.

La etapa de estimación de la potencia del aerogenerador incluyó cálculos de A_f , C_p , coeficiente de torque (C_T) y producción de energía. Más detalles de los resultados de esta etapa se discutirán en la Sección 3.1.4. Notar que, mediciones confiables del rendimiento de los *UWTs* aún son limitadas (Dilimulati et al., 2018). Nótese también que la adaptabilidad estructural de los *UWTs* a los entornos urbanos aún no ha sido probada (Balduzzi, Bianchini, Carnevale, et al., 2012).

El modelamiento del sistema eléctrico solamente fue llevado a cabo por Z. Li et al. (2019), usando *MATLAB*. Los autores incluyeron un aerogenerador tipo Senegal y un arreglo de paneles fotovoltaicos como generadores de energía eléctrica. Nótese que los autores consideraron alimentar una carga local sin interconexión con la red eléctrica.

En general, existe la necesidad de enfoques de diseño más integrados como se indica en Bianchini (2019), ya que los estudios analizados aquí no tomaron en cuenta otros campos de estudio dentro de sus etapas de diseño, los cuales son importantes para el diseño adecuado de las máquinas, como son los análisis estructurales y económicos.

Tabla 3

Etapas de diseño de los UWTs incluidas en los estudios primarios

Autor	Datos del viento		Validación	Evaluación del recurso eólico				Diseño del aerogenerador		Potencia UWT	Sistema eléctrico
	Medido	Base datos		Edificio	2 edificios	Arreglo edificios	Ambiente urbano	Selección	Diseño		
Balduzzi, Bianchini, Carnevale, et al. (2012)		X	X				X	X		X	
Chong et al. (2013)		X	X					X		X	
Heath et al. (2007)		X	X			X		X		X	
Balduzzi, Bianchini, y Ferrari (2012)		X	X			X		X		X	
Park et al. (2015)		X	X	X					X	X	
Larin et al. (2016)			X	X					X	X	
Krishnan y Paraschivoiu (2016)			X	X					X	X	
Dilimulati et al. (2018)		X	X				X		X	X	
Bianchi et al. (2013)		X	X			X		X		X	
Arteaga-López et al. (2019)		X					X	X		X	
Colley (2012)		X	X	X				X		X	
Guerri et al. (2010)			X	X				X		X	
Hang et al. (2018)		X	X	X				X		X	
Hassanli et al. (2018)		X	X	X				X		X	
Riva et al. (2017)							X	X		X	
Zhu et al. (2018)		X	X		X			X		X	

Autor	Datos del viento		Validación	Evaluación del recurso eólico				Diseño del aerogenerador		Potencia <i>UWT</i>	Sistema eléctrico
	Medido	Base datos		Edificio	2 edificios	Arreglo edificios	Ambiente urbano	Selección	Diseño		
Soebiyan et al. (2017)		X	X				X	X		X	
Cho et al. (2011)				X						X	
Kim et al. (2016)	X		X				X	X		X	
Jafari et al. (2018)		X	X	X					X	X	
Z. Li et al. (2019)		X	X	X					X	X	X
Abu-Thuraia et al. (2018)			X	X					X	X	
Jafari et al. (2019)		X	X	X				X		X	
Zabarjad Shiraz et al. (2020)		X	X				X	X		X	

2.3.3. Pregunta 2: Modelos y métodos

Las condiciones del viento (velocidades y direcciones) encontradas en los entornos urbanos pueden cambiar significativamente según la topología de los edificios encontrados allí. Por ello, es necesario la realización de simulaciones *CFD* de dichos entornos para analizar con precisión el efecto que tendrán los edificios sobre las condiciones del viento (Kim et al., 2016). También, es importante determinar correctamente las condiciones iniciales de las variables que se utilizarán durante las simulaciones *CFD*, para poder obtener resultados numéricos confiables (Arteaga-López et al., 2019). Por lo tanto, los análisis de modelos y métodos ofrecen la oportunidad de determinar la configuración más adecuada para resolver el problema específico de los *UWTs* que operan en entornos urbanos. A su vez, los modelos y métodos utilizados en los estudios primarios y sus parámetros *CFD* asociados se muestran en la **Tabla 4**.

Como se aprecia en la **Tabla 4**, *Fluent* fue el *solver* más utilizado en los estudios primarios (50%). Por otro lado, Guerri et al. (2010) implementaron su propio código *CFD*. Todos los autores utilizaron el enfoque *RANS* para sus simulaciones debido a su costo computacional relativamente bajo en comparación con los enfoques *Large Eddy Simulation (LES)* y *Direct Numerical Simulation (DNS)*. Notar que los resultados numéricos obtenidos con los enfoques *LES* y *DNS* están más acorde con las mediciones del viento, realizadas alrededor de los edificios individuales, en comparación con el enfoque *RANS*, como se muestra en la investigación de Liu y Niu (2016).

La mayoría de los autores (ver **Tabla 4**) modelaron tanto la edificación (edificio único o entorno urbano) como el *UWT* en un dominio dimensional 2D o 3D (58% de los estudios). Tener en cuenta que la descripción más precisa del entorno urbano real solo puede garantizarse mediante simulaciones 3D de lugares específicos (Balduzzi, Bianchini, Carnevale, et al., 2012). De acuerdo con la literatura estudiada, los *UWTs* se colocaron principalmente sobre el techo de un edificio para aprovechar el fenómeno de amplificación de la velocidad del viento, ya que U puede aumentar en dichas zonas debido a la forma de los edificios (Cho et al., 2011). Notar también que el diseño integrado del edificio y el aerogenerador es esencial (Krishnan & Paraschivoiu, 2016). Por otro lado, Zhu et al. (2018) posicionaron el aerogenerador entre dos edificios para aprovechar la amplificación de U encontrada allí.

El modelo de turbulencia *Standard $k - \varepsilon$* fue el más utilizado en los estudios primarios (42%), como se aprecia en la **Tabla 4**. El valor de y^+ se consideró de acuerdo con los requisitos del

modelo de turbulencia usado en cada estudio. Generalmente, las condiciones de contorno se establecieron en las simulaciones como *velocity-inlet* (entrada de velocidad), *pressure-outlet* (salida de presión), *symmetry* (simetría) y *wall* (pared). El estado estacionario fue el más utilizado. En algunos estudios, no se presentó información sobre los pasos temporales de la simulación transitoria, por lo que sería difícil reproducir los resultados de dichos estudios. Tener en cuenta que solo Zhu et al. (2018) y Colley (2012) mencionaron el tiempo computacional total que requirieron para sus simulaciones numéricas, 40 h y 8 - 10 h, respectivamente.

Nótese que el modelamiento del dominio rotativo (**Tabla 4**), el cual se realiza usando el enfoque *MRF* o *sliding mesh*, corresponde a aquellas simulaciones que incluyeron a los aerogeneradores.

Las características del dominio computacional y la malla de los estudios primarios se presentan en la **Tabla 5**. Kim et al. (2016) modelaron un entorno urbano que contenía un edificio de 555 m de altura, por lo que construyeron un dominio tridimensional (3D) relativamente grande, el cual tuvo 90'000 000 elementos no estructurados. Del mismo modo, otros estudios contienen gran cantidad de elementos, con los cuales es posible modelar entornos urbanos completos.

En los trabajos analizados en la **Tabla 5**, fue común ver estudios de independencia de malla. Obsérvese que el propósito del estudio de independencia de malla es escoger aquella malla que presenta resultados numéricos que no son afectados por refinamientos mayores (Larin et al., 2016).

La forma rectangular (*REC*) del dominio computacional (hexagonal en 3D) fue la más utilizada debido a su facilidad de construcción (88% de los estudios), en comparación con las formas octogonal (*OCT*) y tipo C. Asimismo, se prefirieron mallas no estructuradas para modelar los *UWTs* (mayores detalles en la **Tabla 5**). Tener en cuenta que una malla no estructurada (*UST*) es más fácil de construir en comparación con una malla estructurada (*ST*), pero los resultados obtenidos con la malla *UST* son menos precisos que aquellos obtenidos con la malla *ST*.

Tabla 4

Modelos y métodos usados en los estudios primarios

Autor	Software	Edificio / UWT	Dimensión	Altura max. edificio (m)	Modelo de turbulencia	Tipo de simulación	Modelamiento del dominio rotativo
Balduzzi, Bianchini, Carnevale, et al. (2012)	<i>OpenFOAM</i>	Edificio	2D	54.4 y 27.2	<i>Standard k – ε</i>	Estacionario	-
Chong et al. (2013)	<i>Fluent</i>	UWT	2D	-	<i>SST k – ω</i>	Transitorio	<i>Sliding mesh</i>
Heath et al. (2007)	<i>CFX</i>	Edificio	3D	10	<i>Standard k – ε</i>	Transitorio	-
Balduzzi, Bianchini, y Ferrari (2012)	<i>OpenFOAM</i>	Edificio	2D	54.4 y 27.2	<i>Standard k – ε</i>	Estacionario	-
Park et al. (2015)	<i>Fluent</i>	Edificio / UWT	2D	5	<i>Standard k – ω</i>	Estacionario / Transitorio	<i>Sliding mesh</i>
Larin et al. (2016)	<i>Fluent</i>	Edificio / UWT	2D / 3D	30.48	<i>Realizable k – ε</i>	Transitorio	<i>Sliding mesh</i>
Krishnan y Paraschivoiu (2016)	<i>Fluent</i>	Edificio / UWT	3D	30.48	<i>Realizable k – ε</i>	Transitorio	<i>Sliding mesh</i>
Dilimulati et al. (2018)	<i>Fluent</i>	Edificio	3D	28.45	<i>Realizable k – ε</i>	Estacionario	-
Bianchi et al. (2013)	<i>OpenFOAM</i>	Edificio	2D	54.4 y 27.2	<i>Standard k – ε</i>	Estacionario	-
Arteaga-López et al. (2019)	<i>Solidworks</i>	Edificio / UWT	3D	-	<i>Standard k – ε</i>	Estacionario	-
Colley (2012)	<i>Fluent</i>	Edificio / UWT	2D / 3D	5.5	<i>Standard k – ε</i>	Estacionario / Transitorio	<i>MRF / Sliding mesh</i>
Guerri et al. (2010)	-	Edificio	3D	9.1	<i>Standard k – ω</i>	Estacionario	-
Hang et al. (2018)	<i>Fluent</i>	Edificio / UWT	2D	10.2	<i>SST k – ω</i>	Transitorio	<i>Sliding mesh</i>
Hassanli et al. (2018)	<i>Fluent</i>	Edificio / UWT	3D	180	<i>SST k – ω</i>	Estacionario	-
Riva et al. (2017)	<i>OpenFOAM</i>	Edificio / UWT	3D	-	<i>Standard k – ε</i>	Transitorio	-
Zhu et al. (2018)	<i>Fluent</i>	Edificio / UWT	2D	-	<i>Realizable k – ε</i>	Transitorio	<i>Sliding mesh</i>
Soebiyani et al. (2017)	<i>Win Air</i>	Edificio	3D	97.5	-	Estacionario	-
Cho et al. (2011)	<i>Fluent</i>	Edificio	3D	64	<i>Standard k – ε</i>	Estacionario	-
Kim et al. (2016)	<i>SC/Tetra</i>	Edificio	3D	555	<i>Standard k – ε</i>	Estacionario	-

Autor	Software	Edificio / UWT	Dimensión	Altura max. edificio (m)	Modelo de turbulencia	Tipo de simulación	Modelamiento del dominio rotativo
Jafari et al. (2018)	<i>Fluent</i>	Edificio / UWT	3D	-	<i>SST 4-eq $k - \omega$</i>	Estacionario	<i>MRF</i>
Z. Li et al. (2019)	<i>CFX</i>	Edificio / UWT	3D	-	<i>Standard $k - \varepsilon$</i>	Transitorio	<i>Sliding mesh</i>
Abu-Thuraia et al. (2018)	<i>STAR CCM+</i>	Edificio / UWT	3D	30.48	<i>Realizable $k - \varepsilon$</i>	Transitorio	<i>Sliding mesh</i>
Jafari et al. (2019)	<i>Fluent</i>	Edificio / UWT	3D	96	<i>SST $k - \omega$</i>	Estacionario	<i>MRF</i>
Zabarjad Shiraz et al. (2020)	<i>Fluent</i>	Edificio / UWT	3D	30 y 142	<i>Realizable $k - \varepsilon$</i>	Transitorio	<i>Sliding mesh</i>

Tabla 5

Dominio computacional y características de las mallas

Autor	Dimensión	Forma del dominio	Tipo de malla	Número de elementos
Balduzzi, Bianchini, Carnevale, et al. (2012)	2D	REC	S	80 000
Chong et al. (2013)	2D	REC	S	209 554
Heath et al. (2007)	3D	REC	UST	-
Balduzzi, Bianchini, y Ferrari (2012)	2D	REC	S	80 000
Park et al. (2015)	2D	REC	S	-
Larin et al. (2016)	2D / 3D	REC	UST	5'000 000
Krishnan y Paraschivoiu (2016)	3D	REC	UST	6'800 000
Dilimulati et al. (2018)	3D	OCT	UST	2'700 000
Bianchi et al. (2013)	2D	REC	S	80 000
Arteaga-López et al. (2019)	3D	REC	S	176 260
Colley (2012)	2D / 3D	REC	S / UST	3'200 000
Guerri et al. (2010)	3D	REC	S	1'320 000
Hang et al. (2018)	2D	REC	S	152 326
Hassanli et al. (2018)	3D	REC	S	7'000 000
Riva et al. (2017)	3D	REC	S / UST	1'000 000
Zhu et al. (2018)	2D	Tipo C	S / UST	421 092
Soebiyani et al. (2017)	3D	REC	S / UST	-
Cho et al. (2011)	3D	REC	-	-
Kim et al. (2016)	3D	REC	UST	90'000 000
Jafari et al. (2018)	3D	REC	S / UST	4'078 320
Z. Li et al. (2019)	3D	REC	UST	780 000
Abu-Thuraia et al. (2018)	3D	REC	UST	10'850 000
Jafari et al. (2019)	3D	REC	S / UST	5'128 740
Zabarjad Shiraz et al. (2020)	3D	OCT	UST	33'000 000

2.3.4. Pregunta 3: Variables principales

Las variables principales identificadas en los estudios primarios se muestran en la **Tabla 6**. Como se observa, la mayoría de los autores utilizaron *VAWTs*, como *Darrieus* y *Savonius*, para calcular las variables principales, las cuales fueron A_f , C_p y C_T . La producción de energía total, calculada en Heath et al. (2007), Arteaga-López et al. (2019), Soebiyani et al. (2017) y Kim et al. (2016), no se consideró en la **Tabla 6** porque es una variable que depende de la P_N de los *UWTs*, lo que la hace inadecuada para comparar diferentes resultados.

Nótese que la capacidad de arranque y la independencia que muestran los *VAWTs* en relación con la dirección del viento los hace atractivos para su uso en entornos urbanos (Larin et al., 2016). Los *HAWTs* convencionales, que ofrecen una tecnología relativamente más madura, generalmente no superan a los *VAWTs* en aplicaciones urbanas, debido a los altos niveles de turbulencia que se encuentran en este tipo de entornos (Dilimulati et al., 2018), es decir, los *VAWTs* que operan en entornos urbanos tienen mayormente un mejor rendimiento que los *HAWTs*. Además, los *VAWTs* muestran niveles más bajos de vibración y ruido en comparación con los *HAWTs* (Cho et al., 2011). Por otro lado, algunos autores utilizaron sistemas de amplificación de la velocidad del flujo del viento como *shrouds* (envolventes o carcasas). Asimismo, otros autores colocaron a los *UWTs* dentro de edificios diseñados para amplificar la velocidad del viento local. En particular, los sistemas de amplificación de la velocidad del viento, que utilizan toberas-difusores y/o cubiertas integradas con aerogeneradores convencionales, generan un aumento significativo de su C_p (Dilimulati et al., 2018).

El máximo A_f , con valor de 1.8, correspondió a la investigación de Hassanli et al. (2018), quienes evaluaron el rendimiento de un sistema llamado *Double Skin Façade*, dentro del cual estaban ubicados aerogeneradores comerciales *Ampair*. Nótese que un inconveniente de este sistema es la ocupación de un área específica dentro de un piso del edificio.

Con respecto al C_p , Hang et al. (2018) registraron el mayor valor de 0.4627, utilizando un sistema *Eco-roof* como dispositivo de amplificación y un aerogenerador *Darrieus*. Mientras que Chong et al. (2013) obtuvieron el valor del C_t más alto (0.4195) utilizando un aerogenerador *H-Darrieus* y un dispositivo llamado *Omni-Direction-Guide-Vane* como sistema de amplificación. Nótese que el máximo valor teórico del C_p de un aerogenerador *Troposkein Darrieus*, sin dispositivo de amplificación, fue de 0.4, como se observa en Hütter (1942). Nótese también que los aerogeneradores *Darrieus* son considerados como una de las soluciones más atractivas para entornos urbanos debido a su bajo impacto visual, emisiones acústicas reducidas y su mejor respuesta a flujos de viento turbulentos (Balduzzi, Bianchini, Carnevale, et al., 2012).

Tabla 6

Variables principales analizadas en los estudios primarios

Autor	Tipo de turbina	Denominación del aerogenerador	Sistema de amplificación	Valor máximo del coeficiente
Balduzzi, Bianchini, Carnevale, et al. (2012)	<i>VAWT</i>	<i>H-Darrieus</i>	No	$A_f = 1.06$
Chong et al. (2013)	<i>VAWT</i>	<i>H-Darrieus</i>	Si	$C_T = 0.4195$
Heath et al. (2007)	<i>HAWT</i>	<i>Swift</i>	No	-
Balduzzi, Bianchini, y Ferrari (2012)	<i>HAWT / VAWT</i>	<i>Darrieus</i>	No	$A_f = 1.06$
Park et al. (2015)	<i>VAWT</i>	<i>Savonius, GWE-200BI</i>	Si	$C_p = 0.381$
Larin et al. (2016)	<i>VAWT</i>	<i>Savonius</i>	No	$C_p = 0.24$
Krishnan y Paraschivoiu (2016)	<i>VAWT</i>	<i>Savonius</i>	Si	$C_p = 0.34$
Dilimulati et al. (2018)	<i>VAWT</i>	<i>Darrieus</i>	Si	$A_f = 1.6$
Bianchi et al. (2013)	<i>HAWT</i>	-	No	$A_f = 1.06$
Arteaga-López et al. (2019)	<i>HAWT</i>	<i>Bergey Excel</i>	No	-
Colley (2012)	<i>VAWT</i>	<i>Savonius</i>	Si	$C_p = 0.24$
Guerri et al. (2010)	<i>VAWT</i>	<i>Darrieus</i>	No	$A_f = 1.156$
Hang et al. (2018)	<i>VAWT</i>	<i>Darrieus</i>	Si	$A_f = 1.63, C_p = 0.4627, C_T = 0.1851$
Hassanli et al. (2018)	<i>HAWT</i>	<i>Ampair</i>	Si (edificio)	$A_f = 1.8$
Riva et al. (2017)	<i>VAWT</i>	<i>UNH-RVAT</i>	No	$C_p = 0.246$
Zhu et al. (2018)	<i>VAWT</i>	<i>Darrieus</i>	Si (edificio)	$A_f = 1.68, C_T = 0.7833$
Soebiyanto et al. (2017)	<i>HAWT / VAWT</i>	<i>AirForce 10, Power works 100, Sky stream 3.7, Aeolos v 3kW, UGE-9M</i>	No	-
Cho et al. (2011)	<i>HAWT / VAWT</i>	-	Si (edificio)	$A_f = 1.4$
Kim et al. (2016)	<i>HAWT / VAWT</i>	<i>GWE-10KH / Excel-S</i>	No	-
Jafari et al. (2018)	<i>LCWT</i>	<i>PowerWindow</i>	Si (edificio)	$C_p = 0.16$
Z. Li et al. (2019)	<i>VAWT</i>	<i>Senegal type</i>	No	$C_p = 0.134$
Abu-Thuraia et al. (2018)	<i>VAWT</i>	<i>Savonius</i>	Si	$C_p = 0.336$
Jafari et al. (2019)	<i>LCWT / HAWT</i>	<i>PowerWindow / Ampair</i>	Si (edificio)	$C_p = 0.16$
Zabarjad Shiraz et al. (2020)	<i>VAWT</i>	<i>Troposkein</i>	No	$C_p = 0.4$

2.3.5. Pregunta 4: Tendencias de investigación

En esta sección se evaluaron dos tendencias de investigación correspondientes a los *BMWTs* y a los aerogeneradores integrados con los edificios (*BIWTs*). Los *BMWTs* se refieren a aquellos

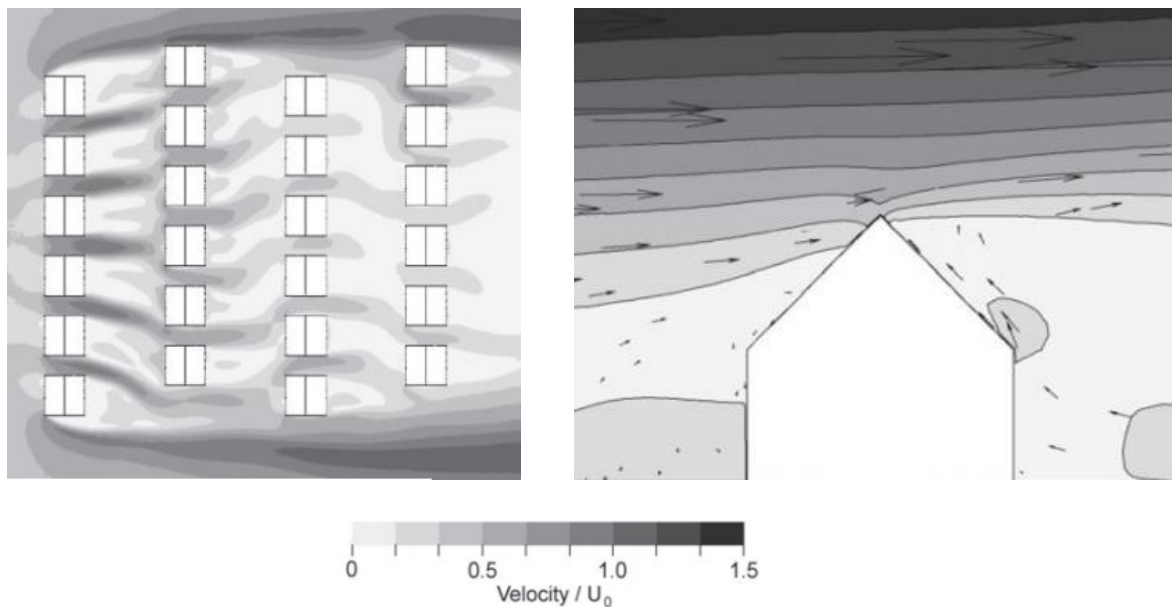
aerogeneradores instalados sobre las azoteas de los edificios, los cuales sirven como torres altas para dicha instalación (Arteaga-López et al., 2019). Por otro lado, los aerogeneradores que son instalados en edificios especiales (edificios que fueron diseñados teniendo en cuenta a los aerogeneradores, es decir, edificios que se diseñaron planificando que en ellos serían instalados ciertos aerogeneradores) se conocen como *BIWTs* (Arteaga-López et al., 2019). Notar que, en esta tesis, aquellos *UWTs* cuyo flujo del viento es amplificado por los edificios se incluyeron dentro de los *BIWTs*.

2.3.5.1. Aerogeneradores montados en edificios

Uno de los primeros trabajos de diseño *CFD* correspondió a Heath et al. (2007), quienes propusieron una metodología para estimar la producción de energía de un *BMWT* a partir de información simple como la velocidad del viento, extraído del atlas de viento, y las características topológicas de las estructuras ubicadas dentro del ambiente urbano. Los autores analizaron el comportamiento del flujo del viento alrededor de 24 casas como se visualiza en la **Figura 6**. Para todas las ubicaciones, los resultados numéricos mostraron una variación en la producción de energía con respecto al cambio en la dirección del viento incidente.

Figura 6

Magnitud normalizada de la velocidad del viento: Vista en planta a la altura media del arreglo de casas (izquierda), y vista en elevación de una casa (derecha)



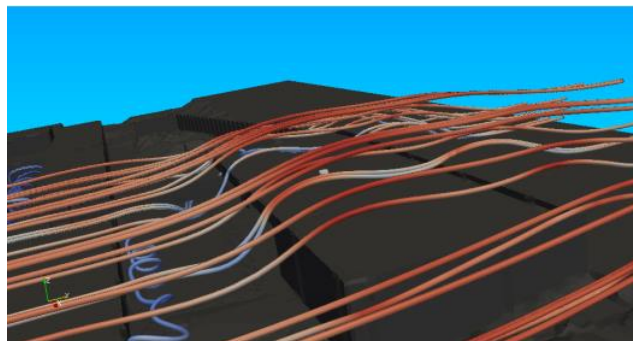
Nota. Tomado de Heath et al. (2007).

Guerri et al. (2010) evaluaron el rendimiento aerodinámico de un *VAWT* montado en la azotea de un edificio (aislado), es decir, un *BMWT*, utilizando *CFD* y código basado en la teoría *BEM*. Los valores del C_p del *BMWT* fueron más altos que aquellos de un aerogenerador ubicado en una zona rural, mostrando relaciones $C_{p,max}/C_{p,rural}$ entre 1.36 y 1.57.

Más recientemente, Riva et al. (2017) evaluó el impacto del entorno urbano sobre el rendimiento de un *BMWT*. La **Figura 7** muestra las líneas de velocidad del flujo pasando alrededor del aerogenerador y los edificios estudiados. Se probaron 3 ubicaciones para el aerogenerador (Posición 1, Posición 2 y Posición 3). Cuando el *BMWT* fue colocado en la Posición 2, este presentó casi la misma U (9.95 m/s) que en la Posición 1 (9.75 m/s, $C_p = 0.23$), pero una menor eficiencia ($C_p = 0.17$), lo cual resultó en una reducción del 22% de la producción total de energía. El aerogenerador colocado en la Posición 3 mostró una U baja (6.35 m/s, $C_p = 0.13$) debido a que el viento golpeaba los alrededores antes de fluir hacia arriba de la azotea. Como se aprecia en la **Figura 6** y **Figura 7**, a medida que el flujo del viento se acerca a los edificios, el flujo se desvía y acelera sobre las azoteas de estos.

Figura 7

Líneas de flujo de velocidades alrededor del aerogenerador y los edificios



Nota. Tomado de Riva et al. (2017).

Con respecto a la evaluación del recurso eólico de entornos urbanos 2D, Balduzzi, Bianchini, Carnevale, et al. (2012) desarrollaron un modelo numérico basado en *CFD* para considerar los efectos del flujo del viento oblicuo (cuando el viento no incide perpendicularmente sobre el plano de rotación de los álabes de los aerogeneradores) en el rendimiento de un aerogenerador *Darrieus* (*VAWT*) instalado en la azotea de un edificio, el cual está ubicado dentro de una ciudad europea de referencia. Los resultados mostraron un aumento de hasta 6% en la potencia del

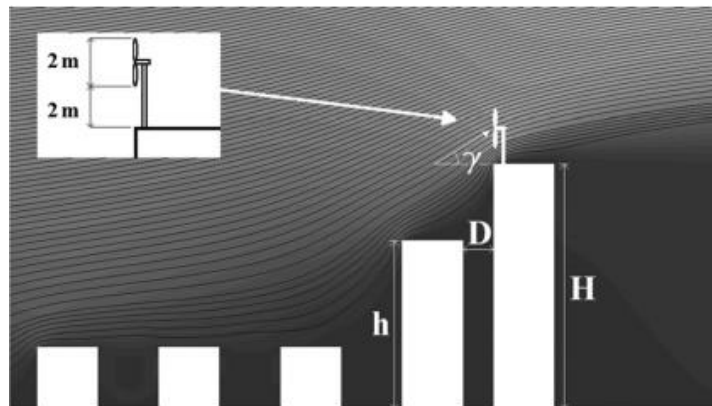
VAWT en condiciones de flujo oblicuo. Los autores concluyeron que esta mejora también podría conducir a una reducción de la velocidad mínima de arranque de la máquina, ampliando así el rango operativo del *VAWT* y aumentando la producción de energía para condiciones de velocidades bajas del viento.

Balduzzi, Bianchini, y Ferrari (2012) realizaron un análisis paramétrico *CFD* del comportamiento del viento en el techo de un edificio ubicado en un entorno urbano para evaluar la viabilidad de la instalación de *UWTs*. El análisis *CFD* se llevó a cabo caracterizando el comportamiento del viento, a una altura de 2 m por encima del borde frontal del edificio, en función de la altura del edificio donde se instala el *UWT*, la altura del edificio delantero y la distancia entre ambos edificios. El análisis también consideró la presencia de una azotea plana y una inclinada. Los resultados mostraron que el flujo del viento oblicuo tuvo un efecto negativo en la producción de energía de los *HAWTs*. Por el contrario, los *VAWTs* mejoraron su eficiencia gracias al flujo del viento oblicuo.

Además, para estimar el impacto del flujo del viento oblicuo en el rendimiento de los *HAWTs*, Bianchi et al. (2013) desarrollaron y validaron un código de simulación basado en el enfoque *BEM* (ver **Figura 8**). En caso de un ángulo de inclinación bajo (inclinación del eje del rotor del *HAWT*), se calculó una reducción de hasta el 4% del potencial de energía eólica. Por otro lado, los ángulos de inclinación más altos redujeron el potencial de energía eólica en aproximadamente un 9%.

Figura 8

Configuración utilizada en la investigación de Bianchi et al.



Nota. Tomado de Bianchi et al. (2013).

Un procedimiento para la evaluación del recurso eólico usado en *BMWTs*, fue llevado a cabo por Kim et al. (2016). Los autores utilizaron como caso de estudio a la *Lotte World Tower* (ver detalles en la **Figura 9a**). Las comparaciones entre los resultados *CFD*, tanto de U como de TI , y las mediciones *Lidar* mostraron una buena concordancia cuando no se simuló la *Lotte World Tower*. Los resultados *CFD*, cuando la *Lotte World Tower* fue simulada, mostraron que el viento sobre la azotea de la torre se vio afectado negativamente por los edificios circundantes, los cuales redujeron su velocidad en 3% en dicha zona (**Figura 9b**). Los autores determinaron que el *BMWT* podría alcanzar un factor de capacidad de 6.4%.

Soebiyanto et al. (2017) determinaron el potencial de energía eólica sobre la azotea de edificios de gran altura, los cuales estaban ubicados en un lugar con clima tropical húmedo, en función de las velocidades y direcciones del viento representativas de cada estación del año. La mayor producción de energía se obtuvo con un *HAWT* de 100 kW y una $U = 5.2$ m/s.

Li et al. (2019) investigaron un *VAWT* de tipo *Senegal* con diferentes configuraciones para encontrar un diseño óptimo que tuviera una velocidad de arranque baja. Así, se desarrolló un prototipo de 2 kW, el cual fue ubicado en la azotea de un edificio. En la **Figura 10**, los vectores de velocidad alrededor del *VAWT* son presentados. Los resultados mostraron que un obstáculo ubicado frente al *VAWT* puede influir en el campo de flujo del viento que pasa a través del rotor del aerogenerador y, por lo tanto, reducir la producción de energía del *VAWT*.

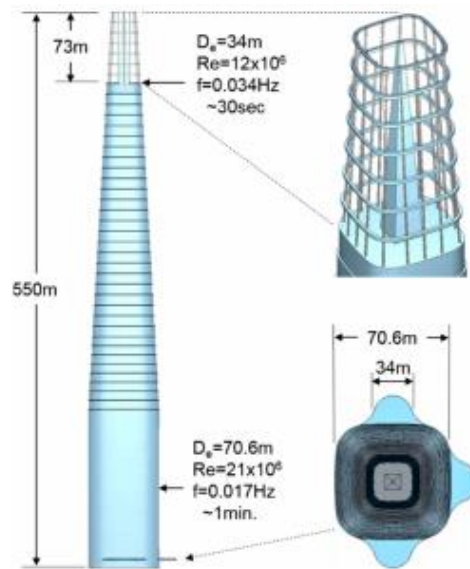
Por otro lado, Hang et al. (2018) realizaron un análisis y optimización de un accesorio en forma de V, con el cual buscaron maximizar el rendimiento de un *VAWT* instalado dentro del accesorio. La optimización consistió en variar los ángulos de inclinación del accesorio para determinar el mejor rendimiento del *VAWT* a través de simulaciones *CFD*. Durante las simulaciones se utilizaron ángulos de inclinación entre -45° y 60° . Además, se desarrolló un modelo experimental para verificar el efecto de amplificación de velocidad del viento del accesorio en forma de V. El accesorio con el ángulo de inclinación de 19.5° mostró el mayor efecto de amplificación de la velocidad del viento (63% de aumento de U) en la región vertical central del accesorio.

En cuanto a los dispositivos de amplificación para *UWTs* instalados en azoteas de edificios, Chong et al. (2013) diseñaron un nuevo *Omni-Direction-Guide-Vane* para mejorar el rendimiento de un *VAWT* tipo *H-Darrieus* (véanse los detalles del experimento en la **Figura 11**). Primero, se realizaron algunos experimentos para dos configuraciones, un *VAWT* instalado en la azotea de un edificio simulado y el *Omni-Direction-Guide-Vane* integrado con el *VAWT*. Luego, el *Omni-*

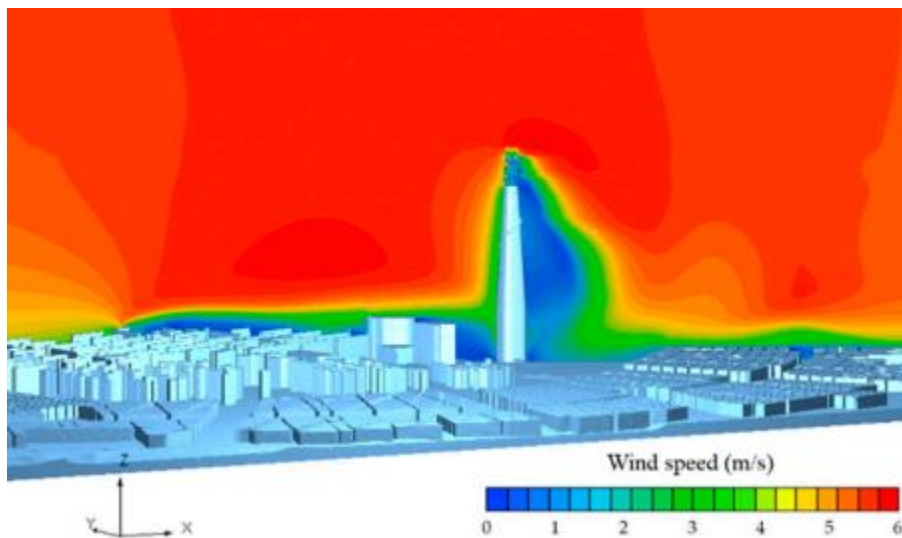
Direction-Guide-Vane integrado con el *VAWT* fue verificado usando simulaciones *CFD*. Para un *TSR* de 5.1, el C_t promedio del *VAWT* fue de 0.3681, mientras que el C_t promedio del *Omni-Direction-Guide-Vane* integrado con el *VAWT* fue de 0.4195, lo que equivale a un aumento del 38.6% en el C_t del *VAWT* cuando se le integra el *Omni-Direction-Guide-Vane*.

Figura 9

Lotte World Tower



(a)

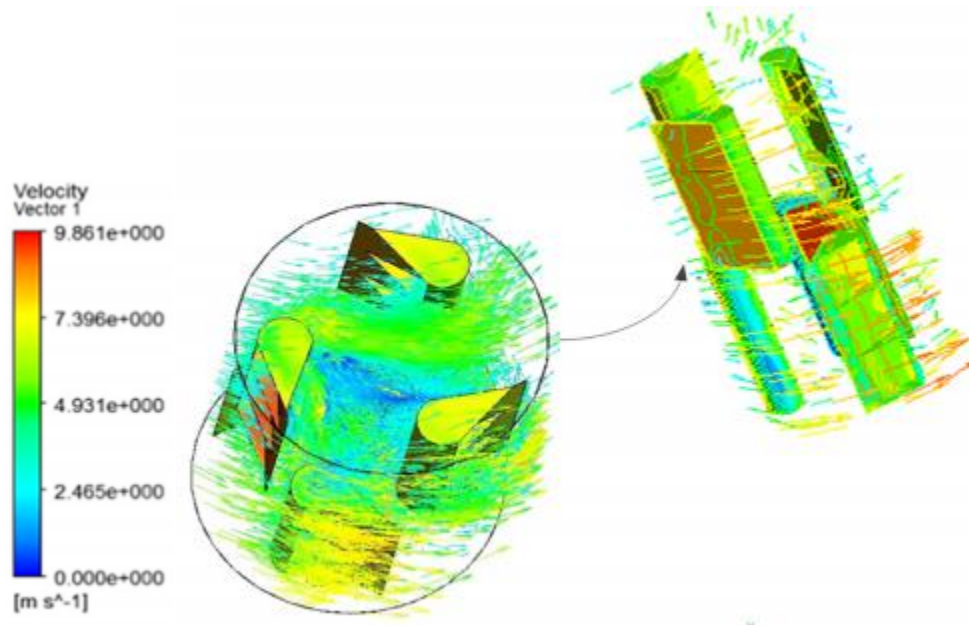


(b)

Nota. (a) Dimensiones. (b) Contornos de velocidad. Tomado de Kim et al. (2016).

Figura 10

Vectores de velocidad del aerogenerador propuesto por Li et al.



Nota. Tomado de Z. Li et al. (2019).

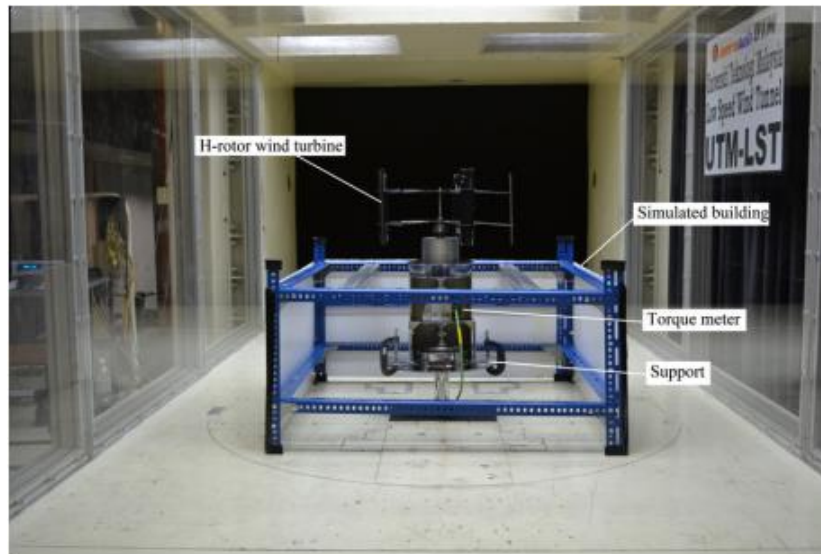
De manera similar, Colley (2012) evaluó el desempeño de un nuevo dispositivo de flujo cruzado para *UWTs*. Este dispositivo utiliza álabes guía en su estator externo para mejorar la producción de energía de los aerogeneradores. También se estudiaron los efectos asociados a la instalación de los *UWTs*. El autor obtuvo un $C_p = 0.24$ para $U = 12$ m/s. Los resultados también mostraron que la máxima cantidad de energía generada, en geometrías de azotea plana, fue lograda por un *UWT* ubicado en el lado aguas arriba de la azotea del edificio. Para esta última configuración, se obtuvo un $C_p = 0.35$, lo que representó un 71% de aumento de U .

Krishnan y Paraschivoiu (2016) llevaron a cabo un estudio para aumentar el rendimiento de un *VAWT* tipo *Savonius* integrado con una cubierta en forma de difusor (diseño inicial), que fue posicionado sobre la azotea de un edificio. En el estudio se llevaron a cabo tres modificaciones al diseño inicial: la incorporación de una brida en el extremo del difusor, la eliminación de la puerta frontal, y algunos cortes en el extremo de los álabes del *VAWT*. El C_p del diseño final fue mejorado de 0.135 a 0.34 gracias a las modificaciones realizadas (ver las líneas de flujo en la **Figura 12**). Similarmente, Larin et al. (2016) propusieron una configuración horizontal de un *VAWT* tipo *Savonius* para ser ubicada en el borde frontal de un edificio. Los autores investigaron

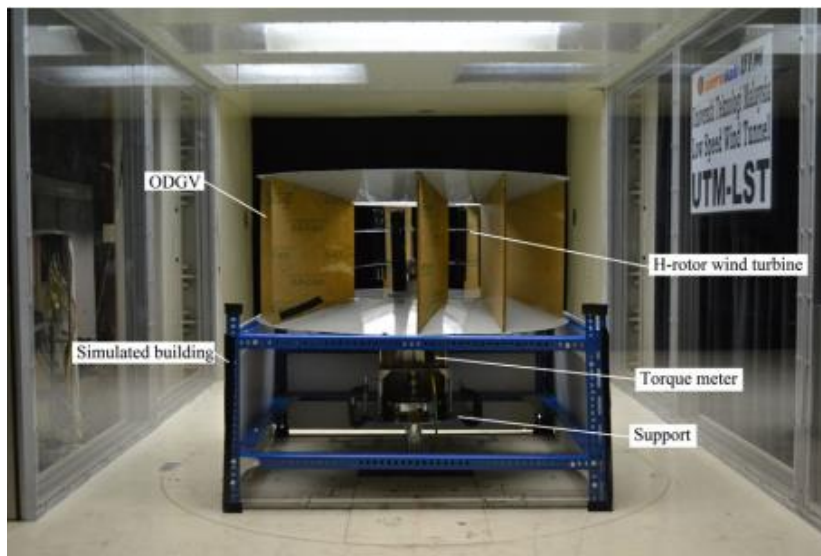
parámetros como la posición, el número de álabes y la longitud circunferencial del *VAWT*. La configuración óptima mostró un aumento del C_p de 0.043 a 0.24, es decir, una mejora del 450%.

Figura 11

Detalles del experimento del aerogenerador H-Darrieus



(a)

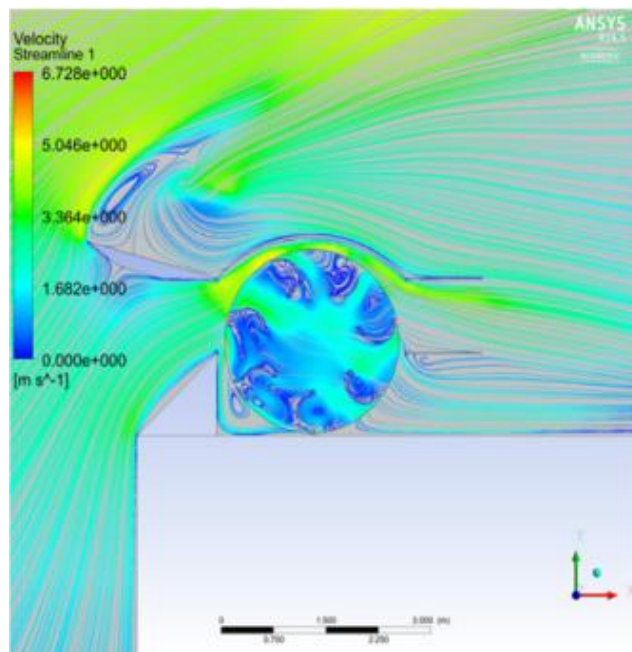


(b)

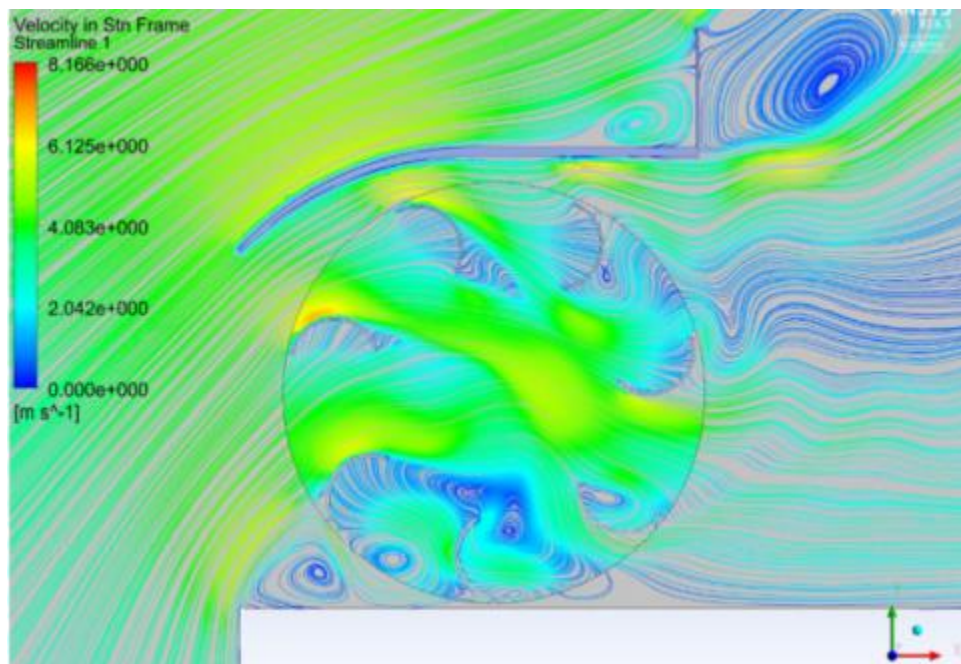
Nota. (a) Sin Omni-Direction-Guide-Vane. (b) Con Omni-Direction-Guide-Vane. Tomado de Chong et al. (2013).

Figura 12

Líneas de flujo de velocidad alrededor del VAWT



(a)



(b)

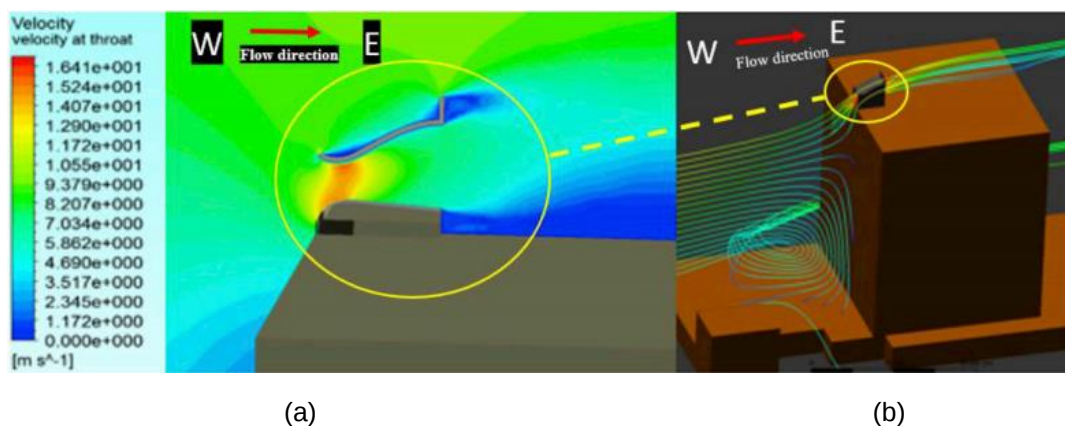
Nota. (a) Diseño inicial. (b) Diseño final. Tomado de Krishnan y Paraschivoiu (2016).

Además, Abu-Thuraia et al. (2018) estudiaron el rendimiento de un *VAWT* tipo *Savonius* de siete álabes que estaba orientado horizontalmente. Este aerogenerador fue integrado dentro de una cubierta en forma de difusor. Algunos álabes guía fueron simulados delante de la cubierta del difusor para mejorar el rendimiento del *VAWT*. Nótese que este aerogenerador fue estudiado también en el pasado por Larin et al. (2016) y Krishnan y Paraschivoiu (2016). El análisis realizado indicó que el *VAWT* tipo *Savonius* puede alcanzar un C_p máximo de 0.33 con un ángulo de inclinación de los álabes de 55° . Obsérvese que este valor de C_p fue menor que el obtenido con el caso inicial (sin álabes guía, $C_p = 0.394$).

Adicionalmente a estos estudios, Dilimulati et al. (2018) también estudiaron un dispositivo en forma de difusor con bridas (tobera-difusor), el cual podría integrarse con un *VAWT* orientado horizontalmente. Los autores simularon el dispositivo sobre la azotea de un edificio con el fin de mejorar el rendimiento del *VAWT*. Los resultados del estudio pueden apreciarse en la **Figura 13**, donde el color rojo representa velocidades máximas de 16.24 m/s y el color azul indica las zonas con bajas velocidades de viento y altos niveles de turbulencia. Los resultados mostraron que la velocidad del viento dentro del difusor podría acelerarse hasta 1.6 veces (color rojo) con respecto a la velocidad del viento incidente (color verde). Esta aceleración del viento se daría en las proximidades de la garganta del sistema tobera-difusor. Se simularon dos áreas urbanas, un área con baja densidad de edificios (*LBD*) y una con alta densidad de edificios (*HBD*). En el estudio se tuvieron en cuenta ocho direcciones del viento incidente.

Figura 13

Mecanismo difusor con bridas instalado sobre la azotea de un edificio

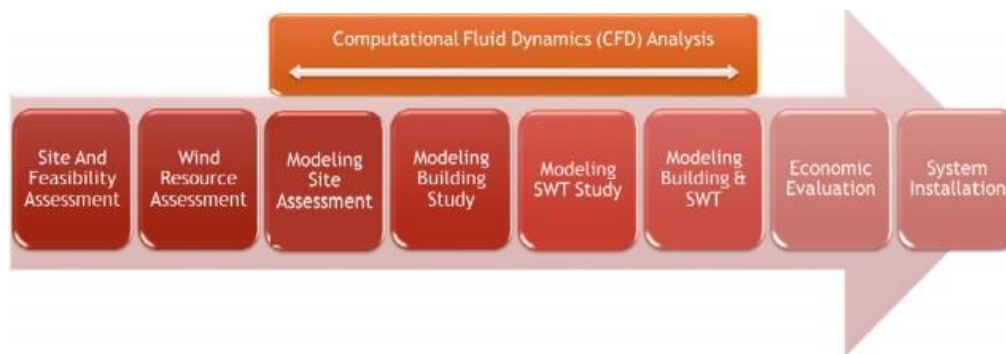


Nota. (a) Contornos de velocidad en el plano de simetría. (b) Líneas de flujo de velocidad en perspectiva. Tomado de Dilimulati et al. (2018).

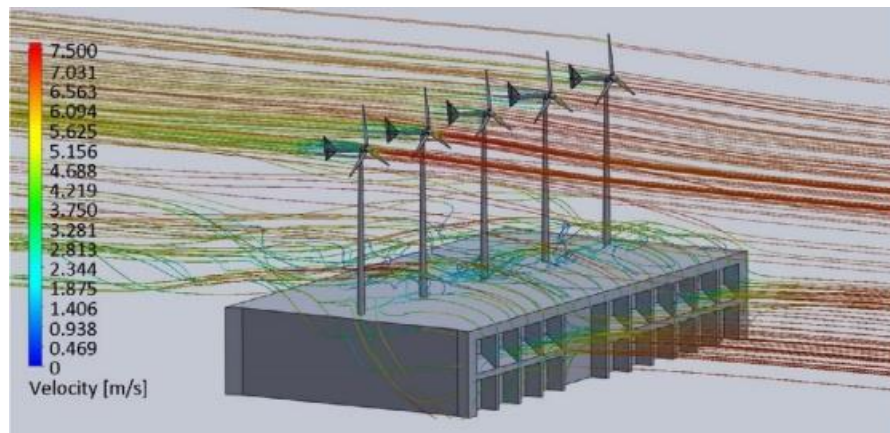
Por otro lado, Arteaga-López et al. (2019) propusieron una nueva metodología que permite la aplicación de diversos métodos y software *CFD* para evaluar la instalación de *UWTs*. La **Figura 14** muestra el diagrama de flujo de la metodología propuesta y las líneas de flujo de velocidad alrededor de cinco aerogeneradores *Bergey Excel* de 10 kW instalados en la azotea del edificio estudiado. Los autores concluyeron que la metodología planteada podría reducir el tiempo y el costo de los estudios de factibilidad de proyectos de sistemas eólicos.

Figura 14

Metodología propuesta por Arteaga-López et al.



(a)



(b)

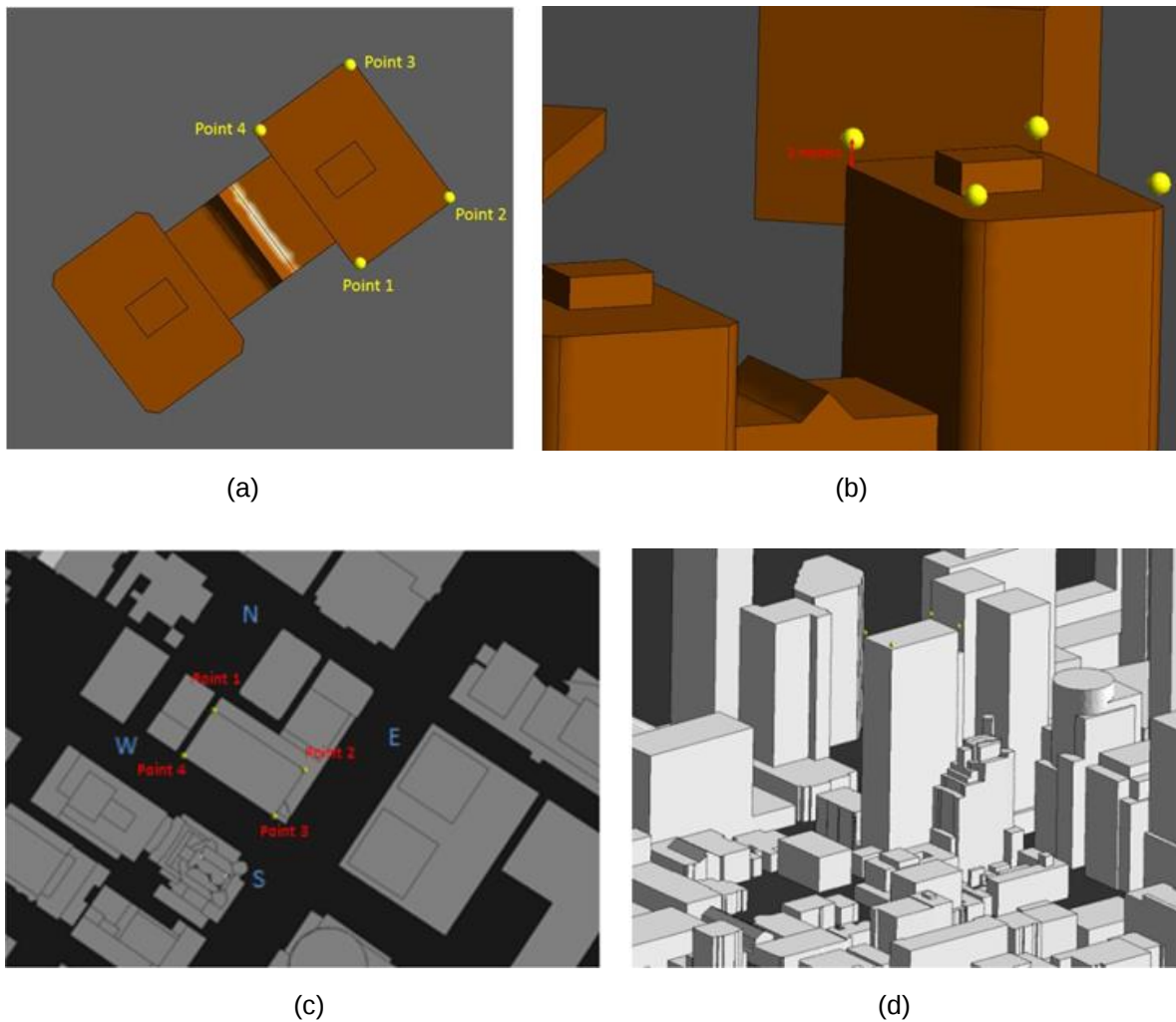
Nota. (a) Diagrama de flujo del proceso. (b) Líneas de flujo de velocidad alrededor de cinco aerogeneradores *Bergey Excel* de 10 kW instalados sobre la azotea. Tomado de Arteaga-López et al. (2019).

Más recientemente, Zabarjad Shiraz et al. (2020) también propusieron una metodología para evaluar el rendimiento y la producción de energía de los *BMWTs*. La metodología combinó

simulaciones *CFD* y datos meteorológicos. Se simularon dos áreas urbanas con distintas densidades, *LBD* y *HBD*. El área *HBD* representaba una parte del centro de la ciudad y el área *LBD* contenía una zona comercial ubicada en una región suburbana (*Montreal, Canadá*). Se simularon 8 direcciones distintas de viento incidente, como en Dilimulati et al. (2018), para calcular U en 4 puntos de control que representarían la ubicación de los *UWTs* (ver la ubicación de los puntos en la **Figura 15**). Los autores concluyeron que la metodología presentada podría usarse para analizar simultáneamente zonas con alto potencial eólico y *UWTs* dentro de ambientes urbanos.

Figura 15

Ubicación de los puntos de control



Nota. (a) Vista superior para *LBD*. (b) Vista isométrica para *LBD*. (c) Vista superior para *HBD*. (d) Vista isométrica para *HBD*. Tomado de Zabarjad Shiraz et al. (2020).

En resumen, el diseño y la evaluación de los *BMWTs* ha evolucionado desde los análisis *2D* a aquellos en *3D*, incorporando más detalles en los *UWTs* y el modelamiento de entornos urbanos. Esta tendencia apunta a mejorar la precisión en la predicción del comportamiento del viento dentro de los ambientes urbanos. La evaluación de la potencia de salida de los *UWTs* ha pasado del uso de la curva de potencia de los *UWTs* comerciales hacia la determinación de la potencia de salida a través de simulaciones *CFD* de aerogeneradores completos en *3D*, lo que es posible gracias a los desarrollos tecnológicos relacionados con la potencia computacional que se vienen dando en los últimos años. Por otro lado, recientemente se han desarrollado algunos *UWTs* y dispositivos de amplificación de la velocidad del viento, con el propósito de aumentar el rendimiento de los aerogeneradores, mostrando resultados prometedores. Adicionalmente, se han propuesto metodologías para mejorar el proceso de diseño, análisis y posicionamiento de los *UWTs*.

2.3.5.2. Aerogeneradores integrados en edificios

Cho et al. (2011) propusieron distintos *BIWTs* basados en los análisis de la velocidad máxima del viento que pasa a través de un área ubicada dentro de 5 tipos de edificios (A, B, C, D y E). Los resultados mostraron que la velocidad del viento podría aumentar mediante el diseño de edificios adecuados que puedan maximizar la producción de energía de los *BIWTs*. Los autores recomendaron aerogeneradores específicos según cada tipo de edificio: A (*HAWT*), B (*HAWT*), C (*VAWT*), D (*VAWT*) y E (*VAWT*).

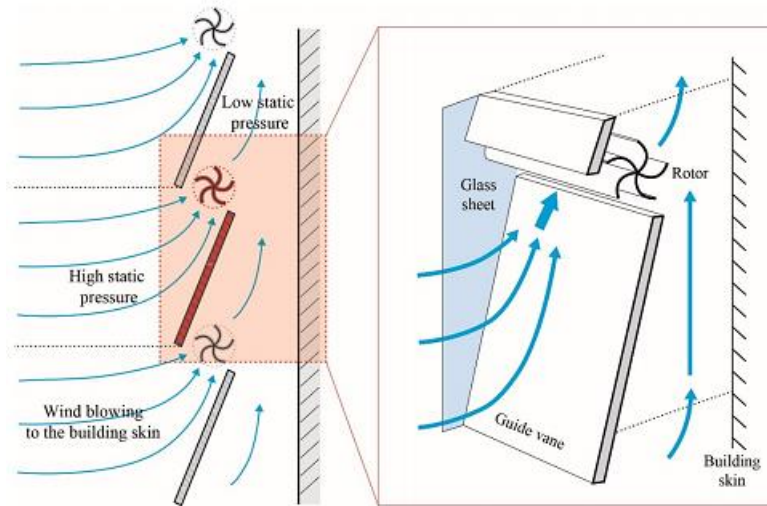
Zhu et al. (2018) investigaron un *VAWT* de tres álabes rectos con amplificación del viento para mejorar sus parámetros de operación. Notar que este tipo de aerogenerador también es un *BIWT*. Los resultados mostraron que los parámetros como la dirección del viento, los tipos de perfiles aerodinámicos, la solidez y las configuraciones arquitectónicas tuvieron una influencia importante en el rendimiento del *VAWT*.

Por otro lado, Park et al. (2015) propusieron un nuevo *BIWT*. Este *BIWT* fue posicionado sobre las paredes externas del edificio. El sistema propuesto combina álabes guía y aerogeneradores *Savonius* como se aprecia en la **Figura 16**. A través de simulaciones *CFD* se determinó la configuración óptima del sistema y su producción de energía asociada. Un módulo del sistema (es decir, un álabe guía y un aerogenerador *Savonius*) podría producir 0.248 kWh/día en promedio anual y 0.410 kWh/día en temporada de primavera. Notar que un módulo tiene un área

de entrada de 1 m^2 . La energía total producida por todo el sistema (todos los módulos) se estimó en 241 kWh/día .

Figura 16

Vista ilustrativa de un nuevo BIWT



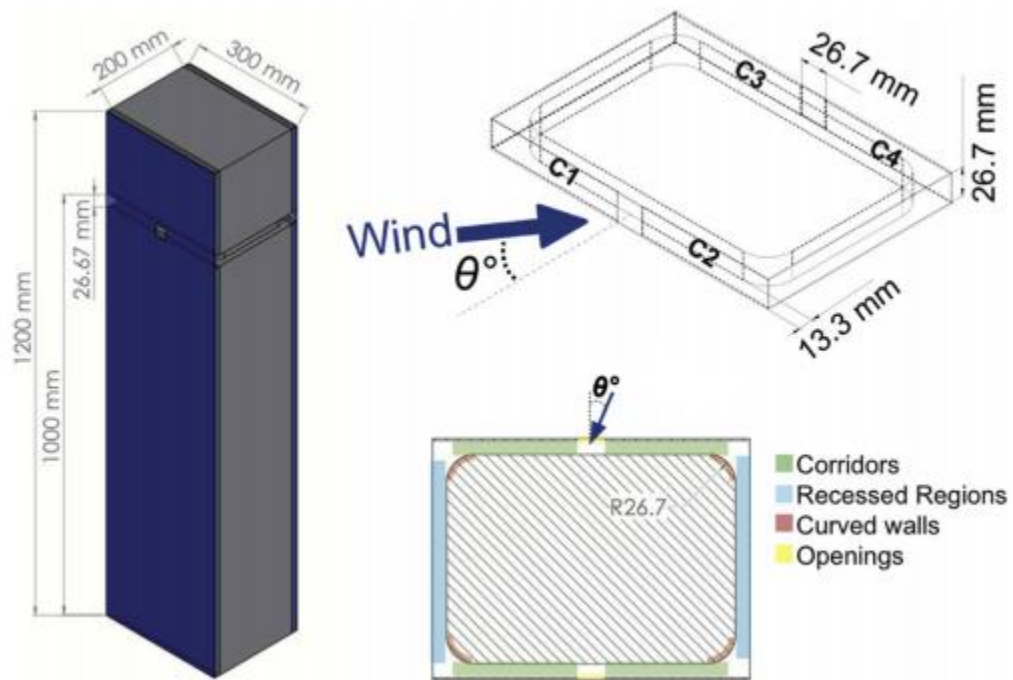
Nota. Tomado de Park et al. (2015).

Hassanli et al. (2018) desarrollaron una metodología que utiliza simulaciones *CFD* para evaluar el rendimiento del sistema *Double Skin Façade*. Este sistema cuenta con aberturas y corredores dentro del edificio, los cuales guían el viento hacia los *HAWTs* (Ampair 300) instalados allí (ver más detalles en la **Figura 17**). El sistema genera un efecto de amplificación en la velocidad del viento aumentando la potencia de salida de los *HAWTs* (**Figura 18**). Los resultados mostraron que se logró una amplificación de hasta 1.8 veces en la U dentro de los corredores. Los autores también concluyeron que los *HAWTs* instalados dentro del sistema podrían generar hasta un 50% de energía adicional en comparación con aquellos *HAWTs* ubicados en lugares con condiciones de flujo de viento libre (zonas aisladas).

Por otro lado, Jafari et al. (2018) estudiaron dos configuraciones (elevada y canalizada), mediante *CFD*, de un nuevo aerogenerador llamado *PowerWindow*. En el estudio se llegó a calcular un C_p de 12% y 8% para las configuraciones canalizada y elevada, respectivamente. Los autores también encontraron que un incremento de σ conducía tanto a una reducción del coeficiente de sustentación máximo como a un incremento en el ángulo de ataque crítico (necesario para alcanzar la entrada en pérdida).

Figura 17

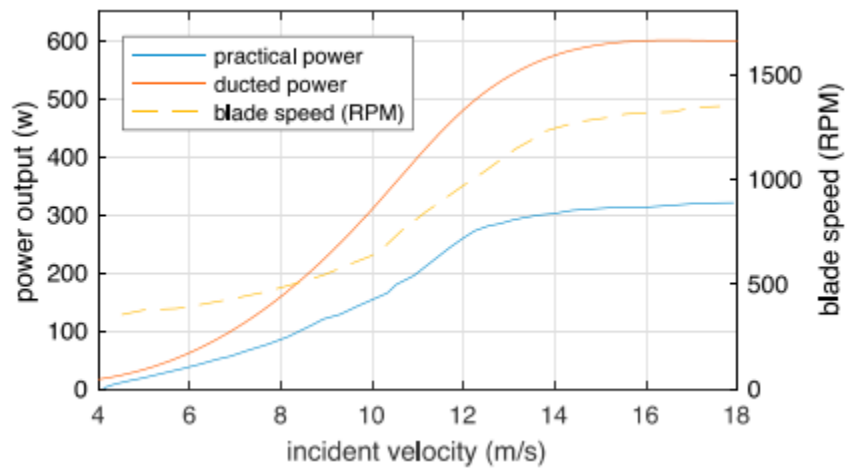
Detalle del sistema Double Skin Façade



Nota. Tomado de Hassanli et al. (2018).

Figura 18

Potencia de salida y RPM del aerogenerador Ampair 300, en flujo libre, y dentro de un conducto

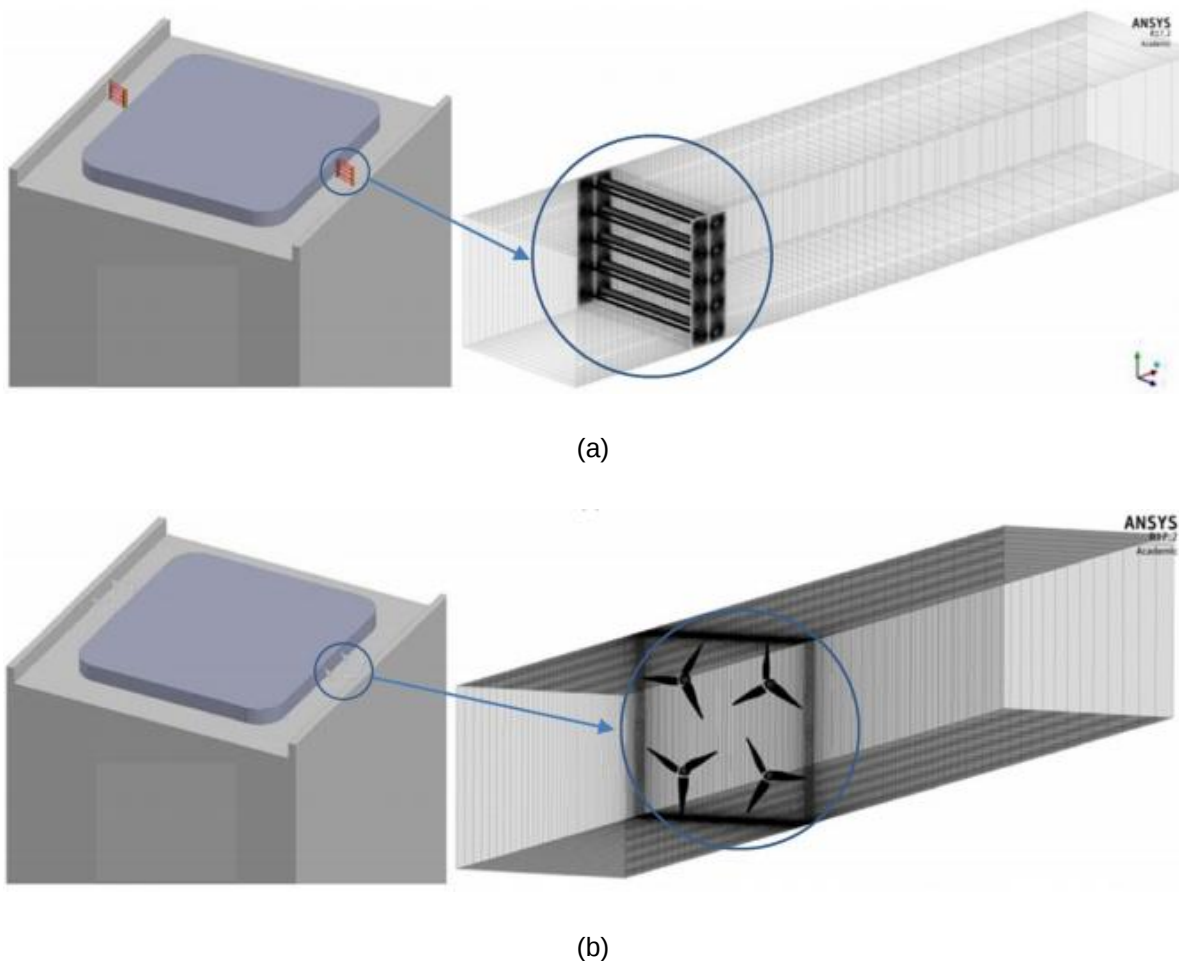


Nota. Tomado de Hassanli et al. (2018).

Del mismo modo, Jafari et al. (2019) estudiaron dos aerogeneradores, un *PowerWindow* aumentado con estator y un *Ampair 300*, cuando estos se instalaron dentro de las aberturas de los edificios de sistema *Double Skin Façade*. El detalle de la ubicación de ambos aerogeneradores se muestra en la **Figura 19**. En esta figura también se muestran algunos detalles del mallado del dominio. Los autores utilizaron simulaciones *CFD* para el estudio. Los resultados mostraron que los aerogeneradores instalados dentro de las aberturas de los edificios pueden mejorar su rendimiento en comparación con aquellos aerogeneradores trabajando en condiciones de flujo libre del viento. Los autores también encontraron que la producción de energía del *PowerWindow* no aumentó tanto como la del *Ampair 300* dentro del sistema *Double Skin Façade*.

Figura 19

Sistema Double Skin Façade



Nota. (a) PowerWindow y (b) Ampair 300. Tomado de Jafari et al. (2019).

En resumen, todas las simulaciones con respecto a los *BIWTs* solo modelaron los edificios objetivo donde se instalaron los *UWTs*, mas no todo el entorno urbano. Estas simulaciones fueron realizadas en *2D* o *3D* incorporando detalles de *UWTs* y edificios. La evaluación de la potencia de salida de los *UWTs* se realizó principalmente mediante la predicción de la potencia de salida a través del análisis *CFD*. De manera similar a los estudios de *BMWTs*, se han desarrollado nuevos *BIWTs*, dispositivos y sistemas que permiten la amplificación de U para aumentar el rendimiento de los *UWTs*.

CAPÍTULO III

VALIDACIÓN BASADA EN DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL DE UN EDIFICIO DE GRAN ALTURA Y UN AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL USANDO DOS MODELOS DE TURBULENCIA

3.1. Introducción

La tecnología de *UWTs* es un nuevo campo de estudio con un gran potencial (Ishugah et al., 2014). Los *UWTs* se presentan como una excelente alternativa para suministrar electricidad a cargas locales (Arteaga-López et al., 2019). Por otro lado, uno de los retos que presenta este campo está relacionado con el logro de una buena predicción, tanto del comportamiento del viento en entornos urbanos como de la potencia generada mediante aerogeneradores, usando métodos *CFD*. Tener en cuenta que la predicción adecuada del patrón del viento dentro de un ambiente urbano permite determinar cuál será la ubicación óptima para la instalación de los *UWTs*. Asimismo, esta predicción influye en la evaluación certera de las potencias de salida de los *UWTs*. El costo computacional necesario para simular *UWTs* es otro tema relacionado con este campo de estudio. Se requiere un alto costo computacional para conseguir simulaciones de alta fidelidad.

La validación de modelos numéricos es uno de los pasos más importantes en las simulaciones *CFD*. La validación de modelos sirve para conocer el nivel de precisión/exactitud de los modelos numéricos. Esta etapa incluye la comparación de resultados numéricos con mediciones experimentales. Las validaciones de entornos urbanos generalmente tienen en cuenta un gran número de edificios, que representan un área específica de interés (Ricci et al., 2020), o solamente un edificio (Toja-Silva et al., 2015a), alrededor del cual se requiere un análisis del comportamiento del viento. Notar que las validaciones de diferentes modelos de entornos urbanos han sido llevadas a cabo utilizando datos experimentales disponibles en la literatura (Yoshie et al., 2007) (ver **Tabla 7**). Una de las primeras validaciones de entornos urbanos fue realizada por Yoshie et al. (2007), quienes simularon un solo edificio de gran altura y otros arreglos de edificios usando enfoques de simulación tipo *RANS* y *LES*. Más recientemente, Vranešević et al. (2022) evaluaron las velocidades del viento alrededor de un modelo de edificio cuadrado prismático con proporción 1:3. Los autores llevaron a cabo un proceso de validación utilizando los resultados de simulaciones *LES* y mediciones experimentales. Las predicciones numéricas y los datos experimentales se compararon con la métrica *Mean Normalized Bias*

(*MNB*). Se obtuvieron valores de *MNB* inferiores al 6% y al 18.5% para los coeficientes de presión (C_p) media y fluctuante, respectivamente. Además, Masoumi-Verki et al. (2021) estudiaron el impacto de diferentes condiciones de estratificación sobre el flujo de aire y los campos de concentraciones alrededor de un edificio de gran altura. Los autores utilizaron el *HR* y el *Factor of two of observations (FAC2)* como métricas de validación, obteniendo valores superiores a 0.66 y 0.5, respectivamente, lo que significa que los resultados obtenidos tuvieron buena calidad (buena concordancia entre las predicciones numéricas y las mediciones experimentales).

El modelamiento de grandes áreas urbanas puede considerarse como ideal, así, Juan et al. (2021) estudiaron numéricamente el potencial de energía eólica alrededor de edificios de gran altura ubicados en un área urbana. Los resultados numéricos incluso fueron comparados con mediciones de viento, dentro de un proceso de validación (más detalles en la **Tabla 7**). Las mallas utilizadas en las simulaciones contenían muchos elementos (celdas), lo cual exige un alto costo computacional para su resolución y que solo algunas computadoras alrededor del mundo pueden alcanzar. Debido a la limitación en los recursos computacionales (computadora con procesador de 16 núcleos y 64 GB de memoria RAM), en la presente tesis solo se llevaron a cabo simulaciones de un modelo de edificio de gran altura. Por otro lado, Juan et al. (2022) analizaron el potencial de energía eólica disponible alrededor de una serie de 4 edificios genéricos de gran altura utilizando simulaciones *3D RANS* en estado estacionario. Los resultados numéricos se compararon con las mediciones obtenidas en túnel de viento. Los resultados del modelo *RSM* mostraron la mejor concordancia con las mediciones experimentales de velocidades medias, logrando una desviación absoluta promedio del 4%.

Como también se aprecia en la **Tabla 7**, Tominaga et al. (2008) simularon el flujo del viento transitorio alrededor de un edificio de gran altura utilizando modelos de turbulencia basados en *Unsteady Reynolds-Averaged Navier Stokes (URANS) $k - \varepsilon$* y *LES*. Entre los modelos *URANS*, el modelo *Murakami-Mochida-Kondo (MMK)* mostró la mejor aproximación de la longitud de recirculación adimensional (*reattachment length, X_L*) sobre la azotea del edificio, mientras que el modelo *Durbin* logró la concordancia más cercana entre los resultados numéricos y los datos experimentales. Gousseau et al. (2013) realizaron un estudio de validación del mismo edificio de gran altura. Los resultados mostraron que se logró un muy buen acuerdo para la velocidad en el sentido de la corriente representada por valores de *HR* entre 0.84 y 0.9. Mientras que se calcularon valores de *HR* por debajo de 0.66 para la energía cinética turbulenta (k). Liu y Niu (2016) compararon los modelos *Renormalization Group $k - \varepsilon$ (RNG $k - \varepsilon$)*, *LES* y *Detached Eddy*

Simulation (DES) en la simulación del edificio de gran altura. Los resultados numéricos mostraron una buena concordancia con las mediciones experimentales para todos los modelos estudiados, alcanzando valores de X_L entre 0.58 y 0.60. Notar que los resultados numéricos obtenidos con *DES* y *LES* mostraron una mejor concordancia con el experimento que aquellos obtenidos con *RANS*.

Considerando el enfoque *RANS*, Tominaga (2015) (**Tabla 7**) estudió diferentes modelos de turbulencia basados en $k - \varepsilon$ y $k - \omega$ aplicados a la simulación del flujo del viento alrededor del edificio de gran altura. Usando el *solver Fluent*, se realizaron simulaciones estacionarias y transitorias. Las simulaciones realizadas usando modelos basados en $k - \varepsilon$ mostraron mejor concordancia con respecto al X_L (0.60) en la azotea del edificio que aquellas simulaciones que utilizaron modelos basados en $k - \omega$ ($X_L > 1$); esto se debió a que los modelos basados en $k - \omega$ sobreestimaron la separación del flujo en las esquinas del edificio. Las simulaciones transitorias del modelo *RNG* $k - \varepsilon$, con su ecuación de transporte para ε modificada, mostraron la mejor concordancia con las mediciones experimentales, alcanzando valores del *HR* y *NMSE* de 0.67 y 0.37 para U y k , respectivamente. Toja-Silva et al. (2015b) también simularon el mismo edificio de gran altura utilizando varios modelos de turbulencia *RANS* en *OpenFOAM*. Con respecto al X_L , el modelo *Durbin new*, una variación del modelo *Durbin* propuesta por los autores, mostró la mejor concordancia en comparación con las mediciones experimentales ($X_L = 0.52$, similar al experimento), mientras que los modelos *Nonlinear Shih* y *SST* $k - \omega$ mostraron la peor concordancia (ambos $X_L > 1$). El análisis cuantitativo demostró que los modelos *RNG*, *MMK*, *Durbin*, *Yap* y *Nonlinear Shih* superaron el proceso de validación del parámetro k , alcanzando valores del *HR* mayores a 0.813 y 0.688 para U y k , respectivamente. Además, Shirzadi et al. (2017) optimizaron 4 coeficientes de cierre del modelo de turbulencia *Kato and Launder* $k - \varepsilon$ aplicado a un flujo de viento constante alrededor del edificio de gran altura. La optimización fue realizada mediante métodos estocásticos y técnicas de muestreo de *Monte Carlo*. Los resultados numéricos mostraron que la optimización de los coeficientes de cierre permitió mejorar el *HR* y *FAC2* para U de 0.31 y 0.54 a 0.47 y 0.91, respectivamente.

Notar que los trabajos antes mencionados utilizaron mallas estructuradas con dominios rectangulares (ver **Tabla 7**) excepto en la investigación de Xiong et al. (2022), quienes usaron elementos de mallas poliédricas. Xiong et al. (2022) realizaron simulaciones *CFD* del flujo de aire alrededor de un edificio de gran altura utilizando diferentes mallas poliédricas y modelos de turbulencia $k - \varepsilon$. Los autores también realizaron un proceso de validación, donde compararon

predicciones numéricas y mediciones experimentales, a través de la métrica llamada *Error Rate* (*ER*). Los resultados mostraron valores del *ER* inferior al 16% para los casos simulados.

Tabla 7

Estudios de validación numérica de edificios de gran altura

Autores	Edificio	Enfoque	Modelo	Celdas	Parámetro	Métrica
Yoshie et al. (2007)	Edificio alto	<i>RANS</i>	<i>Standard k – ε, Launder-Kato k – ε y RNG k – ε</i>	105 300	X_L y U	<i>D</i>
Juan et al. (2021)	Gran área urbana	<i>RANS</i>	<i>Standard k – ε, Realizable k – ε y RNG k – ε</i>	71'109 937	TI y U	<i>D</i>
Juan et al. (2022)	4 edificios altos	<i>RANS</i>	<i>Standard k – ε, Realizable k – ε, RNG k – ε, SST k – ω y RSM</i>	5'464 450	TI y U	<i>D</i>
Masoumi-Verki et al. (2021)	Edificio alto	<i>Embedded LES</i>	-	2'148 192	k y U	<i>HR</i> y <i>FAC2</i>
Vranešević et al. (2022)	Edificio prismático	<i>LES</i>	-	27'000 000	C_p , TI y U	<i>D</i> y <i>MNB</i>
Xiong et al. (2022)	Edificio alto	<i>RANS</i>	<i>Standard k – ε, Realizable k – ε, Abe–Kondoh–Nagano Low-Re k – ε, Elliptic Blending k – ε y V2F Low-Re k – ε</i>	-	X_L , k y U	<i>ER</i>
Tominaga et al. (2008)	Edificio alto	<i>URANS / LES</i>	<i>Standard k – ε, Launder-Kato k – ε, Modified Launder-Kato k – ε, MMK k – ε y Durbin k – ε</i>	105 300	X_L , k y U	-

C_p = Coeficiente de presión; *D* = Desviación o error; *ER* = Error rate; *FAC2* = Factor of two of observations; *FB* = Fractional bias; *HR* = Hit rate; k = Energía cinética turbulenta; *MNB* = Mean normalized bias; *NMSE* = Normalized mean square error; T = Temperatura; TI = Intensidad turbulenta; U = Velocidad del viento; X_L = Longitud de recirculación adimensional.

Autores	Edificio	Enfoque	Modelo	Celdas	Parámetro	Métrica
Gousseau et al. (2013)	Edificio alto	<i>LES</i>	-	2'504 160	X_L, k y U	<i>HR</i> , <i>FAC2</i> , <i>FB</i> y <i>NMSE</i>
Liu y Niu (2016)	Edificio alto	<i>RANS</i> / <i>DES</i> / <i>LES</i>	<i>RNG k - ε</i>	9'250 000	X_L y U	-
Tominaga (2015)	Edificio alto	<i>RANS</i> / <i>URANS</i>	<i>Standard k - ε, Realizable k - ε, RNG k - ε, Standard k - ω y SST k - ω</i>	551 112	X_L, k y U	<i>HR</i> , <i>FAC2</i> , <i>FB</i> y <i>NMSE</i>
Toja-Silva et al. (2015b)	Edificio alto	<i>RANS</i>	<i>Standard k - ε, RNG k - ε, MMK k - ε, Durbin k - ε, Durbin-Tominaga k - ε, Durbin-New k - ε, Yap k - ε, Nonlinear Shih k - ε y SST k - ω</i>	3'100 000	X_L, k y U	<i>HR</i>
Shirzadi et al. (2017)	Edificio alto	<i>RANS</i>	<i>Standard k - ε</i>	396 864	X_L, T, k y U	<i>HR</i> y <i>FAC2</i>

C_p = Coeficiente de presión; D = Desviación o error; ER = Error rate; $FAC2$ = Factor of two of observations; FB = Fractional bias; HR = Hit rate; k = Energía cinética turbulenta; MNB = Mean normalized bias; $NMSE$ = Normalized mean square error; T = Temperatura; TI = Intensidad turbulenta; U = Velocidad del viento; X_L = Longitud de recirculación adimensional.

Con respecto a las simulaciones de *HAWTs* (ver la **Tabla 8**), Sørensen et al. (2002) simularon el rotor del aerogenerador *Phase VI* del *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*. Este aerogenerador cuenta con 2 álabes y un rotor de 10 m de diámetro. Solamente se simuló un álabes del rotor utilizando el solver *EllipSys3D*. En general, los resultados numéricos mostraron buena concordancia con las mediciones experimentales teniendo desviaciones máximas del 20% para el torque a $U = 10$ m/s. Kamalov et al. (2022) estudiaron también la aerodinámica del álabes del aerogenerador *Phase VI* utilizando un modelo de turbulencia híbrido arbitrario implementado en *OpenFOAM*. Los autores compararon este modelo con simulaciones *URANS*. Asimismo, los autores validaron su modelo numérico mediante valores de torque, donde se alcanzaron diferencias inferiores al 4.2% entre los resultados numéricos y las mediciones experimentales. Las comparaciones se realizaron para $U = 15$ m/s y velocidad de rotación (ω) de 72 RPM. En general, el modelo de turbulencia híbrido arbitrario mostró mejores resultados en comparación con los modelos de turbulencia *URANS*, logrando desviaciones o errores (D) del 10.2% y 16.5%,

respectivamente. Notar que la desviación o error se define como la diferencia entre el valor real (medición) y el valor aproximado (calculado o estimado), todo ello dividido por el valor real y multiplicado por el 100%.

El álabe del aerogenerador *Phase VI* fue integrado con un *trailing edge* cambiante para mejorar su rendimiento en el estudio de Akhter et al. (2023) (mayor detalle en la **Tabla 8**). El estudio incluyó una etapa de validación donde se compararon resultados numéricos y mediciones experimentales del C_p . Se obtuvieron errores relativos inferiores al 5.5% en la predicción del par para un rango de U entre 5 y 13 m/s. Por otro lado, Elfarra et al. (2014) optimizaron un *winglet* acoplado a los álabes del rotor del aerogenerador *Phase VI* de *NREL*, el cual también fue utilizado en el proceso de validación del modelo numérico. El solver *Fine/Turbo NUMECA* se configuró para realizar las simulaciones utilizando U de 5 a 25 m/s. Los resultados numéricos del proceso de validación mostraron una buena concordancia con los datos experimentales en las regiones de velocidades del viento bajas y medias. Similarmente, Abdelghany et al. (2023) mejoraron las características aerodinámicas de los álabes de un aerogenerador de eje horizontal añadiendo un *winglet* en su punta. Los álabes del aerogenerador se modelaron utilizando secciones del perfil aerodinámico *NACA 4418*. Los autores llevaron a cabo un proceso de validación comparando mediciones del C_p . Los errores máximos obtenidos con los modelos *SST $k - \omega$* y *Spalart-Allmaras* fueron del 2% y 10%, respectivamente. Basándose en sus resultados, los autores concluyeron que el modelo *SST $k - \omega$* fue el más adecuado para simular el flujo de viento alrededor de los álabes del aerogenerador. Además, AbdelSalam y Ramalingam (2014) estudiaron el comportamiento de la estela del aerogenerador *Danwin* de 180 kW. Los resultados mostraron buena concordancia con los datos experimentales. Los autores concluyeron que el modelo *Standard $k - \varepsilon$* predijo el comportamiento de la estela ya que el aerogenerador se modeló con una precisión adecuada.

La estela detrás del aerogenerador *MEXICO*, el cual está constituido por tres álabes y un diámetro de rotor de 4.5 m, fue investigada por Bechmann et al. (2011) (ver **Tabla 8**). Se simularon U de 10, 12, 15, 18 y 24 m/s. El rotor del aerogenerador *MEXICO* también fue investigado por Regodeseves y Morros (2020). Se simularon U de 10, 15 y 24 m/s. La geometría del aerogenerador incluyó al rotor, góndola y torre. Rodrigues y Lengsfeld (2019) también validaron el aerogenerador *MEXICO* utilizando el modelo *SST $k - \omega$* y el método *Moving Reference Frame (MRF)*. Se utilizaron U de 10 y 15 m/s. Los resultados numéricos de todos los

trabajos antes mencionados mostraron una buena concordancia con las mediciones experimentales.

Adicionalmente, Herraiez et al. (2014) validaron el rotor del aerogenerador *MEXICO* utilizando *OpenFOAM* (**Tabla 8**). Se simularon U de 10, 15 y 24 m/s utilizando una $\dot{\omega}$ de 424.4 RPM. Los resultados numéricos mostraron una concordancia razonable con las mediciones experimentales. Más recientemente, Amini et al. (2021) simularon el rotor del aerogenerador *MEXICO* usando las mismas U mencionadas líneas arriba. Se mostró una buena concordancia entre los resultados numéricos y experimentales. Además, Rocha et al. (2016) estudiaron la calibración del modelo de turbulencia *SST $k - \omega$* para dos aerogeneradores pequeños a través de *OpenFOAM*.

En cuanto a las simulaciones tanto de edificios como de aerogeneradores, Larin et al. (2016) analizaron el rendimiento de un aerogenerador *Savonius (VAWT)* colocado cerca del borde frontal de la azotea de un edificio. Los autores llevaron a cabo simulaciones transitorias en *3D*, tanto del edificio como del aerogenerador utilizando el modelo *Realizable $k - \varepsilon$* , ya que este modelo mostró el mejor acuerdo con los datos experimentales en la etapa de validación *2D* del aerogenerador (20% de error promedio en la predicción del C_p). Los autores calcularon errores máximos del 7.3% en la validación del modelo de edificio *3D*. Krishnan y Paraschivoiu (2016) estudiaron el rendimiento de una cubierta con forma de difusor ubicada en la azotea de un edificio. Además, Arteaga-López et al. (2019) propusieron una metodología para evaluar la ubicación de *UWTs*. En primer lugar, los autores simularon un entorno urbano en el que se eligió un edificio objetivo. En el edificio elegido se colocaron y analizaron varios *HAWTs Bergey Excel*. Los autores señalaron que se realizó con éxito el proceso de validación del modelo de aerogenerador *Bergey Excel*. Notar que en estas investigaciones se emplearon dominios rectangulares.

Tabla 8

Estudios de validación numérica de aerogeneradores de eje horizontal

Autores	Turbina	Software	Enfoque	Modelo	Dominio	Malla	Celdas	Parámetro	Métrica
Sørensen et al. (2002)	Phase VI	EllipSys3D	RANS / URANS	SST $k - \omega$	C y CY	ST	4'200 000	C_p , C_n , C_t , momento <i>root flap</i> , momento <i>root Edge</i> y torque	D
Elfarrar et al. (2014)	Phase VI	Fine/Turbo NUMECA	RANS	Launder- Sharma $k - \varepsilon$	CY	ST	350 000 (nodos)	C_p , C_n , C_t , y potencia	-
AbdelSalam y Ramalingam (2014)	Darwin 180 kW	Fluent	RANS	Standard $k - \varepsilon$	REC	UST	2'900 000	U	-
Bechmann et al. (2011)	MEXICO	EllipSys3D	RANS	SST $k - \omega$	C	ST	16'000 000 (nodos)	C_p , C_n , empuje y U	D
Regodeseves y Morros (2020)	MEXICO	Fluent	URANS	SST $k - \omega$	REC	ST	37'500 000	C_p , F_n , F_t , empuje, torque y U	D
Rodrigues y Lengsfeld (2019)	MEXICO	Fluent	RANS	SST $k - \omega$	REC	UST	10'000 000	F_n , F_t , C_p , y U	-
Herraez et al. (2014)	MEXICO	OpenFOAM	RANS / URANS	Spalart- Allmaras	CY	ST	11'000 000	C_p y U	-
Amini et al. (2021)	MEXICO	OpenFOAM	RANS	Spalart- Allmaras	REC	ST	-	F_n , F_t y U	-

C = Circular; CY = Cilíndrico; C_n = Coeficiente de fuerza normal; C_t = Coeficiente de fuerza tangencial; C_p = Coeficiente de potencia; C_p = Coeficiente de presión; D = Desviación o error; F_n = Fuerza normal; F_t = Fuerza tangencial; REC = Rectangular; RMSE = Root mean square error; ST = Estructurada; U = Velocidad del viento; UST = No estructurada.

Autores	Turbina	Software	Enfoque	Modelo	Dominio	Malla	Celdas	Parámetro	Métrica
Rocha et al. (2016)	2 turbinas pequeñas	<i>OpenFoam</i>	<i>RANS</i>	<i>SST $k - \omega$</i>	<i>CY</i>	<i>ST</i>	3'200 000	C_p	<i>RMSE</i>
Abdelghany et al. (2023)	Álabes generados usando el perfil <i>NACA</i> <i>4418</i>	<i>Fluent</i>	<i>RANS</i>	<i>SST $k - \omega$</i> y <i>Spalart- Allmaras</i>	<i>CY</i>	<i>UST</i>	3'000 000	C_p	<i>D</i>
Akhter et al. (2023)	<i>Phase VI</i>	<i>Fluent</i>	<i>URANS</i>	<i>SST $k - \omega$</i>	<i>CY</i>	<i>ST</i>	11'000 000	C_p	<i>D</i>
Kamalov et al. (2022)	<i>Phase VI</i>	<i>OpenFOAM</i>	<i>URANS / LES</i>	<i>SST $k - \omega$</i> y híbrido arbitrario (VLES)	<i>CY</i>	<i>ST</i>	54'937 248	C_p y torque	<i>D</i>

C = Circular; *CY* = Cilíndrico; C_n = Coeficiente de fuerza normal; C_t = Coeficiente de fuerza tangencial; C_p = Coeficiente de potencia; C_p = Coeficiente de presión; *D* = Desviación o error; F_n = Fuerza normal; F_t = Fuerza tangencial; *REC* = Rectangular; *RMSE* = Root mean square error; *ST* = Estructurada; *U* = Velocidad del viento; *UST* = No estructurada.

Como se evidencia en la revisión de la literatura, en el pasado se realizaron varios estudios relacionados con simulaciones de edificios de gran altura o de aerogeneradores de eje horizontal, pero ninguno incluyó la validación de ambos modelos numéricos en el mismo trabajo. Los modelos del edificio de gran altura y del aerogenerador de eje horizontal, ampliamente utilizados en las validaciones de modelos numéricos, estuvieron acorde al Caso A del Instituto de Arquitectura de Japón y el proyecto *MEXICO*, respectivamente, por lo que estos modelos han sido incluidos en los cálculos del capítulo anterior.

Respecto a los enfoques *CFD* empleados en simulaciones numéricas, *RANS* es el más utilizado debido a su menor costo computacional en comparación con *LES*, a pesar de que *RANS* es menos preciso que *LES*. Notar que *LES* presenta ciertas limitaciones. Una de esas limitaciones es la necesidad de una malla de alta resolución para capturar eficazmente la dinámica del flujo alrededor de estructuras como edificios, calles y el propio aerogenerador. Además, condiciones de contorno precisas son esenciales para representar las interacciones entre el flujo y el entorno urbano en simulaciones *LES*. También, *LES* es susceptible a problemas de estabilidad numérica, particularmente en escenarios que involucran geometrías y condiciones de flujo muy complejas. Para ello, se emplean modelos de *subgrid* en *LES* para tener en cuenta los efectos de remolinos más pequeños que no son resueltos por la malla. Sin embargo, estos modelos de *subgrid* introducen incertidumbres que pueden afectar la precisión de los resultados de la simulación, especialmente en entornos urbanos complejos donde los patrones de flujo están fuertemente influenciados por la morfología de los edificios y las características del terreno. Las simulaciones *RANS*, a pesar de sus inconvenientes para capturar todas las escalas de turbulencia, especialmente en flujos turbulentos complejos o cerca de paredes, y para predecir fenómenos de separación de flujo, flujo reverso y flujo inestable en comparación con *LES*, aún proporcionan resultados razonables. Por otro lado, las simulaciones numéricas se pueden realizar en estado estacionario o transitorio. Los resultados obtenidos mediante simulaciones transitorias concuerdan mejor con las mediciones experimentales que aquellas estacionarias. Por otro lado, las simulaciones estacionarias requieren menos recursos computacionales que los cálculos transitorios. Debido a la limitación en los recursos computacionales, en las simulaciones realizadas en esta tesis se usa el estado estacionario. Además, se utilizan mallas estructuradas, ya que fueron las más utilizadas en trabajos anteriores debido a que se requiere menor número de celdas en este tipo de malla para lograr resultados precisos en comparación con aquellas mallas no estructuradas.

En términos generales, los modelos de turbulencia basados en $k - \varepsilon$ fueron usados en simulaciones tanto de edificios como de aerogeneradores. En el modelamiento de entornos

urbanos, los resultados obtenidos con los modelos de turbulencia $k - \varepsilon$ mostraron una buena concordancia con las mediciones experimentales (Liu y Niu, 2016; Ricci et al., 2020; Tominaga, 2015), mientras que el modelo $SST k - \omega$ mostró dificultades al predecir la X_L del flujo del viento sobre la azotea de los edificios (Toja-Silva et al., 2015b). Un mejor acuerdo entre resultados numéricos y mediciones experimentales fue logrado empleando el modelo $SST k - \omega$ en comparación con el modelo *Standard* $k - \varepsilon$, en las simulaciones de *HAWTs* (Sørensen et al., 2002; Elfarra et al., 2014; AbdelSalam y Ramalingam, 2014; Bechmann et al., 2011; Rodrigues y Lengsfeld, 2019).

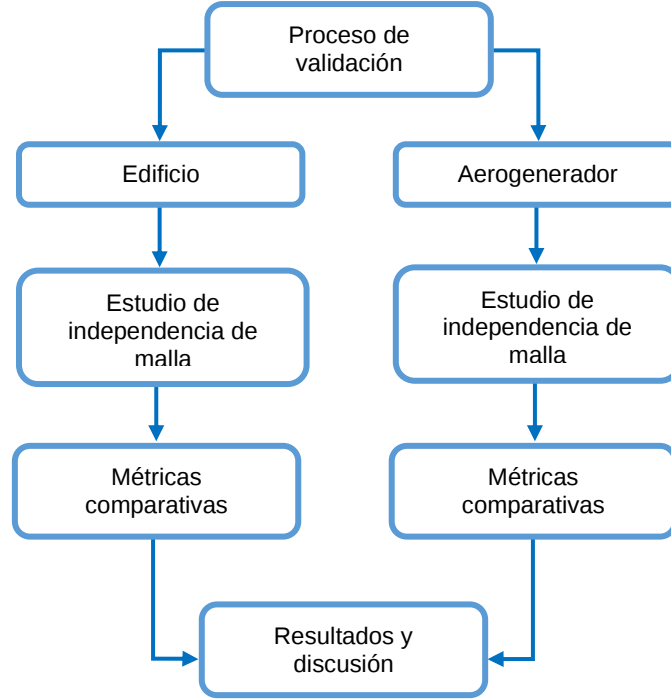
Por otro lado, la altura adimensional de la primera celda cercana a la pared (y^+) está relacionada con la predicción adecuada del comportamiento del flujo alrededor de las superficies, ya que este parámetro es necesario para predecir el comportamiento de la capa límite del flujo que se mueve cercano a las paredes. En este sentido, valores de y^+ por debajo de 5 se mantienen en la superficie de los álabes del aerogenerador para el modelo $SST k - \omega$, mientras que se necesitan valores de y^+ entre 30 y 300 para los modelos de turbulencia basados en $k - \varepsilon$; o incluso y^+ menores a 5 cuando se emplea el tratamiento de pared mejorado (*Enhanced Wall Treatment*) junto con los modelos basados en $k - \varepsilon$. Esto hace que el modelo $SST k - \omega$ sea relativamente más exigente computacionalmente. Tener en cuenta también que la selección de un modelo de turbulencia implica un equilibrio entre la exactitud/precisión y el costo computacional (Toja-Silva et al., 2015b). Por lo tanto, en esta sección se testea un modelo de turbulencia basado en $k - \varepsilon$ y otro basado en $k - \omega$ para encontrar aquel modelo más adecuado para simular edificios y aerogeneradores. Estos modelos son *Realizable* $k - \varepsilon$ (Shih et al., 1995) con tratamiento de pared mejorado (*Enhanced Wall Treatment*) y $SST k - \omega$ (Menter, 1994).

En este sentido, en esta parte de la investigación se compara los modelos de turbulencia *Realizable* $k - \varepsilon$ y $SST k - \omega$ a través de la validación numérica tanto de un edificio de gran altura como de un *HAWT* para encontrar aquel modelo que muestre la mejor concordancia entre los resultados numéricos y los datos de mediciones experimentales. La metodología empleada en la validación de los modelos numéricos se resume en la **Figura 20**. En primer lugar, se detallan los modelos tanto del edificio de gran altura como del *HAWT* junto con las configuraciones empleadas en las simulaciones *CFD*. A continuación, se llevan a cabo estudios de independencia de malla para encontrar aquellas mallas que muestren resultados independientes del número de elementos. Estas mallas se utilizan en las siguientes simulaciones. Luego, las predicciones obtenidas con los modelos del edificio de gran altura y el *HAWT* se comparan con mediciones experimentales, extraídas de la literatura, mediante

métricas comparativas. Las métricas usadas en esta comparación son el *HR*, *NMSE* y *MSE*. Finalmente, a partir de los resultados, se realiza la discusión de los hallazgos principales.

Figura 20

Metodología usada en la validación de los modelos numéricos del edificio y aerogenerador



3.2. Modelamiento

La formulación *RANS* para el modelamiento del flujo estacionario de un fluido newtoniano incompresible se escribe como (Cheng et al., 2003),

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right). \quad (2)$$

Estas ecuaciones representan la conservación de la masa y la cantidad de movimiento, respectivamente. $\bar{u}_i$ y u'_i son las velocidades promedio y fluctuante, respectivamente, $\bar{p}$ representa la presión promedio. ρ y μ son la densidad y la viscosidad dinámica, respectivamente. Para modelar las tensiones de Reynolds $\overline{u'_i u'_j}$ que aparecen en la formulación *RANS*, en este trabajo se utilizan los modelos de turbulencia *Realizable k - ε* y *SST k - ω*.

Los modelos de turbulencia *Realizable* $k - \varepsilon$ y *SST* $k - \omega$ son herramientas fundamentales en la simulación numérica, representando avances significativos en la capacidad de capturar y predecir el comportamiento complejo de la turbulencia, aunque difieren en su formulación y enfoque.

El modelo *Realizable* $k - \varepsilon$, se distingue por su capacidad para capturar de manera precisa la anisotropía turbulenta, mediante la incorporación de términos de transporte que son limitados en función de la realizabilidad física del flujo, lo que lo convierte en una opción popular en la simulación de ingeniería.

Por otro lado, el modelo *SST* $k - \omega$, combina el modelo $k - \omega$ con el modelo $k - \varepsilon$ en diferentes regiones del flujo. En las capas límite cercanas a la pared, el modelo *SST* $k - \omega$ utiliza la ecuación de transporte de la tasa de esfuerzo de Reynolds ($k - \omega$) para capturar de manera efectiva los efectos viscosos, mientras que, en el núcleo del flujo, se emplea el modelo $k - \varepsilon$ para abordar la turbulencia libre.

Ambos modelos han demostrado su eficacia en una variedad de aplicaciones. Sin embargo, la elección entre los modelos *Realizable* $k - \varepsilon$ y *SST* $k - \omega$ depende en gran medida de la naturaleza específica del flujo a simular, así como de las condiciones de contorno y las características del dominio de interés.

Las ecuaciones de transporte del modelo *Realizable* $k - \varepsilon$ en estado estacionario, para k y la disipación turbulenta (ε), respectivamente, son las siguientes,

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon - Y_M, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} P_b \frac{\varepsilon}{k} C_{\varepsilon 3} - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}}, \quad (4)$$

donde μ_t representa la viscosidad turbulenta y P_k es la producción de k . P_b es la generación de k debido a la flotabilidad. Y_M representa la contribución de la dilatación fluctuante a la tasa de disipación general. σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$ y $C_{\varepsilon 2}$ son los coeficientes de cierre.

Las ecuaciones de transporte en estado estacionario del modelo *SST* $k - \omega$, para k y la tasa de disipación específica (ω), respectivamente, son las siguientes,

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \bar{P}_k - Y_k, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + P_\omega - Y_\omega + D_\omega, \quad (6)$$

donde Γ_k y Γ_ω son las difusividades efectivas de k y ω , respectivamente. $\bar{P}_k$ y P_ω son la generación de k debido a los gradientes de velocidad promedio y la generación de ω , respectivamente. Y_k y Y_ω representan, respectivamente, la disipación de k y ω . D_ω es el término de difusión cruzada.

Aunque en el pasado se obtuvieron valores óptimos de coeficientes de cierre de los modelos de turbulencia *Realizable k - ε* y *SST k - ω*, modelando un edificio de gran altura (Shirzadi et al., 2017) y un *HAWT* (Rocha et al., 2016), en esta tesis se utilizan valores estándar de estos coeficientes.

El algoritmo *SIMPLE* se emplea para resolver las ecuaciones diferenciales parciales. El método basado en los mínimos cuadrados (*least squares cell-based*) se utiliza para la evaluación de los gradientes. Para la presión se utiliza un esquema de segundo orden. Mientras tanto, se aplica el esquema *Upwind* de segundo orden para el momento, k , ε y ω . Los residuales se establecieron con un valor de 10^{-5} , para todas las variables, como criterio de convergencia en las simulaciones. Se emplearon los programas *ICEM-CFD* y *Fluent* para construir las mallas y realizar las simulaciones numéricas, respectivamente.

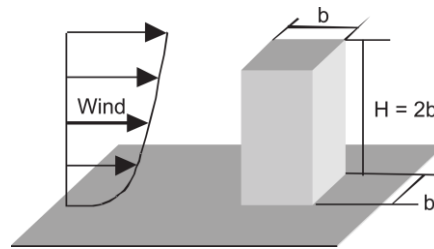
3.2.1. Edificio

3.2.1.1. Estudio de independencia de malla

El caso de estudio para testear el modelo numérico que predice el flujo de viento alrededor de un edificio de gran altura está basado en el Caso A del Instituto de Arquitectura de Japón (Architectural Institute of Japan, 2020). Las características geométricas y mediciones realizadas en túnel de viento del caso de estudio se pueden encontrar en (Meng y Hibi, 1998). La geometría del edificio de gran altura se muestra en la **Figura 21**, donde $b = 0.08$ m.

Figura 21

Geometría del edificio de gran altura usado en la validación



Nota. Tomado de Yoshie et al. (2007).

En la **Figura 22** se muestra la geometría del dominio computacional usado en la simulación del edificio. Las dimensiones del dominio computacional son 1.72, 1.1 y 0.9 m en las direcciones x , y y z , respectivamente. Las superficies *Ground*, *Building* y *Sky* son tratadas como paredes sin deslizamiento, mientras que las superficies *Front* y *Back* se configuran como planos de simetría. El *Outlet* se establece como una salida de presión. El *Inlet* está ubicado a una distancia de 0.4 m con respecto a la cara frontal del edificio. El *Inlet* se configura con distintos perfiles, los cuales se pueden observar en la **Figura 23**. Estos perfiles corresponden a U , k y ε , y se utilizan en la validación del modelo que representa al edificio. Notar que las condiciones de contorno usadas en la validación del edificio están de acuerdo con aquellas utilizadas por el Architectural Institute of Japan (2020) y Tominaga et al. (2008).

Figura 22

Dominio computacional usado en las simulaciones

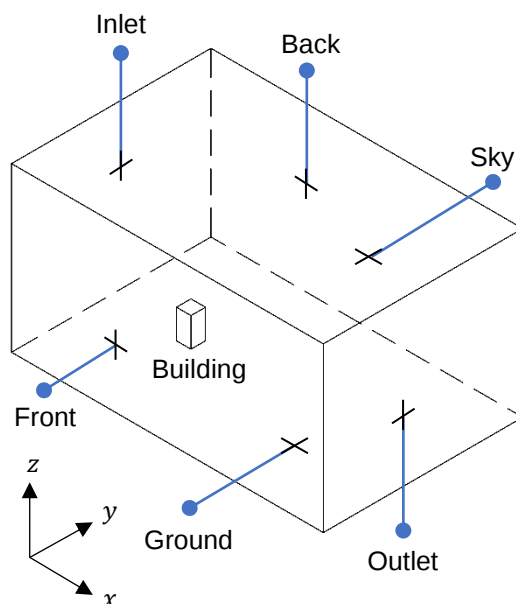
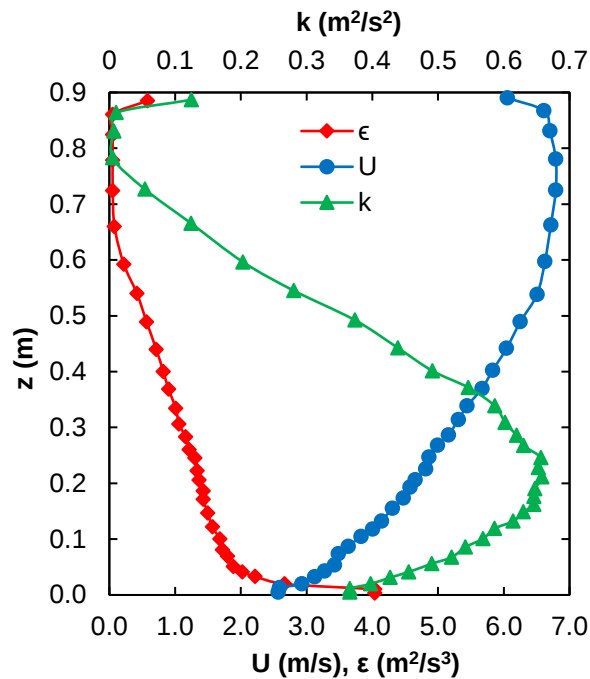


Figura 23

Perfiles de U , k y ε

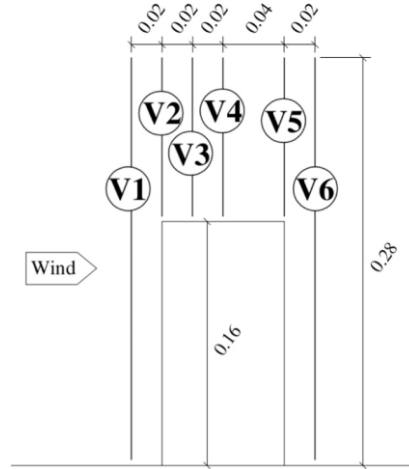


Nota. Tomado de Toja-Silva et al. (2015b) y Meng y Hibi (1998).

Se construyen dos mallas, una gruesa (*Coarse*) de 3'008 362 elementos y una fina (*Fine*) de 14'371 790 elementos para realizar el estudio de independencia de malla. La malla *Coarse* tiene una tasa de crecimiento de 1.2 y la malla *Fine* se configura con una tasa de crecimiento de 1.1. El y^+ en las paredes de ambas mallas se mantiene por debajo de 5, como se recomienda para el modelo de turbulencia SST $k - \omega$ y aquellos modelos basados en $k - \varepsilon$ que usan un tratamiento de pared mejorado (*Enhanced Wall Treatment*), el cual combina el modelo *two-layer* con las funciones de pared mejorada, como aquel implementado en *Ansys Fluent*. El modelo *Realizable* $k - \varepsilon$ es empleado en el estudio de independencia de malla del edificio. Las comparaciones entre las mallas se realizan mediante los resultados de los parámetros U y k , ambos calculados en las posiciones V2 ($x = 0.40$ m), V3 ($x = 0.42$ m), V4 ($x = 0.44$ m) y V5 ($x = 0.48$ m) sobre la azotea del edificio (vista en elevación en la **Figura 24**).

Figura 24

Secciones verticales alrededor y sobre el edificio para comparar los resultados de U y k



Nota. Tomado de Toja-Silva et al. (2015b).

3.2.1.2. Métricas comparativas

En el estudio de independencia de malla se escoge aquella malla que será usada en la comparación de los modelos de turbulencia *Realizable* $k - \varepsilon$ y *SST* $k - \omega$, a través de las métricas *HR* y *NMSE*. Estas métricas se calculan en las posiciones V2, V3, V4 y V5 (ver **Figura 24**). El *HR* representa el nivel de éxito al predecir con precisión ciertos parámetros de interés, como U y k , mientras que el *NMSE* simboliza la dispersión de datos (ver más detalles en Schatzmann et al. (2010)). Para un modelo ideal, estas métricas tendrían como valor 1 para el *HR* y 0 para el *NMSE*. Estas métricas se definen como,

$$HR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i \text{ with } n_i = \begin{cases} 1 & \text{para } \left| \frac{P_i - O_i}{P_i} \right| \leq D_b \text{ or } |P_i - O_i| \leq W_b, \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (7)$$

$$NMSE = \frac{1}{N \bar{P} \bar{O}} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2, \quad (8)$$

donde N es el número de muestras, P_i y O_i representan los valores medidos y pronosticados para la muestra i . $\bar{P}$ y $\bar{O}$ son valores promedio, mientras que D_b y W_b denotan los valores de umbral para el *HR*. En esta tesis, D_b y W_b son 0.25 y 0.03 para U , y 0.25 y 0.003 para k , de forma similar que en el trabajo de Gousseau et al. (2013).

El *HR* representa la proporción de resultados del modelo que se encuentran dentro de un rango aceptable, ya sea D_b o W_b , en comparación con los datos de referencia. D_b considera

la incertidumbre relativa de los datos de referencia, mientras que W_b caracteriza la consistencia o repetibilidad de los datos de referencia (Schatzmann et al., 2010). Por otro lado, el $NMSE$ se ve muy afectado por casos raros de observaciones elevadas y las correspondientes predicciones de las concentraciones (Schatzmann et al., 2010).

3.2.2. Aerogenerador

3.2.2.1. Estudio de independencia de malla

El aerogenerador *MEXICO* es usado en el proceso de validación del modelo numérico. El experimento del aerogenerador *MEXICO* fue realizado en el túnel de viento de baja velocidad de la German Dutch Wind Tunnel Organisation (Schepers y Snel, 2007). Este aerogenerador de eje horizontal cuenta con tres álabes y un rotor de 4.5 m de diámetro. Su diseño se basó en los perfiles aerodinámicos *DU 91-W2-250*, *RISØ A1-21* y *NACA 64-418* (ver geometrías en la **Figura 25**). En la **Tabla 9** se detallan las cuerdas, tipos de perfil, ángulos de giro (*twist angles*, β) y ángulos de paso de sección (*section pitch angles*, θ) utilizados en la construcción de los álabes del aerogenerador *MEXICO*. Tener en cuenta que el ángulo de inclinación de la punta del álabes está configurado en -2.3° y la ω fue 424.5 RPM. En el proceso de validación se usan $U = 10, 15$ y 24 m/s. El *hub*, la góndola y la torre no se consideran dentro del modelamiento de la geometría del aerogenerador.

Figura 25

Geometría de los perfiles *DU 91-W2-250*, *RISO A1-21* y *NACA 64-418*

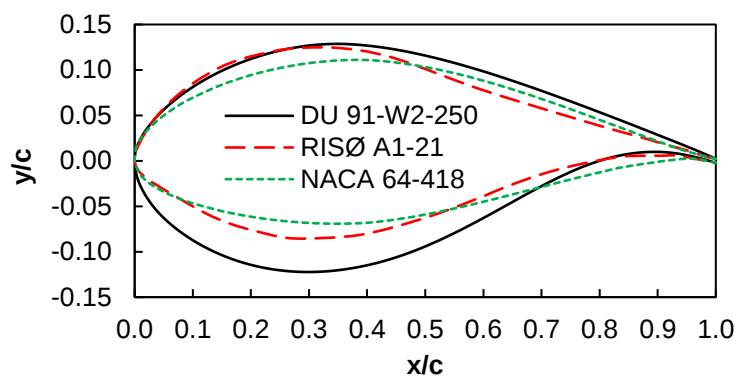


Tabla 9*Características de los álabes del aerogenerador MEXICO*

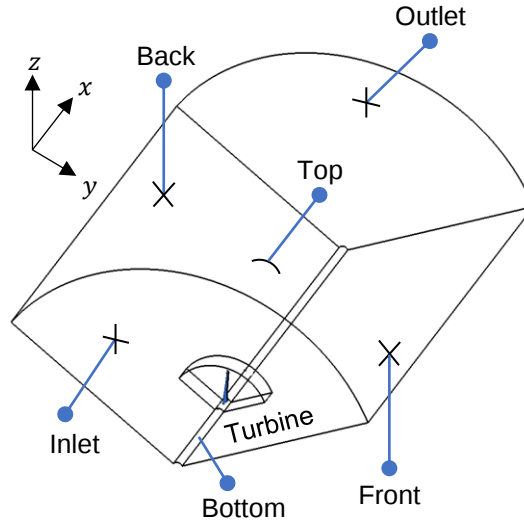
Posición (m)	Perfil	Cuerda (m)	β (°)	θ (°)
0.225	Círculo	0.090	0	0
0.293		0.090	0	0
0.450	DU 91-W2-250	0.240	16.4	14.1
0.675		0.207	12.1	9.8
0.900		0.178	8.3	6.0
1.025		0.166	7.1	4.8
1.225	RISØ A1-21	0.150	5.5	3.2
1.350		0.142	4.8	2.5
1.475		0.134	4.0	1.7
1.675	NACA 64-418	0.123	3.2	0.9
1.800		0.116	2.6	0.3
2.025		0.102	1.5	-0.8
2.165		0.092	0.7	-1.6
2.192		0.082	0.5	-1.8
2.223		0.056	0.2	-2.1
2.250		0.010	0	-2.3

Debido a la periodicidad, solo se simula un tercio del dominio computacional (ver detalles en la **Figura 26**). Para simular el giro del álabe del aerogenerador, se utiliza el enfoque *MRF*, ya que todas las simulaciones realizadas en esta tesis son en régimen estacionario. El *Inlet* se ubica a 6.75 m aguas arriba del aerogenerador, mientras que el *Outlet* se posiciona a 18 m aguas abajo. El dominio computacional externo (estacionario) tiene un radio de 11.25 m. El dominio interno (giratorio) tiene un radio y un ancho de 2.7 m y 1.125 m, respectivamente.

En cuanto a las condiciones de borde (ver **Figura 26**), la superficie del álabe del aerogenerador se configura como una pared no deslizante. La superficie superior del dominio (*Top*) es configurada como un plano de simetría. El *Outlet* se asume como una salida de presión y el *Inlet* es configurado con las *U* antes mencionadas. Los bordes *Front* y *Back* son tratados como superficies periódicas. La superficie inferior del dominio (*Bottom*) se configura con la condición de pared deslizante.

Figura 26

Detalles del dominio computacional usado para la simulación del aerogenerador



Cuatro mallas, Gruesa (*Coarse*), Media (*Medium*), Fina (*Fine*) y Extra fina (*Extra fine*), que contienen 5'149 318, 8'094 168, 14'932 927 y 24'703 452 elementos, respectivamente, son construidas para el estudio de independencia de malla del modelo del aerogenerador. Las comparaciones entre las mallas se realizan mediante las fuerzas de empuje y torque, para $U = 10$ m/s (configurada en el *Inlet*). Se selecciona esta U porque la convergencia de las simulaciones *CFD* es más rápida que usando valores de U superiores. Tener en cuenta que el y^+ en las paredes del álabe se mantiene por debajo de 5 en todas las simulaciones, incluso para $U = 24$ m/s.

3.2.2.2. Métricas comparativas

Utilizando la malla elegida en el estudio de independencia de malla, se comparan los C_p obtenidos con los dos modelos de turbulencia *Realizable* $k - \varepsilon$ y *SST* $k - \omega$ mediante las métricas del *HR* y *MSE*. Notar que los C_p son calculados en las secciones ubicadas con distancias a 25%, 35%, 60%, 82% y 92% de la longitud del álabe. Notar también que el *NMSE* no se escoge como métrica de comparación para el aerogenerador porque dicha métrica no tiene sentido para parámetros que pueden tomar valores positivos y negativos (Schatzmann et al., 2010) como el caso del C_p . El *MSE* de un modelo numérico sería 0 para una predicción ideal. El *MSE* se define como,

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2. \quad (9)$$

Los valores de umbral para el HR del aerogenerador son los mismos que aquellos considerados para el estudio del edificio de gran altura, como se aprecia en la Sección 3.2.1.2. Notar que Ishihara y Qian (2018) utilizaron diferentes valores de umbral para el HR al analizar distintos valores de U y TI .

El MSE es una métrica empleada para evaluar la precisión de un modelo predictivo. Lo hace calculando la media de las varianzas al cuadrado entre los valores previstos y observados.

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Edificio

3.3.1.1. Estudio de independencia de malla

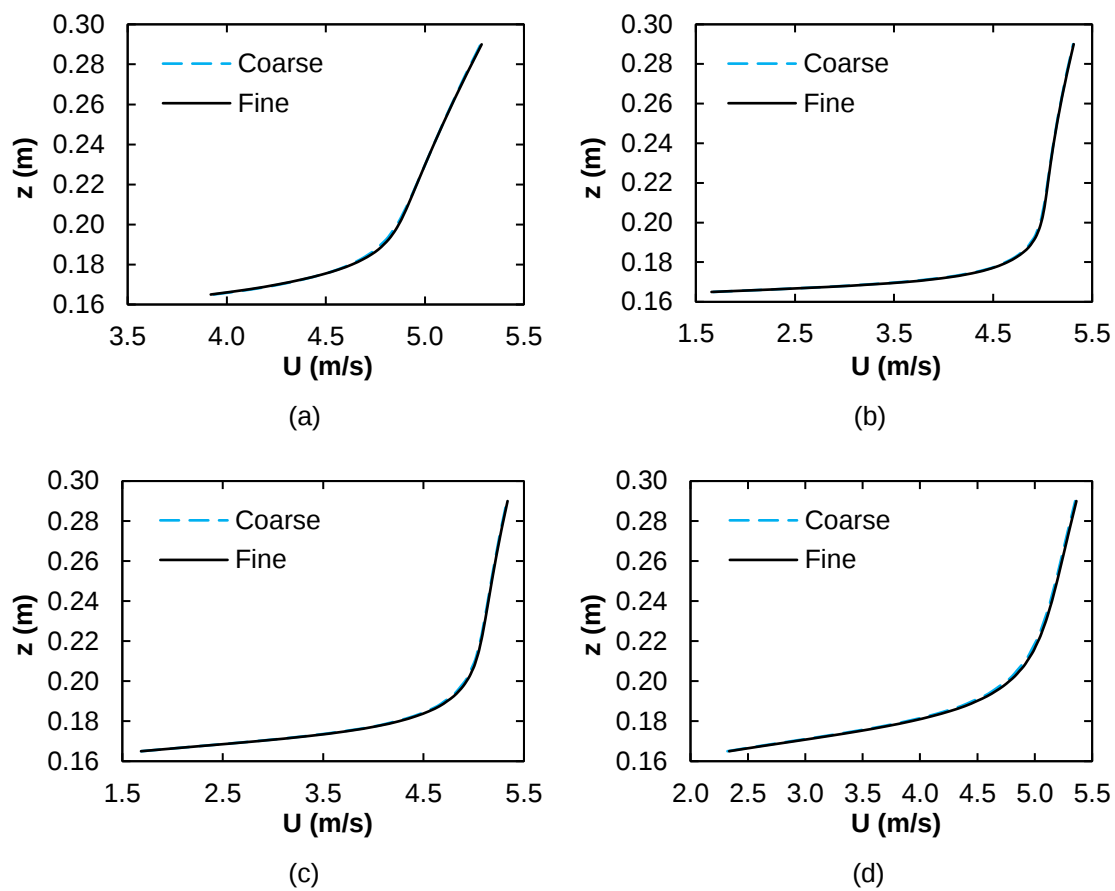
La **Figura 27** muestra los perfiles verticales de U para $z = 0.165 - 0.29$ m, generados a partir de las mallas *Coarse* y *Fine* en distintas posiciones sobre la azotea del edificio. Notar que z representa la altura desde el suelo (*Ground*, $z = 0$ m); asimismo, notar que el modelo del edificio estudiado tiene una altura de 0.16 m (la azotea del edificio está en $z = 0.16$ m). Como se observa en la **Figura 27**, los resultados numéricos de ambas mallas son muy similares. Se pueden observar pequeñas diferencias para $z = 0.18 - 0.20$ m en las posiciones V2 ($< 0.3\%$) y V3 ($< 0.4\%$), y por encima de $z = 0.18$ m en V4 ($< 0.7\%$) y V5 ($< 1\%$).

La **Figura 28** muestra los perfiles verticales de k en varias posiciones sobre la azotea del edificio. Se observan pequeñas diferencias en los resultados de ambas mallas para $z = 0.18 - 0.22$ m en la posición V2, y sobre $z = 0.17$ m en las posiciones V3, V4 y V5. Se hallaron diferencias menores a 1.13% y 3.25% para U y k , respectivamente, entre ambas mallas.

Dado que los resultados numéricos para U y k obtenidos con las mallas *Coarse* y *Fine* son muy similares, se elige la malla *Coarse* para simular los siguientes casos. En la **Figura 29** se muestran los detalles de la malla *Coarse*. Las alturas de la primera celda junto a las paredes del edificio fueron 5×10^{-5} , 2×10^{-4} , 1×10^{-4} y 1×10^{-4} m para las superficies aguas arriba (*Upstream*), aguas abajo (*Downstream*), laterales (*Sides*) y azotea, respectivamente. Se usaron alturas de la primera celda de 2×10^{-4} y 4×10^{-4} m para las superficies *Ground* y *Sky*, respectivamente, con lo cual se mantuvo $y^+ < 5$ en todas las paredes del dominio.

Figura 27

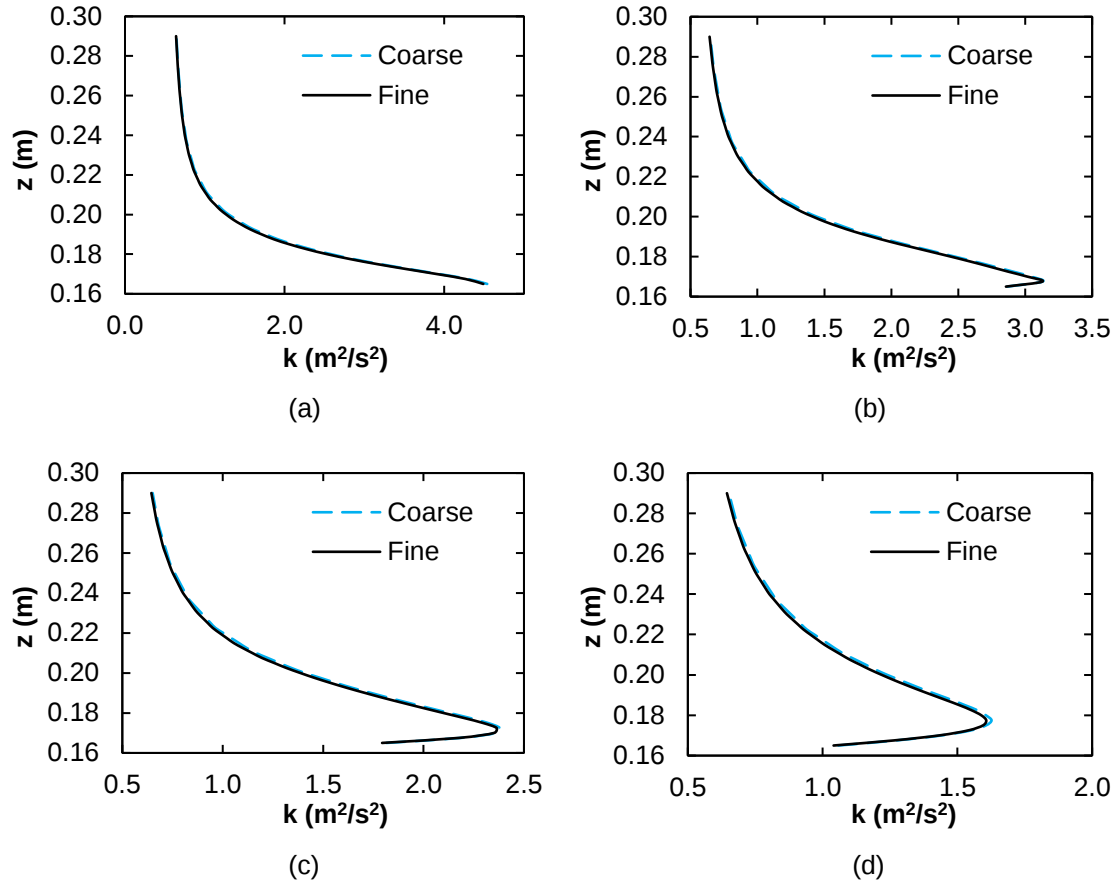
Perfiles verticales de U para distintas posiciones. Estudio de independencia de malla



Nota. (a) V2. (b) V3. (c) V4. (d) V5.

Figura 28

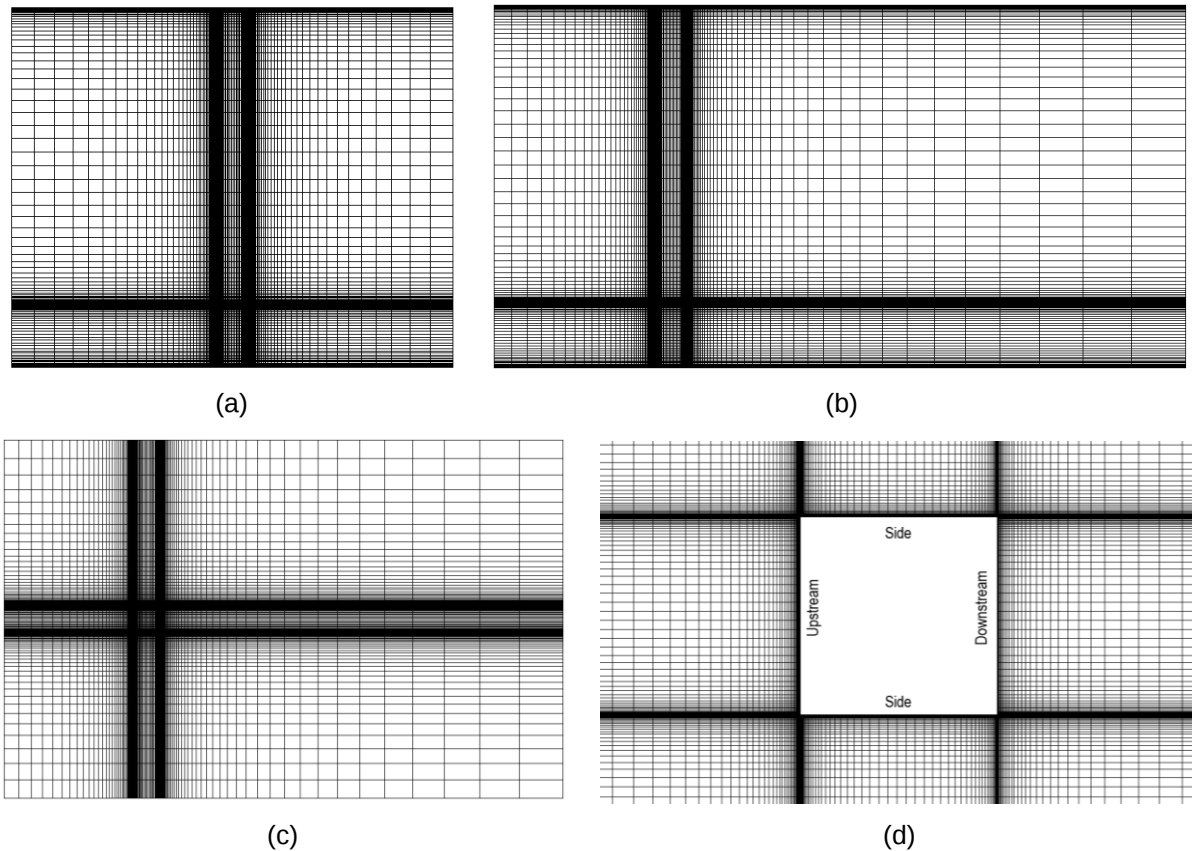
Perfiles verticales de k para distintas posiciones. Estudio de independencia de malla



Nota. (a) V2. (b) V3. (c) V4. (d) V5.

Figura 29

Detalles de la malla Coarse. Simulación del edificio



Nota. (a) Plano Y-Z. (b) Plano Z-X. (c) Plano X-Y. (d) Alrededor del edificio.

3.3.1.2. Métricas comparativas

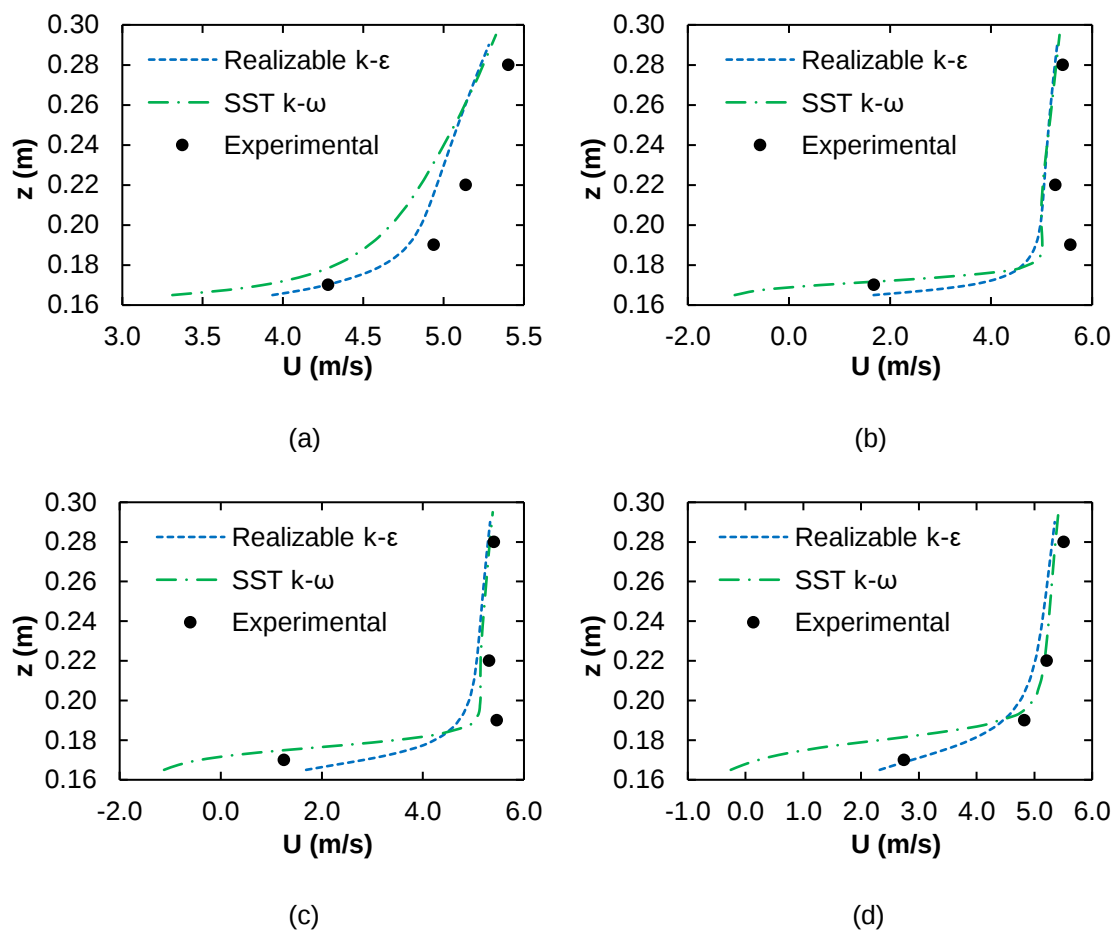
Los perfiles verticales de U y k para las posiciones V2 - V5, generados utilizando los dos modelos de turbulencia, son mostrados en la **Figura 30** y **Figura 31**. En cuanto a los resultados de U , las diferencias más grandes entre los dos modelos de turbulencia aparecieron justo encima de la azotea del edificio (ver **Figura 30**). Por encima del borde *Upstream* del edificio (posición V2, **Figura 30a**), los resultados numéricos del modelo Realizable $k - \varepsilon$ mostraron un mejor acuerdo que aquellos obtenidos con el modelo SST $k - \omega$ al compararlos con las mediciones experimentales de U .

Como se muestra en la **Figura 30b - d**, los resultados numéricos de ambos modelos de turbulencia concuerdan bien con el experimento para $z = 0.22 - 0.28$ m, alcanzando diferencias máximas del 4.6%. El modelo Realizable $k - \varepsilon$ mostró un buen acuerdo con el experimento para $z = 0.17$ m, excepto en las posiciones V3 y V4 donde existen diferencias de hasta 91.9%. En general, los resultados del modelo SST $k - \omega$ presentaron la mejor

concordancia con las mediciones experimentales para $z \geq 0.19$ m. En contraste, el modelo SST $k - \omega$ mostró los peores resultados para $z < 0.19$ m en todas las posiciones.

Figura 30

Perfiles verticales de U para distintas posiciones. Comparación de modelos de turbulencia



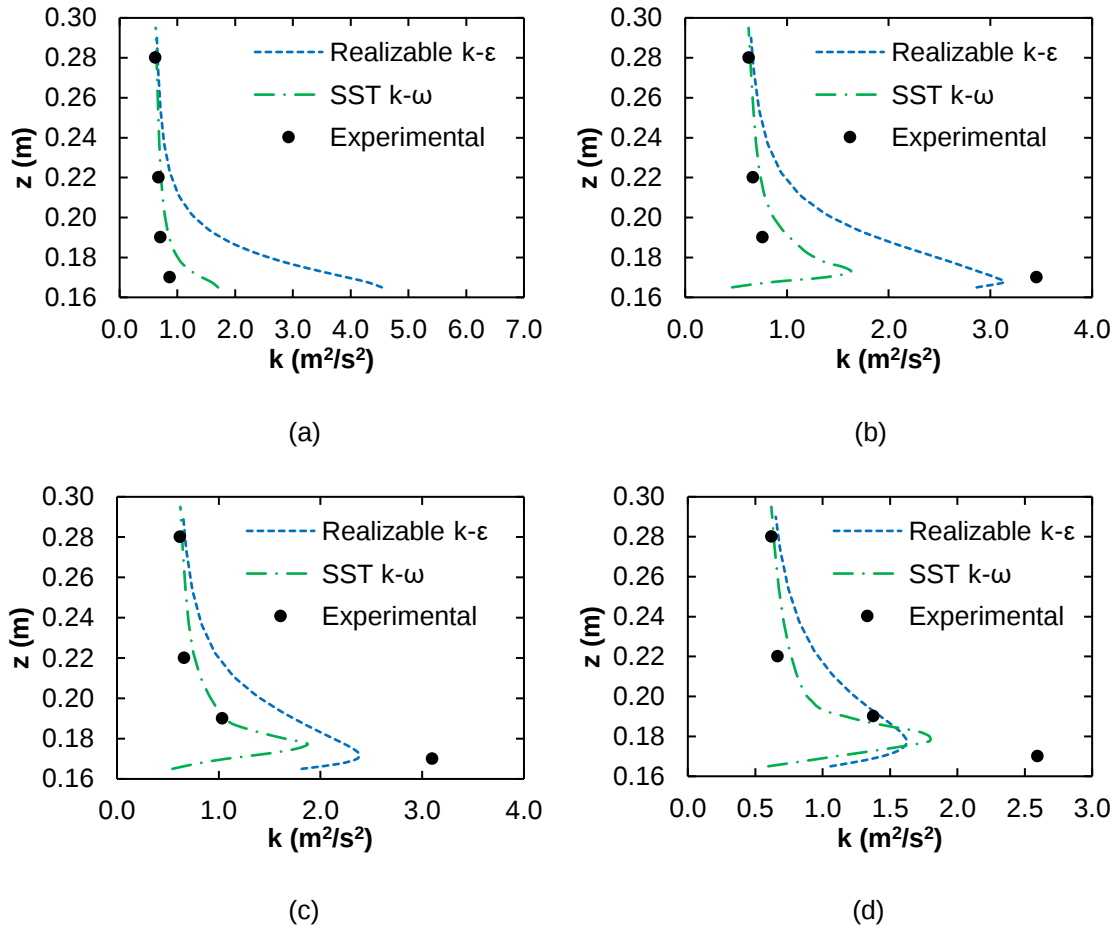
Nota. (a) V2. (b) V3. (c) V4. (d) V5.

Con respecto a los perfiles verticales de k , el modelo de turbulencia SST $k - \omega$ muestra los mejores resultados en la posición V2 (**Figura 31a**). De manera similar, en la posición V3 (**Figura 31b**), los resultados obtenidos a través del modelo SST $k - \omega$ están en buen acuerdo con las mediciones experimentales para $z = 0.22 - 0.28$ m (desviación máxima del 11.4%), pero subestiman el valor de k para $z = 0.17$ m donde solo los resultados del modelo Realizable $k - \varepsilon$ son aquellos que se acercan más a la medición (11.8% de error). Diferencias notorias entre los resultados numéricos y las mediciones experimentales aparecen justo encima de la azotea del edificio en todas las posiciones, especialmente en las posiciones V4 (**Figura 31c**) y V5 (**Figura 31d**). En general, el modelo SST $k - \omega$ brinda buenos resultados para $z = 0.19 - 0.28$ m en todas las posiciones, mientras que ambos modelos predicen el valor de k

correctamente para $z = 0.19$ m en la posición V5 (desviación máxima de 15%). Notar que los modelos estimaron correctamente el valor de k a la altura $z = 0.17$ m en todas las posiciones.

Figura 31

Perfiles verticales de k para distintas posiciones. Comparación de modelos de turbulencia



Nota. (a) V2. (b) V3. (c) V4. (d) V5.

Los resultados del HR para los modelos de turbulencia considerados en este apartado se muestran en la **Tabla 10**. Como se observa, ambos modelos presentan buenos resultados al momento de capturar los valores de U ($HR > 0.81$), pero solo el modelo $SST k - \omega$ tiene un HR superior a 0.66 para k , el cual es el valor mínimo para poder considerar que la predicción fue exitosa (Toja-Silva et al., 2015b). En cuanto al $NMSE$, el modelo $Realizable k - \epsilon$ mostró los mejores resultados para U y k .

Tabla 10

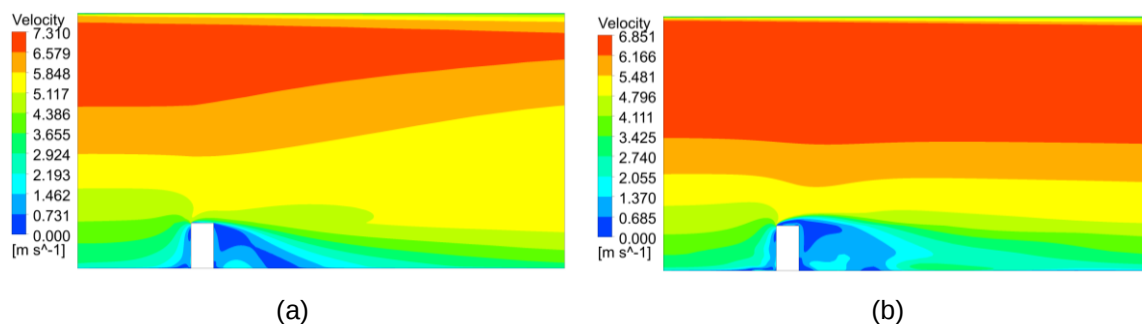
HR y NMSE del edificio

Modelo de turbulencia	HR _U	HR _k	NMSE _U	NMSE _k
Realizable $k - \varepsilon$	0.875	0.375	0.022	0.515
SST $k - \omega$	0.813	0.688	0.039	0.642

Adicionalmente, la **Figura 32** y **Figura 33** comparan los valores de U y k , respectivamente, a través de una representación de contornos realizada en la sección vertical media del dominio computacional. Como se muestra en la **Figura 32**, el modelo *Realizable $k - \varepsilon$* pudo reproducir adecuadamente el comportamiento de X_L sobre la azotea del edificio, mientras que el modelo *SST $k - \omega$* no pudo hacerlo de forma correcta, lo cual está de acuerdo con investigaciones anteriores (Toja-Silva et al., 2015b). Tener en cuenta que con el modelo *Realizable $k - \varepsilon$* se alcanzaron velocidades más altas que con el modelo *SST $k - \omega$* . Los resultados de k (**Figura 33**) obtenidos usando el modelo *Realizable $k - \varepsilon$* son consistentes con el estudio de Toja-Silva et al. (2015b), donde los modelos de turbulencia basados en $k - \varepsilon$ predijeron valores altos de k alrededor de la superficie *Upstream* y sobre la azotea del edificio. Por otro lado, los resultados obtenidos por medio del modelo *SST $k - \omega$* fueron similares a aquellos encontrados en Tominaga (2015) para las regiones sobre la azotea y cerca de la superficie *Downstream* del edificio, pero diferentes en la cara *Upstream*, donde no aparecieron valores altos de k . Este contraste puede deberse a que en esta tesis se utiliza una malla con mayor refinamiento en comparación con la malla utilizada en Tominaga (2015).

Figura 32

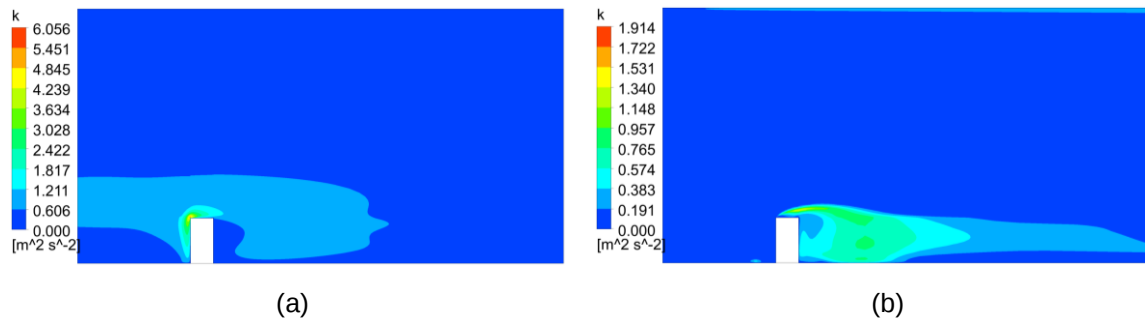
Contornos de U en la sección media del dominio computacional



Nota. (a) Realizable $k - \varepsilon$. (b) SST $k - \omega$.

Figura 33

Contornos de k en la sección media del dominio computacional



Nota. (a) Realizable $k - \varepsilon$. (b) SST $k - \omega$.

3.3.2. Aerogenerador

3.3.2.1. Estudio de independencia de malla

Los resultados numéricos de las fuerzas de empuje y torque del aerogenerador *MEXICO* para $U = 10$ m/s se muestran en la **Tabla 11** y **Tabla 12**. Usando el modelo *Realizable $k - \varepsilon$* (ver **Tabla 11**), la independencia de malla se logró con la malla *Fine*, ya que los resultados de las mallas *Fine* y *Extra fine* solo difieren en 0.48% y 0.92% para las fuerzas de empuje y torque, respectivamente. Por otro lado, la independencia de malla se pudo lograr mediante la malla *Medium*, utilizando el modelo SST $k - \omega$, como se aprecia en la **Tabla 12**. Para este modelo de turbulencia, la diferencia entre la fuerza de empuje y torque para las mallas *Medium* y *Fine* es 0.71% y 2.18%, respectivamente. Nótese que hubiese sido un error realizar el estudio de independencia de malla del aerogenerador *MEXICO* utilizando solamente el modelo SST $k - \omega$ y realizar las siguientes simulaciones con la malla *Medium*, ya que modelo *Realizable $k - \varepsilon$* no logró la independencia con dicha malla. En base a lo expuesto, se eligió la malla *Fine* para simular los siguientes casos.

Tabla 11

Comparación de las fuerzas de empuje y torque para un U de 10 m/s. Estudio de independencia de malla. Modelo de turbulencia Realizable $k - \varepsilon$

Malla	Empuje (N)	Torque (N m)
Coarse	965.313	17.647
Medium	1109.760	69.498
Fine	1132.176	79.741
Extra Fine	1126.719	79.008

Tabla 12

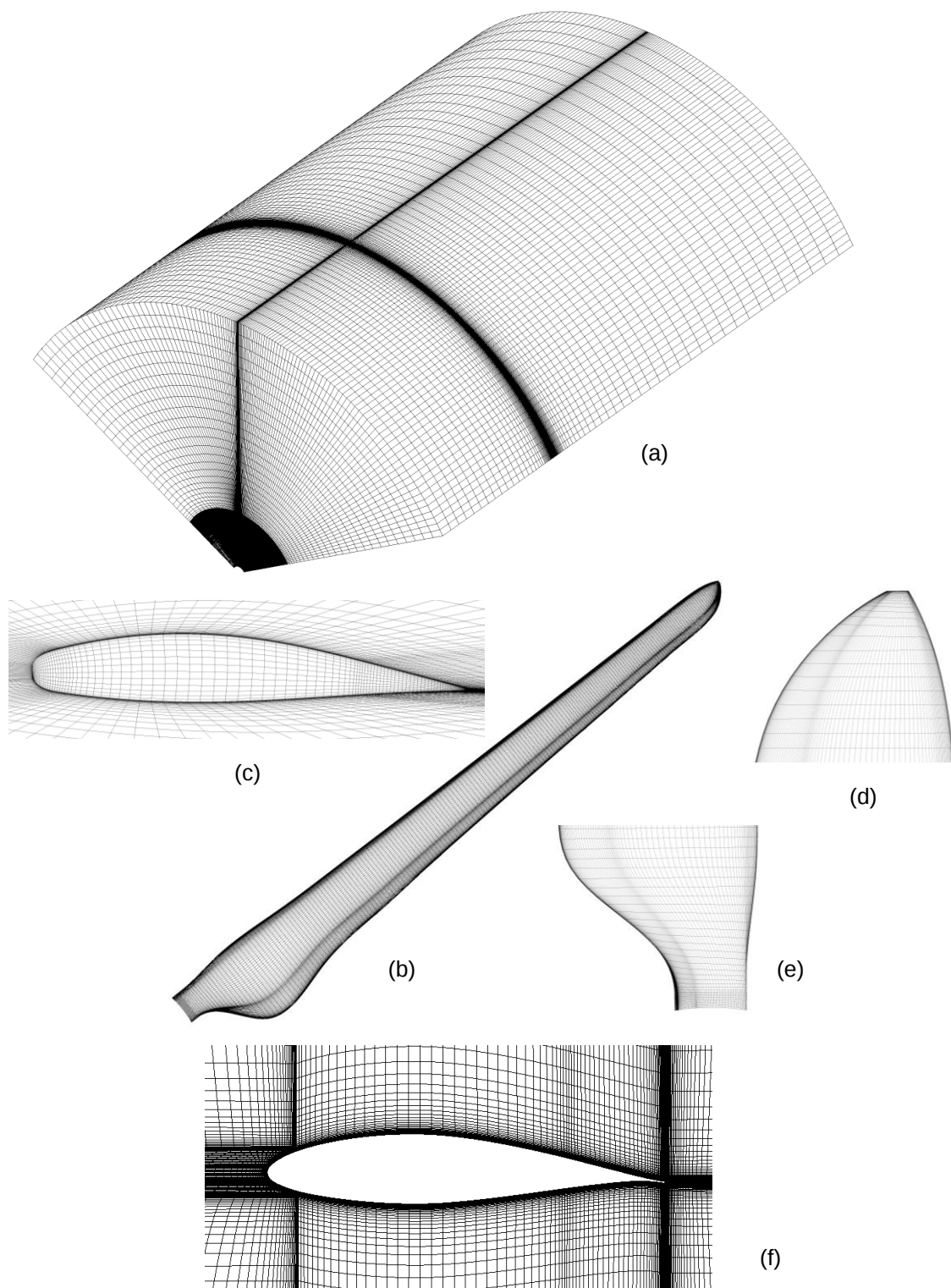
Comparación de las fuerzas de empuje y torque para un U de 10 m/s. Estudio de independencia de malla. Modelo de turbulencia SST $k - \omega$

Malla	Empuje (N)	Torque (N m)
Coarse	964.083	37.259
Medium	1135.539	86.507
Fine	1127.493	84.625
Extra Fine	1124.889	83.904

Los detalles de la malla *Fine* se muestran en la **Figura 34**. Los valores del y^+ se mantuvieron por debajo de 5 en las paredes del álabe utilizando una altura de la primera celda de 1×10^{-6} m. Como se observa en esta figura, se utilizaron elementos de malla más pequeños en las proximidades de las paredes del álabe (ver **Figura 34a**). Un cambio típico en el tamaño de los elementos de malla se observa en la superficie del álabe (**Figura 34b**), es decir, se pueden encontrar elementos más pequeños cerca de la punta (**Figura 34c y Figura 34d**) y en la base de este (**Figura 34e**), donde se espera que ocurran grandes gradientes de presión y velocidad, mientras que los elementos más grandes se ubican en el resto de la superficie del álabe. También, se utilizaron elementos más pequeños alrededor de la superficie del álabe (dirección normal) para poder capturar la física de la capa límite (**Figura 34f**).

Figura 34

Detalles de la malla fina (Fine)



Nota. (a) Vista isométrica del dominio computacional. (b) Vista isométrica del álabe. (c) Vista de planta de la punta del álabe. (d) Punta del álabe. (e) Raíz del álabe. (f) Malla alrededor de una sección del álabe.

3.3.2.2. Métricas comparativas

Los valores del C_p , obtenidos con los 2 modelos de turbulencia, sobre las secciones del álabe a 25%, 35%, 60%, 82% y 92% de su longitud total se muestran en la **Figura 35**. Como se observa en la figura, los resultados numéricos del C_p para ambos modelos de turbulencia son muy similares para $U = 10$ m/s. Algunas diferencias entre los resultados obtenidos con los modelos $SST\ k - \omega$ y *realizable* $k - \varepsilon$ aparecen en las secciones ubicadas al 25% y 35% de la longitud total del álabe, para $U = 15$ m/s. Para $U = 24$ m/s, se encuentran grandes diferencias en los resultados obtenidos con ambos modelos, especialmente al 60% y 82% de la longitud del álabe, entre $y/c = 0$ y 0.4 (lado de succión de los perfiles aerodinámicos).

Al comparar los C_p pronosticados mediante los modelos numéricos y aquellos obtenidos mediante experimentos, los resultados del modelo *Realizable* $k - \varepsilon$ parecen estar más cerca del experimento que aquellos calculados a partir del modelo $SST\ k - \omega$, para $U = 24$ m/s, en la sección a 35% de la longitud del álabe (lado de succión). Para $U = 24$ m/s, los resultados del modelo $SST\ k - \omega$ están más cerca de las mediciones experimentales, en las secciones al 25 % y 35 % del álabe, que aquellos obtenidos con el modelo *Realizable* $k - \varepsilon$. Por el contrario, el modelo *Realizable* $k - \varepsilon$ es más preciso que el modelo $SST\ k - \omega$ prediciendo los valores del C_p en las secciones al 60% y 82% de la longitud total del álabe.

Los resultados del HR y MSE calculados a partir del C_p , para ambos modelos de turbulencia, se muestran en la **Tabla 13**. Como se aprecia en la tabla, los dos modelos de turbulencia no son precisos en la predicción de los valores del C_p ($HR < 0.66$), solamente el modelo *Realizable* $k - \varepsilon$ mostró un HR superior a 0.66 en las posiciones al 60% ($r/R = 0.60$) y 82% ($r/R = 0.82$). En general, con el modelo *Realizable* $k - \varepsilon$ fue posible obtener el mejor HR , mientras que con el modelo $SST\ k - \omega$ se calculó el mejor valor del MSE (ver el resumen de los resultados en la **Tabla 14**).

Figura 35

Distribución del C_p sobre las paredes del álab en las secciones 25%, 35%, 60%, 82% y 92% de su longitud total, para $U = 10, 15$ y 24 m/s

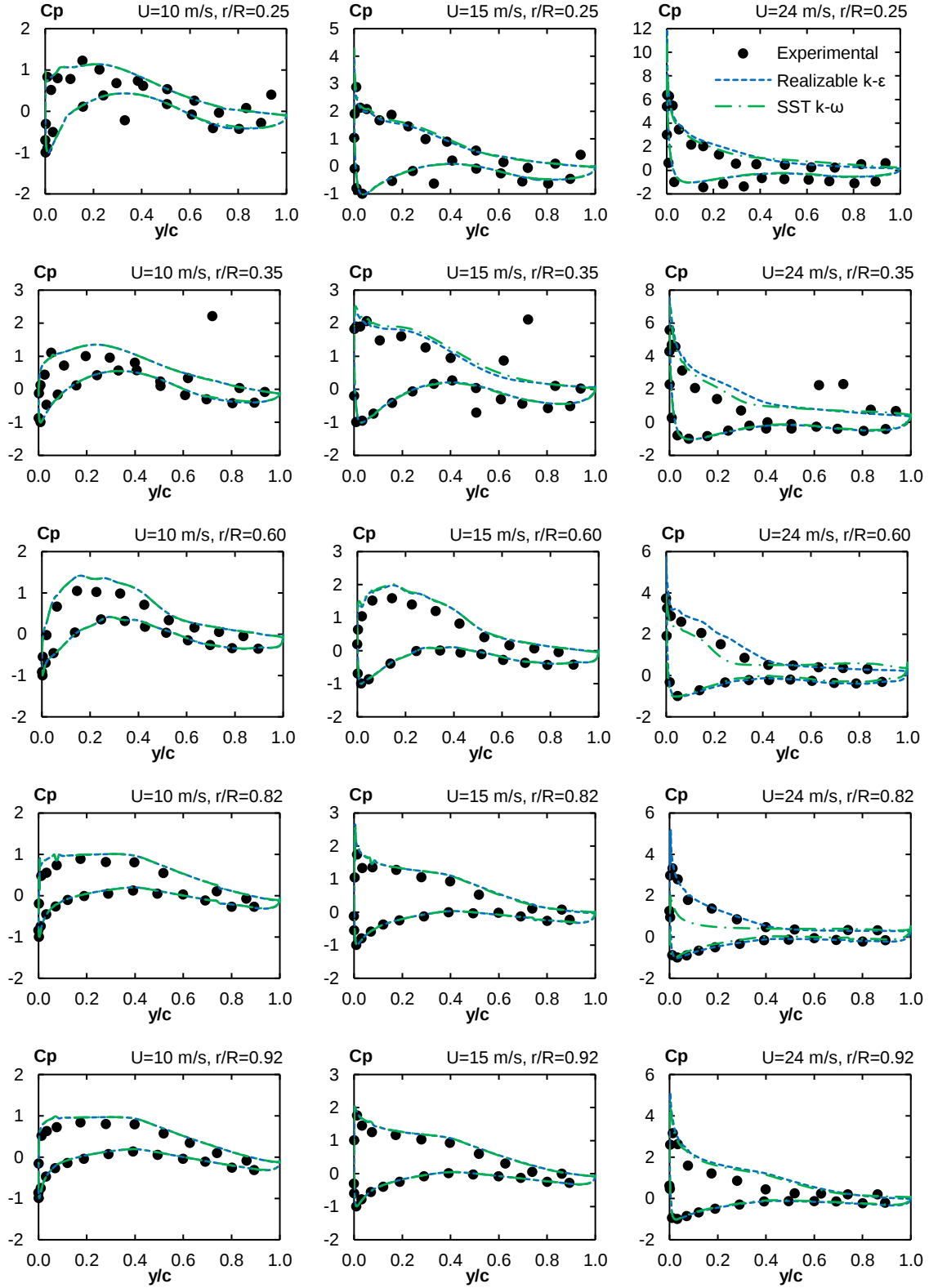


Tabla 13

HR y MSE del aerogenerador MEXICO en distintas secciones

r/R = 0.25						
Modelo de turbulencia	U = 10 m/s		U = 15 m/s		U = 24 m/s	
	HR	MSE	HR	MSE	HR	MSE
Realizable $k - \varepsilon$	0.481	0.096	0.444	0.173	0.148	2.796
SST $k - \omega$	0.481	0.097	0.407	0.221	0.259	2.313
r/R = 0.35						
Modelo de turbulencia	U = 10 m/s		U = 15 m/s		U = 24 m/s	
	HR	MSE	HR	MSE	HR	MSE
Realizable $k - \varepsilon$	0.462	0.226	0.500	0.238	0.370	1.338
SST $k - \omega$	0.423	0.228	0.500	0.259	0.481	0.938
r/R = 0.60						
Modelo de turbulencia	U = 10 m/s		U = 15 m/s		U = 24 m/s	
	HR	MSE	HR	MSE	HR	MSE
Realizable $k - \varepsilon$	0.417	0.034	0.500	0.088	0.708	0.329
SST $k - \omega$	0.417	0.035	0.458	0.110	0.417	0.066
r/R = 0.82						
Modelo de turbulencia	U = 10 m/s		U = 15 m/s		U = 24 m/s	
	HR	MSE	HR	MSE	HR	MSE
Realizable $k - \varepsilon$	0.500	0.033	0.625	0.055	0.750	0.282
SST $k - \omega$	0.542	0.035	0.625	0.063	0.250	0.435
r/R = 0.92						
Modelo de turbulencia	U = 10 m/s		U = 15 m/s		U = 24 m/s	
	HR	MSE	HR	MSE	HR	MSE
Realizable $k - \varepsilon$	0.360	0.024	0.600	0.054	0.480	0.646
SST $k - \omega$	0.400	0.025	0.600	0.061	0.440	0.447

Tabla 14

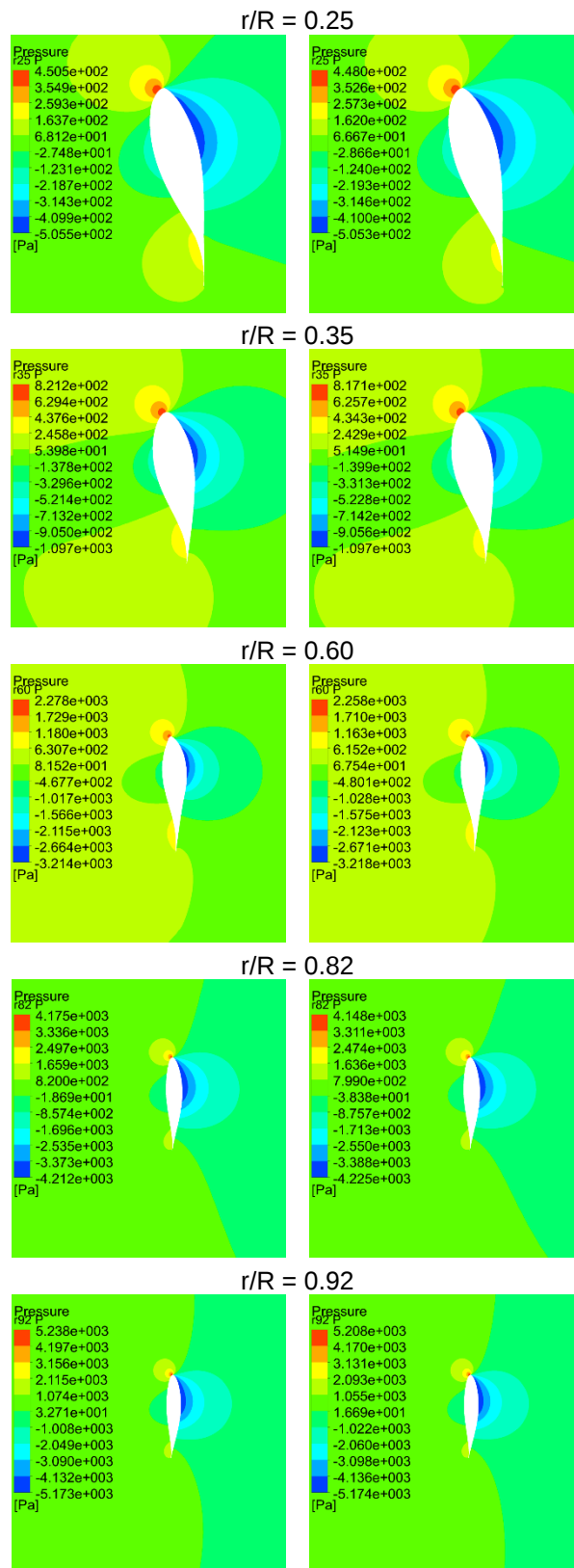
Resumen del HR y MSE del aerogenerador MEXICO

Modelo de turbulencia	HR	MSE
Realizable $k - \varepsilon$	0.485	0.445
SST $k - \omega$	0.451	0.370

La **Figura 36** muestra los contornos de presión alrededor de las distintas secciones del álabe para los modelos de turbulencia *Realizable $k - \varepsilon$* y *SST $k - \omega$* , y $U = 10$ m/s. Las presiones mínimas y máximas obtenidas por ambos modelos son similares, pero la distribución de estas presiones en cada sección del álabe es claramente distinta entre los modelos. Los valores más altos de presión correspondieron al modelo *Realizable $k - \varepsilon$* con 5 664 Pa mientras que los valores obtenidos con el modelo *SST $k - \omega$* llegaron a 5 624 Pa.

Figura 36

Contornos de presión en las posiciones 25%, 35%, 60%, 82% y 92% del álabe, para $U = 10 \text{ m/s}$



Nota. Modelos de turbulencia Realizable $k - \varepsilon$ (izquierda) y SST $k - \omega$ (derecha).

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA PARA EL POSICIONAMIENTO ÓPTIMO DE AEROGENERADORES MONTADOS EN EDIFICIOS USANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL Y ALGORITMOS GENÉTICOS

4.1. Introducción

Las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la quema de combustibles fósiles son un problema para los gobiernos de todo el mundo. En las últimas décadas, este problema se está mitigando con la sustitución parcial de combustibles fósiles por energías renovables, lo cual es fundamental para continuar la transición energética en algunos países (Arteaga-López et al., 2019). En el sector de generación de energía eléctrica, las energías renovables más utilizadas son la hidráulica, solar y eólica.

La energía eólica generalmente es aprovechada por aerogeneradores, que se pueden clasificar según su tamaño (y potencia) en pequeños y grandes. Tener en cuenta que los aerogeneradores pequeños (*SWTs*) tienen un área de barrido del rotor menor o igual a 200 m² (IEC, 2013). Los aerogeneradores de alta potencia se instalan en parques eólicos, mientras que los *SWTs* generalmente se utilizan en ambientes urbanos para abastecer parcialmente cargas residenciales y/o comerciales (Arteaga-López et al., 2019). Los *SWTs* pueden ser *HAWTs* o *VAWTs*.

En cuanto a las metodologías de diseño de *SWTs*, la metodología *IEC 61400-2* (IEC, 2013) incluye varias etapas de cálculo y prueba. Primero, esta metodología define los parámetros operativos para *SWTs*. Luego, se aplican métodos de diseño para el análisis de carga y se calculan los requisitos eléctricos. Además, se realizan pruebas ambientales y mecánicas. También se realizan análisis de resonancia y deflexión crítica. Finalmente, se realiza un análisis de la estructura de soporte. A pesar de que la metodología *IEC 61400-2* es extensa y cubre múltiples disciplinas, algunos estudios han criticado su aplicabilidad para *SWTs* instalados en entornos urbanos. En este sentido, Evans et al. (2017) estudiaron la relación entre las características del viento asumidas en la metodología *IEC 61400-2* y el rendimiento de un aerogenerador *Aerogenesis* de 5 kW instalado en dos lugares, *Port Kennedy* y *Callaghan* (Australia). Los resultados de la aplicación de la metodología *IEC 61400-2* mostraron una subestimación de la *TI* para velocidades del viento superiores a 4 m/s y una disminución en la potencia media prevista. Los autores concluyeron que la norma *IEC 61400-2* no es aplicable a *SWTs* instalados en entornos urbanos. Además, Rakib et al. (2019)

encontraron altas velocidades verticales de viento y altas fluctuaciones con una desviación estándar superior a 2 m/s dentro del ambiente urbano. Además, la turbulencia en velocidades verticales fue un 20% mayor que las encontradas en la norma *IEC 61400-2*, lo que revela la no aplicabilidad de dicha metodología en sistemas que involucran *SWTs*.

En ambientes urbanos, los *SWTs* se pueden instalar sobre las azoteas de los edificios, es decir, *BMWTs*, para aprovechar la amplificación de la velocidad del viento que se encuentra allí. El edificio se utiliza como una torre para que la turbina gane altura aumentando su captación de energía eólica y consecuentemente su producción de energía eléctrica.

Es difícil predecir las condiciones del viento (velocidades, direcciones y niveles de turbulencia) en los ambientes urbanos. Estos parámetros de viento son necesarios para diseñar *BMWTs* y ubicarlos sobre las azoteas de los edificios de forma adecuada. Para hacer frente a este problema, los diseñadores utilizan el enfoque basado en *CFD* para predecir el comportamiento del flujo de viento y diseñar aerogeneradores más eficientes.

Heath et al. (2007) realizaron uno de los primeros trabajos basados en *CFD* para predecir el comportamiento del flujo de viento en un entorno urbano formado por 24 viviendas, descubriendo que la energía eólica variaba a medida que cambiaba la dirección del viento incidente. Los autores dieron algunas ideas sobre cuáles son las mejores zonas para la instalación aerogeneradores sobre la azotea de las viviendas. Tabrizi et al. (2014) realizaron simulaciones *CFD* de un ambiente urbano real situado en Australia. Los resultados de la simulación mostraron una coincidencia razonablemente buena cuando se compararon con las mediciones de la velocidad del viento realizadas en el sitio (error máximo del 30.3% para la dirección noreste). Los autores descubrieron que el centro de la azotea era el mejor lugar para instalar un *HAWT*, ya que en dicha zona experimentaría menos cargas de fatiga debido al flujo vertical. Más recientemente, Juan et al. (2021) llevaron a cabo un estudio numérico para determinar el potencial de energía eólica urbana alrededor de edificios de gran altura en un área real altamente urbanizada. Sus resultados *CFD* también fueron comparados con mediciones de viento dentro de un proceso de validación, logrando discrepancias máximas del 20% para la velocidad del viento, dirección del viento e *TI*. Los autores concluyeron que los obstáculos aguas arriba disminuyen la densidad de energía eólica y elevan los niveles de turbulencia aguas abajo del flujo. Además, los autores dieron algunas sugerencias para la instalación de *BMWTs* dentro del área urbanizada estudiada.

Algunas metodologías para evaluar la instalación de *BMWTs* se plantearon en el pasado. Por ejemplo, Gagliano et al. (2013) propusieron una metodología compuesta por simulaciones *CFD* y una base de datos implementada en un sistema de información geográfica para evaluar

la viabilidad de *BMWTs*. La metodología se aplicó a un caso de estudio que incluyó una zona urbana en *San Cataldo* (Italia). Se utilizaron dos tipos de *BMWTs*, un *HAWT* y dos *VAWTs* (*Darrieus* y *Savonius*). Se simularon cuatro direcciones del viento para investigar su incidencia sobre la captación de energía eólica de los aerogeneradores. Los autores concluyeron que la energía producida por el aerogenerador *Darrieus* fue un 61.32% superior al *HAWT*. Deltenre y Runacres (2019) realizaron un estudio de viabilidad para la instalación de un *HAWT* de 3 kW sobre un edificio de 150 m de altura llamado *South Tower* (Bélgica). Los autores siguieron una metodología que consistió en la evaluación del sitio, evaluación de la estabilidad, consideraciones ambientales y análisis económico. Las consideraciones ambientales incluyeron al ruido, efecto *flicker*, impacto visual, biodiversidad y análisis del tráfico aéreo. Los resultados mostraron que el mejor lugar para colocar el aerogenerador fue en el lado aguas arriba de la azotea del edificio. Además, la viabilidad económica de la instalación del aerogenerador fue baja debido al elevado costo del estudio, alcanzándose valores de costo nivelado de la energía entre 0.95 y 0.36 €/kWh para velocidades medias del viento entre 4 y 6 m/s, respectivamente. Además, Arteaga-López et al. (2019) desarrollaron una metodología para evaluar la instalación de *BMWTs* utilizando un enfoque *CFD*. La metodología se aplicó a un caso de estudio sobre el posicionamiento de 5 *BMWTs* sobre la azotea de un edificio ubicado dentro de una universidad en México. Estos *BMWTs* pueden generar 104 802 kWh al año. El estudio solo consideró una dirección y velocidad del viento. Los autores concluyeron que la metodología podría reducir el tiempo y el costo de los estudios de viabilidad cuando se desarrollan proyectos eólicos. Más recientemente, Zabarjad Shiraz et al. (2020) también desarrollaron una metodología para evaluar el rendimiento y la potencia de salida de *BMWTs*. La metodología combinó simulaciones *CFD* y datos meteorológicos. Se simularon dos sitios (casos de estudio), una parte del centro de la ciudad y una zona comercial en una región suburbana de *Montreal* (Canadá). Se simuló el viento en 8 direcciones diferentes para calcular las velocidades del flujo en cuatro puntos de control que representaron la ubicación de los *BMWTs*. Estos puntos se ubicaron sobre las esquinas de dos edificios. Se estimaron producciones de energía anual entre 15 y 408 kWh para un aerogenerador *Darrieus* ubicado en los puntos de control. Los autores concluyeron que su metodología se puede utilizar para analizar múltiples sitios y aerogeneradores simultáneamente. Según se aprecia en los trabajos mencionados, estos no consideraron la optimización del posicionamiento de los aerogeneradores, que podría mejorar la captación de energía eólica de los *BMWTs* (proporcional a la producción de electricidad), y reducir sus costos.

En cuanto a la optimización del posicionamiento, es habitual encontrar estudios relacionados con la optimización del diseño de aerogeneradores aplicados a parques eólicos. Tener en cuenta que este tipo de optimización es una de las tecnologías más importantes utilizadas

para aumentar la disponibilidad de la energía eólica (Chen et al., 2016). En este sentido, Moorthy et al. (2014) propusieron un enfoque novedoso para optimizar la ubicación de aerogeneradores de un parque eólico para maximizar la producción de energía utilizando *GA*. Su metodología ofreció mayor flexibilidad en comparación con otros trabajos porque no se emplearon cuadrículas para dividir el espacio de búsqueda. Los autores emplearon el modelo de estela de Jensen para representar la conservación del impulso en la estela aguas abajo del aerogenerador. Los autores utilizaron un tamaño de población de 600 individuos para el *GA*. Además, Moorthy y Deshmukh (2015) propusieron otro enfoque para determinar la ubicación óptima de aerogeneradores en un parque eólico para maximizar la producción de energía, utilizando la optimización de enjambre de partículas. También utilizaron el modelo de estela y compararon su enfoque con métodos anteriores de la literatura que se centraban en optimizar la ubicación de los aerogeneradores, utilizando principalmente *GA*. Rajper y Amin (2012) investigaron el problema del posicionamiento aplicado a un parque eólico. Consideraron una altura fija para el *hub* y utilizaron un *GA* para minimizar el costo de la instalación por unidad de potencia. Los autores encontraron un diseño final que constó de 54 aerogeneradores, una eficiencia general de aproximadamente el 97% y un costo adimensional por unidad de potencia de 1.3292×10^{-3} . Cabe señalar que en este tipo de optimización es frecuente utilizar el modelo de estela lineal desarrollado por Jensen para cuantificar la reducción de las velocidades del viento detrás de los aerogeneradores. K. Chen et al. (2016) estudiaron la optimización del diseño de aerogeneradores utilizando dos alturas del *hub* y un algoritmo *Greedy* para minimizar el costo por unidad de potencia. Los autores utilizaron el modelo de estela lineal y el modelo de estela de partículas para calcular el flujo de viento en terrenos planos y complejos, respectivamente. Los autores concluyeron que el diseño con dos alturas del *hub* aumentaba la potencia total y disminuía notablemente el costo por unidad de potencia (alcanzando valores de 1.046 €/W para $U = 14$ m/s) en comparación con el diseño con una sola altura del *hub*. Song et al. (2018) también estudiaron la optimización del diseño de aerogeneradores con múltiples alturas del *hub* instalados sobre un terreno plano utilizando el algoritmo de enjambre de partículas gaussiano para minimizar el costo por unidad de potencia de salida. Se utilizaron tres casos de estudio para evaluar el desempeño del método. Los resultados numéricos mostraron que se necesita una optimización 3D para hacer frente a este tipo de problema. Más recientemente, Hu et al. (2022) propusieron un enfoque relacionado con el posicionamiento de aerogeneradores dentro de parques eólicos ubicados sobre terrenos complejos utilizando mediciones meteorológicas, *CFD* y *GA*. Este enfoque utilizó una tasa de mutación variable para evitar encontrar óptimos locales. Luego, el enfoque propuesto se comparó con el algoritmo *Greedy*. Con el *GA* se obtuvieron relativamente mejores resultados, logrando una función objetivo (*Objective Function, OF*) mínima 5.2% menor que con el algoritmo *Greedy*, en términos de

probabilidad de encontrar el óptimo global. Por esta razón, *GA* fue utilizado en la presente tesis.

Por otro lado, Ovgor et al. (2012) propusieron un método para determinar la ubicación óptima de *BMWTs* utilizando la distribución de *Weibull* y *CFD*. Para la representación adecuada de las características del viento se utilizaron las distribuciones de *Weibull* y *von Mises*. Los datos del viento correspondieron a 52 505 valores medidos entre mayo de 2008 y mayo de 2009. Los datos se agruparon en intervalos de 1 m/s para velocidades y 16 direcciones del viento. Los autores simularon un modelo de edificio en forma de cubo de 50 m de lado para estimar la aceleración de las velocidades del viento sobre la azotea de estos utilizando *CFD*. Las simulaciones incluyeron 9 posiciones a 3 m por encima de la azotea del edificio. El solucionador *CFX* se utilizó para resolver las ecuaciones *URANS*. La malla contenía 5'800 000 elementos tetraédricos. Para calcular la producción de energía a través de su curva de potencia se utilizó el modelo *Aeronet AN-TR2* de 2 kW, logrando valores anuales entre 0 y 1 444 kWh para las 9 posiciones evaluadas. La ubicación óptima del *VAWT* se determinó en función de la mayor energía generada (relacionada con la aceleración del flujo) y la dirección dominante. De manera similar, Q. Wang et al. (2018) realizaron un estudio para encontrar algunos indicios sobre el mejor posicionamiento de *BMWTs* sobre el Edificio de Ingeniería y Tecnología (edificio A) utilizando *CFD* y mediciones lidar. El método de posicionamiento desarrollado por los autores incluyó dos análisis del sitio, uno preliminar y otro preciso. En el análisis del sitio preliminar sólo se simuló la dirección predominante del viento. Por otro lado, se simularon ocho direcciones del viento en la etapa de posicionamiento preciso. Los resultados sugirieron que las mejores ubicaciones para instalar *BMWTs* están cerca del lado aguas arriba de la azotea en alturas que oscilan entre 1.51 y 1.79 veces la altura del edificio. En estos lugares la aceleración del viento alcanza su valor máximo. Como se señaló, este estudio no realizó una optimización que pudiera reducir los costos y aumentar la producción de energía de los *BMWTs*, como se hace en los parques eólicos. Más recientemente, Arteaga-López y Angeles-Camacho (2021) desarrollaron una metodología para la evaluación del potencial eólico y posicionamiento de *BMWTs*. Esta metodología utilizó una geometría de prisma triacontakaihexagonal como dominio computacional, lo que permitió el uso de 36 direcciones de viento, tomadas de una rosa de viento. Los resultados mostraron que la metodología mejoró el posicionamiento de 4 *BMWTs*, en comparación con estudios *CFD* convencionales donde solo se simula una dirección del viento.

En consecuencia, en esta parte de la investigación se propone una metodología para el diseño y optimización del posicionamiento de *BMWTs* mediante el uso de *CFD* y *GA*. En primer lugar, se realiza una evaluación del sitio y se dan algunas recomendaciones relacionadas con

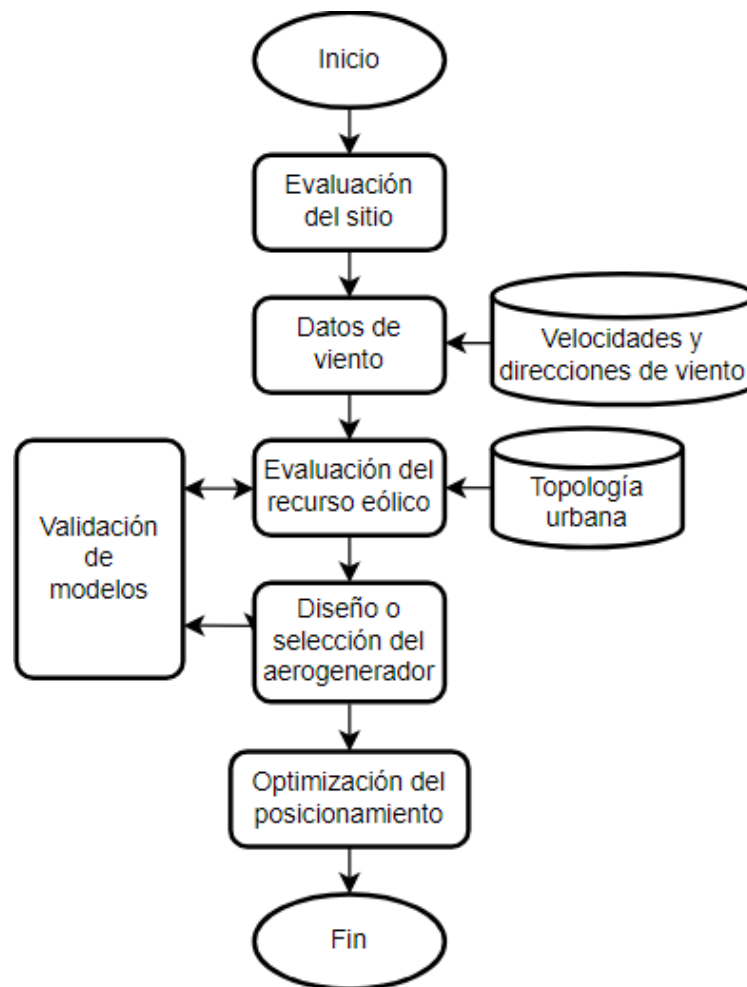
la viabilidad de la instalación. A continuación, se llevan a cabo tratamientos de los datos del viento para determinar qué velocidades y direcciones del viento se utilizarán en las siguientes etapas. Luego, se simulan las velocidades y direcciones del viento junto con el entorno urbano de interés mediante *CFD* (etapa de evaluación del recurso eólico). Con base en los resultados *CFD*, se selecciona un *BMWT* en la siguiente etapa. Este *BMWT* también se simula usando *CFD* para obtener su curva de potencia. Es necesario validar previamente dos modelos numéricos (edificio y aerogenerador) para que los resultados sean confiables. Además, se determinan restricciones relacionadas con zonas de bajas velocidades del viento y altos niveles de turbulencia. Estas restricciones se utilizan en la optimización del posicionamiento para la obtención de la solución óptima, es decir, la posición final del *BMWT* sobre la azotea del edificio, que minimice el costo de la energía producida. Nótese que el costo de la instalación se aproxima mediante un modelo simplificado, mientras que la energía producida se calcula a partir de las velocidades del viento pronosticadas (etapa de evaluación del recurso eólico) y la curva de potencia del aerogenerador.

4.2. Metodología

La metodología de posicionamiento óptimo propuesta en esta tesis se muestra en la **Figura 37** y cada etapa se describe a detalle en las siguientes subsecciones. La metodología comienza con una etapa de evaluación del sitio, donde se elige el espacio de búsqueda para posicionar el *BMWT* en base a restricciones normativas. A continuación, los datos del viento se analizan estadísticamente para determinar qué velocidades y direcciones del viento se utilizarán en la etapa de evaluación del recurso eólico. Esta última etapa sirve para encontrar la distribución de velocidades de viento sobre la azotea del edificio objetivo (primera base de datos generada), simulando el entorno urbano de interés donde se instalará el *BMWT*. En la etapa de diseño o selección del aerogenerador se pueden determinar las características de un modelo de aerogenerador previamente elegido (curva de potencia). Esta curva de potencia representa una segunda base de datos generada. Para garantizar resultados viables, tanto el modelo de entorno urbano como el de aerogenerador, se validan comparándolos con mediciones experimentales. Es importante señalar que las etapas de evaluación del recurso eólico, diseño o selección del aerogenerador y validación del modelo implican simulaciones *CFD*. Finalmente, se realiza una optimización del micrositing para determinar la mejor posición para instalar el aerogenerador sobre la azotea del edificio objetivo. La optimización se realiza utilizando *GA* y las bases de datos mencionadas anteriormente.

Figura 37

Metodología de posicionamiento óptimo de aerogeneradores urbanos



4.2.1. Evaluación del sitio

Esta etapa está relacionada con los análisis previos necesarios para comprobar la viabilidad de la instalación del *BMWT* en un área específica. En consecuencia, primero es necesario saber qué leyes y regulaciones rigen el sitio donde se instalará el *BMWT*; consideraciones relacionadas con restricciones de la estructura del edificio donde es posible o no la instalación de *BMWTs* (Moreira Chagas et al., 2020), es decir, analizar si la estructura puede soportar al aerogenerador que se instalará sobre ella o si será necesario reforzar la estructura. Además, se deben analizar las restricciones de espacio sobre las azoteas de los edificios. También deben tenerse en cuenta otras consideraciones que podrían hacer inviables las instalaciones eólicas como las restricciones medioambientales, los límites de ruido y el rechazo social. Superadas estas restricciones, se pueden llevar a cabo las siguientes etapas relacionadas con los cálculos del *BMWT*.

4.2.2. Datos de viento

Los datos del viento incluyen mediciones de la velocidad y dirección realizadas cerca del área urbana que se modelará. Tener en cuenta que las técnicas convencionales para predecir el comportamiento del viento implican mediciones de hasta un año (Heath et al., 2007). Estas mediciones suelen ser realizadas por institutos, universidades y centros meteorológicos.

En esta tesis, el tratamiento de los datos de viento se realiza mediante un código de rosa de viento implementado en Python (*Windrose*, n.d.). La rosa de viento está organizada en 16 direcciones e intervalos de velocidad con 1 m/s de ancho. Se calcula un promedio por cada intervalo de velocidad (U_{prom}) en función de sus valores cúbicos, que están asociados con la energía eólica disponible que los aerogeneradores,

$$U_{prom} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^n U_i^3}{n_j}}, \quad (10)$$

donde U_i y n_j representan las velocidades del viento medidas y el número de mediciones de velocidad por intervalo, respectivamente.

Además, se construye una tabla que muestra la frecuencia de ocurrencia de velocidades y direcciones. En las simulaciones de las siguientes etapas se utilizan velocidades promedio y direcciones que representan la mayoría de las ocurrencias. Tener en cuenta que es importante descartar aquellas velocidades y direcciones que tienen un nivel bajo de ocurrencia para reducir el número total de simulaciones *CFD*.

4.2.3. Validación de modelos

La validación del modelo incluye estudios de independencia de malla donde también se realizan comparaciones entre resultados numéricos y mediciones experimentales. Estas comparaciones ayudan a los diseñadores a conocer el nivel de precisión/exactitud de los modelos numéricos.

En este trabajo es necesario validar dos modelos, un modelo del edificio, que representa un área urbana, y un aerogenerador. El modelo del edificio se usa en la etapa de evaluación del recurso eólico, mientras que el modelo del aerogenerador se utiliza en la etapa de diseño. Los resultados obtenidos para ambos modelos se utilizan luego en la etapa de optimización del posicionamiento.

Los modelos de turbulencia *Realizable $k - \varepsilon$* y *SST $k - \omega$* se utilizan en este trabajo para tratar los tensores de Reynolds $\overline{u_i' u_j'}$ de la formulación *RANS*, para las simulaciones del edificio y aerogenerador, respectivamente. Se han elegido estos modelos de turbulencia porque han demostrado un compromiso aceptable entre precisión y costo computacional en las simulaciones del edificio y aerogenerador como se aprecia en la Sección 3.2.

Se emplean los programas *ICEM CFD* y *Fluent* para construir las mallas y realizar las simulaciones, respectivamente. Se utiliza el algoritmo *SIMPLE*. Para los gradientes se emplea el método *least squares cell-based*. Para la presión, el momento, k , ε y ω se usan esquemas de segundo orden. Los residuales se fijan en 10^{-5} para todas las variables (criterio de convergencia). La **Tabla 15** presenta los parámetros generales usados en las simulaciones *CFD*.

Tabla 15

Parámetros generales de las simulaciones CFD

Parámetro	Valor
Estado	Estacionario
Mallador	ICEM CFD
Solver	Fluent
Algoritmo	SIMPLE
Gradientes	Least squares cell-based
Esquemas	Segundo orden
Residuales	10^{-5}

4.2.3.1. Edificio

Se simula un dominio computacional que incluye un edificio con dimensiones de 15.24 m (ancho) x 15.24 m (largo) x 30.48 m (H , altura del edificio). El dominio computacional es un hexadecágono con 194 m de borde y 342.9 m de altura (ver **Figura 38**). Tener en cuenta que las superficies del *Ground* y del *Building* se fijan como paredes, mientras que el límite superior del dominio (*Sky*) se trata como un plano de simetría. En particular, 7 superficies del dominio exterior están configuradas con condiciones de entrada de velocidad, 7 superficies corresponden a salidas de presión y 2 superficies son planos de simetría. Por ejemplo, cuando el viento sopla de S (sur) a N (norte), las superficies WSW (oeste suroeste), SW (suroeste), SSW (sur suroeste), S (sur), SSE (sur sureste), SE (sureste) y ESE (este sureste) se trabajan como entradas de velocidad, las superficies WNW (oeste noreste), NW (noreste), NNW (nornoreste), N (norte), NNE (nornoreste), NE (noreste) y ENE (este noreste) se configuran como salidas de presión, y las superficies W (oeste) y E (este) son planos de

simetría. Las superficies de entrada de velocidad están configuradas con una capa límite atmosférica determinada por la ley de potencia como,

$$u_z = u_r \left(\frac{h_z}{h_r} \right)^\alpha, \quad (11)$$

donde u_z es la velocidad extrapolada a la altura h_z , y u_r representa la velocidad medida a la altura de referencia h_r . Asimismo, α es el coeficiente de *Hellman*. La **Tabla 16** muestra los parámetros *CFD* empleados para simular el edificio.

Figura 38

Dominio computacional para la simulación del edificio

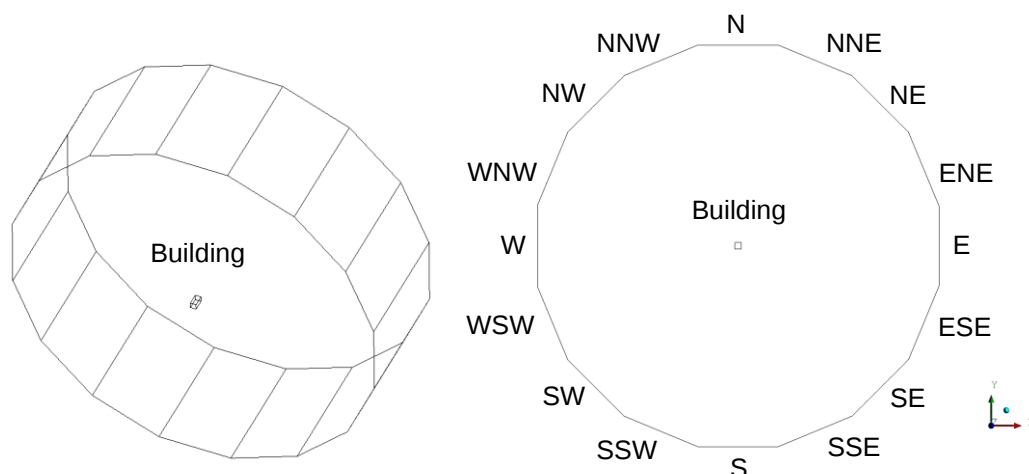


Tabla 16

Parámetros CFD para la simulación del edificio

Parámetro	Valor
Modelo de turbulencia	Realizable $k - \varepsilon$
Geometría del dominio	Hexadecágono
Tamaño del dominio	Lado = 194 m
Dimensiones del edificio	Altura = 342.9 m
	Ancho = 15.24 m
	Largo = 15.24 m
	Altura = 30.48 m
Condiciones de borde	Ground (pared)
	Building surfaces (pared)
	Sky (simetría)
	7 outer surfaces (entrada de velocidad)
	7 outer surfaces (salida de presión)
Velocidad de ingreso	2 outer surfaces (simetría)
	Perfil de velocidades calculado con la Ecuación (11)

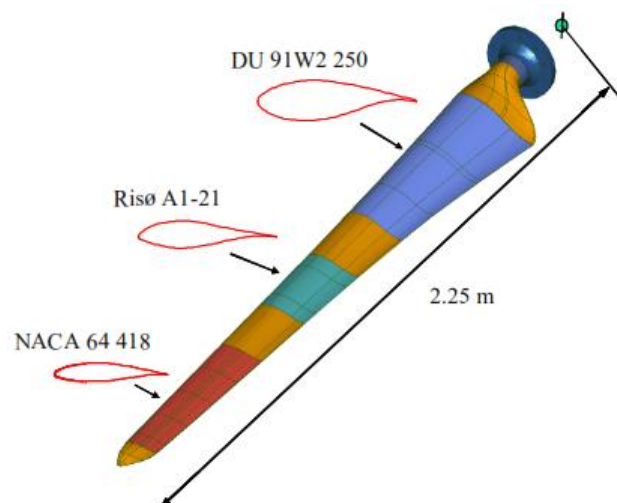
En el estudio de independencia de malla se usan tres mallas (*Coarse*, *Medium* y *Fine*), las cuales contienen 3'948 800, 8'101 184 y 16'786 752 celdas, respectivamente. Valores de $y^+ < 5$ se usan en todas las paredes, los cuales están dentro del rango aceptable para el modelo *Realizable $k - \varepsilon$* (Shih et al., 1995) con tratamiento de pared mejorado, que se utiliza para simular el edificio. Tener en cuenta que los resultados de U y k obtenidos sobre la posición media de la azotea del edificio solo se comparan en este estudio, ya que este se centra principalmente en la interacción del flujo de aire, el edificio y el aerogenerador. Dado que no existen datos sobre mediciones experimentales del edificio utilizado aquí, no se lleva a cabo un proceso de validación.

4.2.3.2. Aerogenerador

La validación del modelo de aerogenerador *MEXICO* (Model Experiments in Controlled Conditions, 2007) se describe en mayor detalle en la Sección 3.2.2; el cual cuenta con 3 álabes y un rotor de 4.5 m de diámetro. Sus álabes están compuestos por los perfiles aerodinámicos *DU 91-W2-250*, *RISØ A1-21* y *NACA 64-418* (ver **Figura 39**). Las simulaciones se realizan utilizando el modelo de turbulencia *SST $k - \omega$* (Menter, 1994). Se usaron 4 mallas, siendo estas *Coarse*, *Medium*, *Fine* y *Extra fine*, conteniendo 5'149 318, 8'094 168, 14'932 927 y 24'703 452 celdas, respectivamente. La **Tabla 17** muestra los parámetros *CFD* empleados para simular el aerogenerador.

Figura 39

Geometría del álabes del aerogenerador MEXICO



Nota. Tomado de Snel et al. (2009).

Tabla 17

Parámetros CFD para la simulación del aerogenerador

Parámetro	Valor
Modelo de turbulencia	SST $k - \omega$
Geometría del dominio	Cilíndrico 1/3
Tamaño del dominio	Radio interno estacionario = 2.7 m Radio interno rotacional = 11.3 m Largo del dominio = 24.75 m
Dimensiones del aerogenerador	Diámetro del rotor = 4.5 m Perfiles DU 91-W2-250, RISØ A1-21 y NACA 64-418
Condiciones de borde	Turbine (pared) Top (simetría) Inlet (entrada de velocidad) Outlet (salida de presión) Front y Back (periódico) Bottom (deslizante)
Velocidad de ingreso	10 m/s

4.2.4. Evaluación del recurso eólico

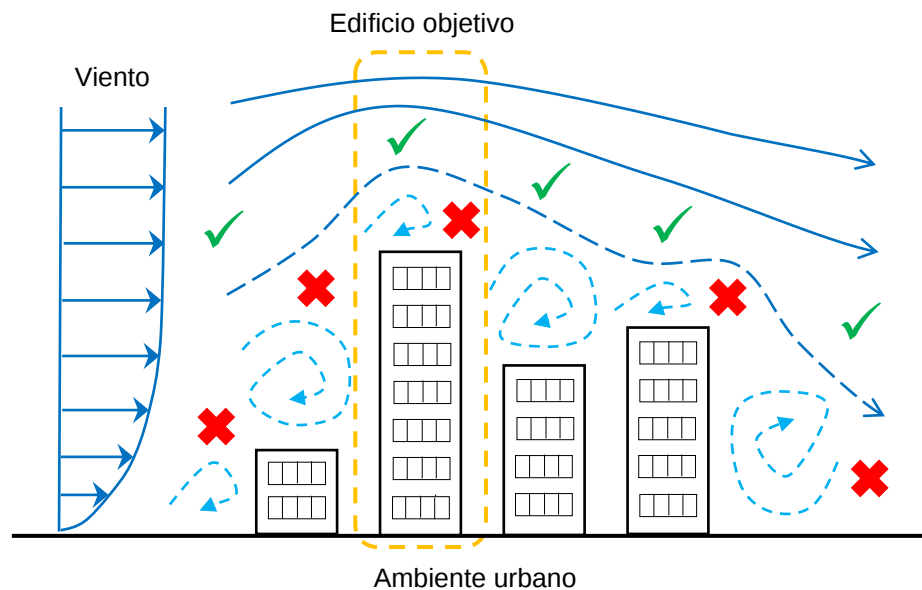
El funcionamiento adecuado de un aerogenerador no sólo implica la selección del lugar de instalación, sino también la evaluación adecuada del recurso eólico (AWS Scientific Inc., 1997). En esta etapa es necesario identificar no sólo el edificio objetivo donde se instalará el *BMWT*, sino también los alrededores (otros edificios y objetos cercanos) que pueden afectar el comportamiento del flujo de viento dentro del entorno urbano.

Para encontrar el mejor lugar sobre la azotea del edificio para instalar el *BMWT*, se recomienda simular todas las velocidades y direcciones del viento que tienen lugar en el área urbana estudiada, a diferencia de las simulaciones *CFD* convencionales donde el análisis solo se realiza usando la velocidad y dirección del viento predominante, encontradas ambas usando una rosa de viento (Arteaga-López y Angeles-Camacho, 2021). Dependiendo de las características de cada sitio, es posible evitar la realización de algunas simulaciones *CFD* que implican condiciones específicas de viento; este enfoque se utiliza en el presente trabajo. Las velocidades y direcciones del viento más representativas deberían simularse siempre que no sea posible simular todos los casos debido a elevados costos computacionales.

Después de realizar las simulaciones, se realizan análisis exhaustivos del flujo de viento sobre la azotea del edificio objetivo para establecer los lugares donde se encuentran las velocidades amplificadas del viento y los bajos niveles de turbulencia (ver zonas marcadas con $\sqrt{\quad}$ en la **Figura 40**). Estos lugares definen el conjunto de posibles posiciones sobre la azotea que son usados en la determinación del posicionamiento óptimo del aerogenerador.

Figura 40

Comportamiento del viento en un entorno urbano



4.2.5. Diseño o selección del aerogenerador

A partir del consumo de energía eléctrica del edificio objetivo se puede estimar la potencia de salida del *BMWT*. Esta potencia de salida sirve para diseñar o elegir la topología del rotor del aerogenerador. El diseño de la geometría del rotor del aerogenerador se puede realizar utilizando procedimientos basados en la teoría *BEM*, como aquellos explicados por Manwell et al. (2010). Por otro lado, la elección de los aerogeneradores comerciales se puede realizar utilizando los datos del fabricante donde se encuentra información relacionada con sus curvas de potencia.

En función de las normas y regulaciones técnicas de cada lugar, región o país, el *BMWT* diseñado podría restringirse adicionalmente. Estas restricciones podrían estar relacionadas principalmente con la producción de energía de los aerogeneradores, los niveles de ruido y vibración, y el efecto *flicker*. Tener en cuenta que la aplicación de estas restricciones adicionales puede considerarse como un trabajo futuro.

Además, se recomienda realizar análisis mecánicos de los *BMWTs*, ya que los aerogeneradores comerciales que están diseñados bajo la metodología *IEC* no pueden garantizar niveles aceptables de confiabilidad y seguridad al operar en ambientes urbanos, como se establece en Evans et al. (2017) y Rakib et al. (2019). Esto también puede considerarse como un trabajo futuro.

4.2.6. Optimización del posicionamiento

Se puede determinar cuál sería el posicionamiento óptimo del rotor del *BMWT*, instalado sobre la azotea de un edificio, para que el flujo de viento que incide sobre el aerogenerador mantenga bajos niveles de turbulencia y altas velocidades de viento, maximizando la captura de energía eólica (relacionada con la energía eléctrica total generada), pero minimizando la altura del rotor del *BMWT* para no incurrir en elevados costos de instalación. Tener en cuenta que es fundamental evaluar el impacto del cambio de diseño en el costo y el rendimiento del sistema eólico (Fingersh et al., 2006).

Como se explica en el apartado introductorio, la mayoría de los estudios de optimización buscan minimizar el costo de la instalación por unidad de potencia (objetivo) de los aerogeneradores instalados en parques eólicos cambiando su posicionamiento y altura del *hub* (variables). Tener en cuenta que los costos del parque eólico se pueden estimar mediante el esquema de desglose de costos desarrollado por *NREL* (Fingersh et al., 2006). En cuanto a los *BMWTs*, se podría esperar minimizar la misma *OF* usada para los aerogeneradores de parques eólicos, pero aún no se ha establecido un esquema de desglose de costos para la predicción de costos específicos de los *BMWTs* (Rezaeiha et al., 2020), ya que solo hay datos limitados de proyectos eólicos distribuidos (Stehly et al., 2019). Por lo tanto, es necesario proponer un modelo de costos simplificado para los *BMWTs*. Aquí se utilizará una estructura de costos similar a las que se encuentran en Chen et al. (2016) y Song et al. (2018), que contienen un costo base (C_b) y un costo por altura de la torre (C_z). Basado en el costo de instalación típico de un aerogenerador residencial de 10 kW (Orrell y Rhoads, 2013) con una torre arriostrada de 31 m de alto, el costo de la torre representa aproximadamente el 20% (\$ 14 145) del costo total del aerogenerador (\$ 68 195). Por otro lado, los aerogeneradores pequeños tienen un costo total de instalación de 6.000 \$/kW para un rango de tamaños entre 11 y 100 kW (Orrell y Foster, 2014). Entonces, el aerogenerador *MEXICO* con $P_N = 15$ kW a 15 m/s (Schepers y Snel, 2007), tendrá un $C_b = \$ 72\ 000$ y $C_z = 456,29$ \$/m. Estos costos se dividen por la energía total producida por el aerogenerador durante un período de 20 años para definir el objetivo del proceso de optimización de la siguiente manera,

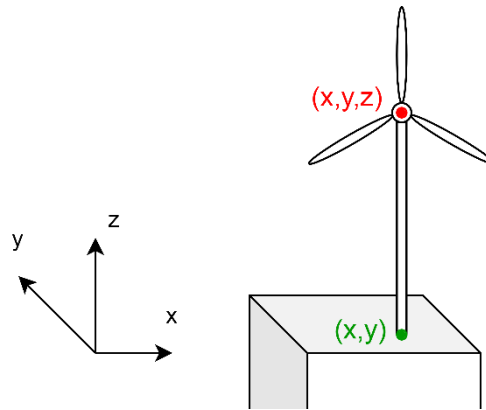
$$OF = CoE = \frac{456.29 z + 72\ 000}{Energía}. \quad (12)$$

Notar que en este *CoE* no se incluyen los costos de mantenimiento y operación de la instalación eólica, ni tampoco los costos relacionados con el reforzamiento de la estructura del edificio necesario para soportar al aerogenerador. Esta *OF* se minimiza modificando la altura del *hub* del aerogenerador (z) y su proyección sobre la azotea del edificio (x e y). Ver

detalles del arreglo en la **Figura 41**. Tener en cuenta también que el tamaño del rotor del aerogenerador se mantiene invariable durante el proceso de optimización.

Figura 41

Disposición para la optimización del posicionamiento



La optimización se realiza mediante un *GA* implementado en *MATLAB*. *GA* es un método de búsqueda eficiente, propuesto por J.H. Holland, basado en el proceso de evolución y la teoría de la selección natural (Hassanat et al., 2019). Se utiliza para resolver problemas de optimización que tienen como elementos clave a la representación cromosómica y los operadores inspirados en la biología (Michalewicz y Schoenauer, n.d.; Katoch et al., 2021). Estos operadores se conocen como selección, mutación y cruce, siendo difícil predefinir ratios para cada uno de ellos (Hassanat et al., 2019).

Por otro lado, los tamaños de población con pocos individuos pueden resultar en una convergencia prematura hacia soluciones óptimas locales, mientras que las poblaciones grandes (muchos individuos) pueden provocar un aumento importante en el esfuerzo computacional necesario para lograr encontrar la solución óptima global (Dey, 2023). El tamaño de población que se usa aquí es de 30 individuos, obtenido multiplicando 10 por el número de variables analizadas (x , y , z). La técnica de selección llamada torneo (*Tournament*) se selecciona por su eficiencia (Razali y Geraghty, 2011) y la preservación de la diversidad que mantiene cuando el tamaño del torneo es bajo (Katoch et al., 2021). El tamaño del torneo es 2. El operador de elitismo se selecciona para preservar al mejor individuo de cada población. Se utiliza el cruce heurístico (*heuristic crossover*) ya que devuelve un hijo (individuo de la nueva generación) que se encuentra en la línea que contiene a los dos padres (individuos de la generación actual), a una pequeña distancia del padre con el mejor valor de *fitness*. La fracción de cruce se elige como 0.8. La función de mutación

elegida es *mutation adapt feasible* porque escoge una dirección y una longitud de paso que satisface los límites y restricciones lineales. Estos parámetros son mostrados en la **Tabla 18**.

Tabla 18

Parámetros del GA

Parámetro	Valor
Tamaño de la población	30
Función de selección	Tournament
Tamaño del torneo	2
Elitismo	1
Función de cruce	Heuristic
Fracción de cruce	0.8
Función de mutación	Adapt feasible

Los criterios de convergencia utilizados para detener el proceso de optimización (Rodríguez y Celis, 2022) son,

$$\frac{\max(OF_i) - \max(OF_{i-1})}{\max(OF_i)} < 10^{-3}, \quad (13)$$

$$\frac{\text{std}(OF_i)}{\max(OF_i)} < 10^{-3}, \quad (14)$$

donde i indica la generación evaluada del *GA*.

Adicionalmente, se realiza un análisis de sensibilidad variando el valor de C_z . Este costo puede aumentar en un factor si se tiene en cuenta una estructura adicional necesaria para soportar al *BMWT* instalado en la azotea del edificio (factor de refuerzo del edificio, F). Por lo tanto, la formulación del *CoE* que se utilizará en el análisis de sensibilidad es la siguiente,

$$CoE = \frac{456.29 F z + 72\,000}{Energía}, \quad (15)$$

donde F tomará valores de 1, 5, 10, 15, 20 y 25. Notar que en este *CoE* tampoco se incluyen los costos por mantenimiento y operación de la instalación eólica.

4.3. Resultados

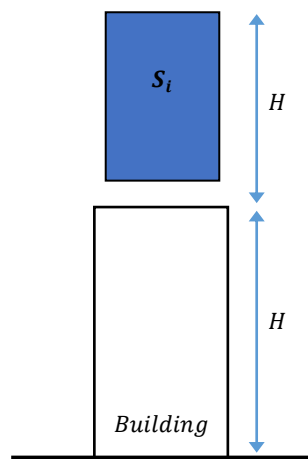
El sitio estudiado es un único edificio hipotético ubicado en el distrito de Jesús María (Lima, Perú). La consideración de utilizar un solo edificio para representar el entorno urbano es aceptable cuando los alrededores, es decir, los edificios que rodean al edificio objetivo, son de poca altura, que es la suposición realizada en este trabajo.

4.3.1. Evaluación del sitio

Se asumió que existe una sola restricción para la instalación del *BMWT* en el sitio estudiado. Esta restricción está relacionada con el impacto visual que los álabes del aerogenerador pueden causar en los residentes. Para evitar este problema, se debe restringir el espacio disponible (S_i) para la instalación del rotor del aerogenerador, como se ve en la **Figura 42**. El límite inferior del espacio depende de las zonas con bajas velocidades del viento y alto nivel de turbulencia, los cuales deben evitarse, mientras que el límite superior está restringido por una altura máxima igual a la altura del edificio (*Building*).

Figura 42

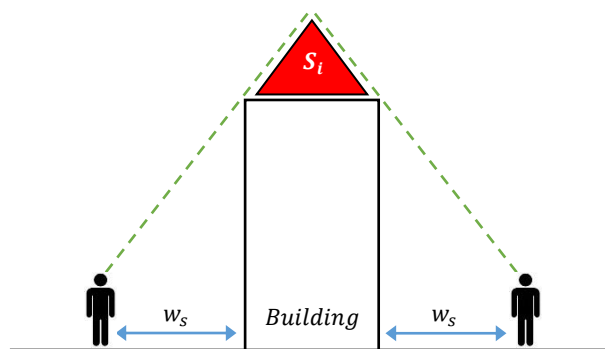
Espacio disponible para la instalación del aerogenerador MEXICO



De forma alternativa, el espacio disponible puede restringirse adicionalmente mediante los campos visuales de las personas posicionadas a una distancia de 14 m (w_s) desde la base del edificio, y la azotea del edificio (ver **Figura 43**). Esta distancia representa el ancho de las calles en el distrito de Jesús María, donde se ubica el edificio estudiado. Se considera que las personas tienen una altura promedio de 1.65 m y que estas proyectan su campo visual sobre la azotea del edificio. Esta distribución alternativa del espacio disponible puede considerarse en un trabajo futuro.

Figura 43

Espacio alternativo para la instalación de aerogeneradores



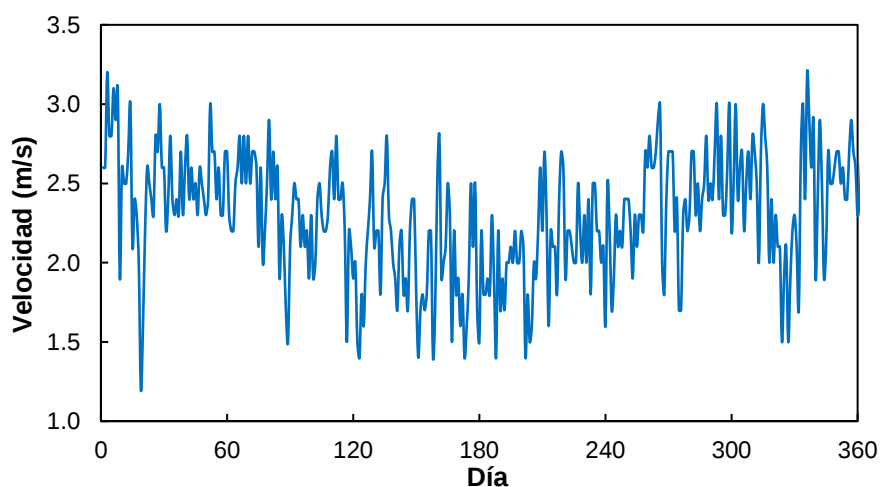
4.3.2. Datos de viento

Estos datos corresponden a mediciones de velocidades y direcciones del viento realizadas a 10 metros sobre el nivel del suelo, en la estación Campo de Marte. Esta estación se encuentra en el distrito de Jesús María (Lima - Perú). Las mediciones se realizaron cada hora desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre de 2020. El número total de mediciones de viento utilizadas en este estudio es 8 643 (8 643 velocidades y 8 643 direcciones). Notar que 117 mediciones fueron omitidas por fallas en su lectura.

Las velocidades promedio diarias del viento se muestran en la **Figura 44**. Tener en cuenta que la mayoría de las velocidades promedio diarias del viento se encontraron entre 1.5 y 3 m/s. La velocidad media anual del viento fue de 2.3 m/s.

Figura 44

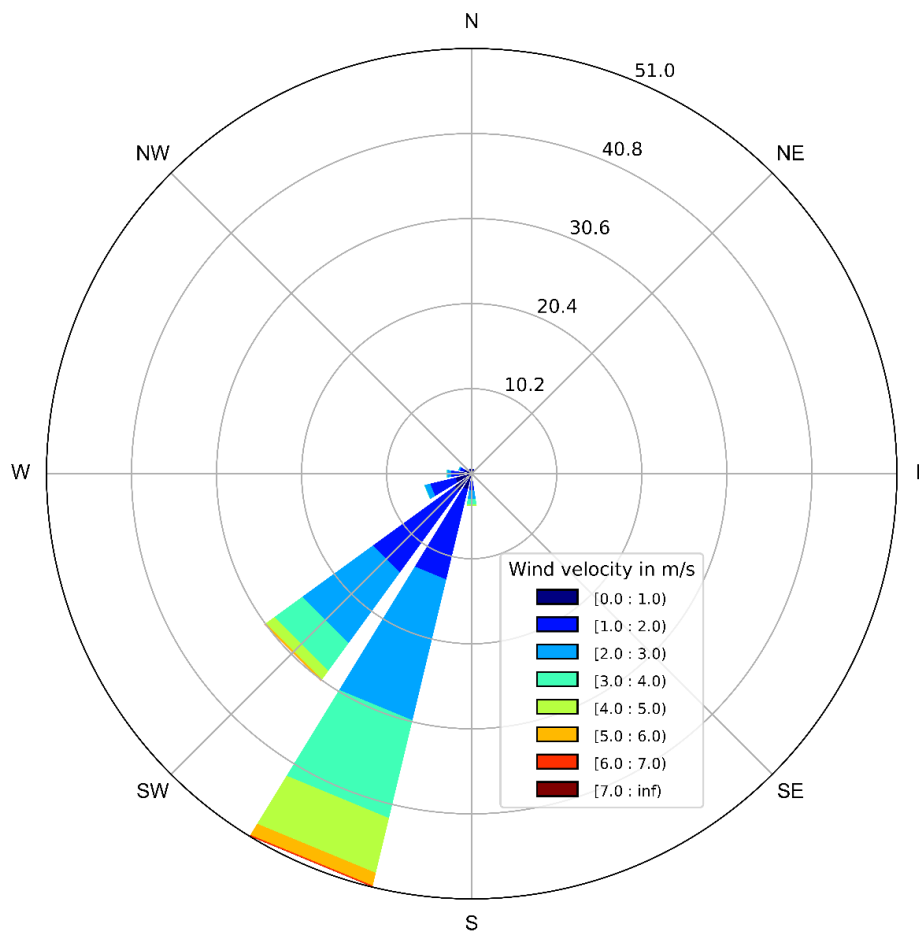
Velocidades promedio diarias del viento



Utilizando las velocidades y direcciones del viento antes mencionadas, se construye una rosa de viento mostrada en la **Figura 45**. Las barras de colores se refieren a los intervalos de velocidad del viento como se indica en la leyenda, y los círculos concéntricos representan la probabilidad de que se produzcan velocidades dentro de un intervalo determinado. Como se ve en la **Figura 45**, la mayoría de las velocidades se produjeron en las direcciones SSW y SW. La suma de las ocurrencias en estas direcciones es del 81.8%.

Figura 45

Rosa de viento construida con los datos de viento de la estación Campo de Marte



Tener en cuenta que la ocurrencia de velocidades del viento entre las direcciones S y W ha representado el 94.7% del total de ocurrencias como se muestra en la **Tabla 19**. Dado que la mayoría de aerogeneradores tienen una velocidad de arranque (cut-in) superior a 3 m/s, no es necesario simular condiciones de viento inferiores a ese valor, ya que el aerogenerador no estaría generando energía eléctrica. Velocidades del viento de 2.18 y 3.41 m/s (calculadas para una altura H) se determinan usando $U_{prom} = 1.56$ y 2.44 m/s, respectivamente. Se tomaron los valores de 0.3 y 30.48 para α y h_z , respectivamente. Por lo tanto, en esta tesis

solo se representaron velocidades $U_{prom} \geq 2.44$ m/s, es decir, aquellos valores encerrados en un recuadro verde, como se muestra en la **Tabla 19**. Además, en las simulaciones se consideran cinco direcciones del viento (encerradas en un recuadro celeste) para evaluar el potencial de energía eólica sobre la azotea del edificio (ver **Tabla 19**). Por lo tanto, se analizan 20 casos (encerrados en un recuadro rojo en la **Tabla 19**) en la etapa de evaluación del recurso eólico, pero solo se simulan 15 casos con respecto a las direcciones del viento S, SSW y SW. Tener en cuenta que las direcciones correspondientes a WSW y W no fueron simuladas porque son las mismas que SSW y S, debido a la simetría del edificio.

Tabla 19

Ocurrencia de velocidades de viento (%)

Intervalo (m/s)	U_{prom} (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
[0 - 1>	0.64	0.59	0.57	0.36	0.13	0.09	0.06	0.09	0.08
[1 - 2>	1.56	0.03	0.03	0.06	0	0	0	0.01	0.02
[2 - 3>	2.44	0	0	0	0	0	0	0	0
[3 - 4>	3.43	0	0	0	0	0	0	0	0
[4 - 5>	4.38	0	0	0	0	0	0	0	0
[5 - 6>	5.30	0	0	0	0	0	0	0	0
[6 - 7>	6.23	0	0	0	0	0	0	0	0
[7 - 7.4]	7.21	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		0.62	0.60	0.42	0.13	0.09	0.06	0.10	0.10
Intervalo (m/s)	U_{prom} (m/s)	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
[0 - 1>	0.64	0.59	1.93	2.55	2.00	1.49	0.89	0.74	0.59
[1 - 2>	1.56	1.39	11.13	12.13	3.12	0.97	0.57	0.10	0.07
[2 - 3>	2.44	1.10	17.37	10.46	0.69	0.46	0.19	0.02	0
[3 - 4>	3.43	0.67	12.08	4.11	0.06	0.13	0.03	0	0
[4 - 5>	4.38	0.16	6.76	1.27	0	0.01	0	0	0
[5 - 6>	5.30	0.01	1.56	0.23	0	0	0	0	0
[6 - 7>	6.23	0	0.17	0.03	0	0	0	0	0
[7 - 7.4]	7.21	0	0.02	0	0	0	0	0	0
Total		3.92	51.02	30.78	5.88	3.07	1.68	0.87	0.66

4.3.3. Validación de modelos

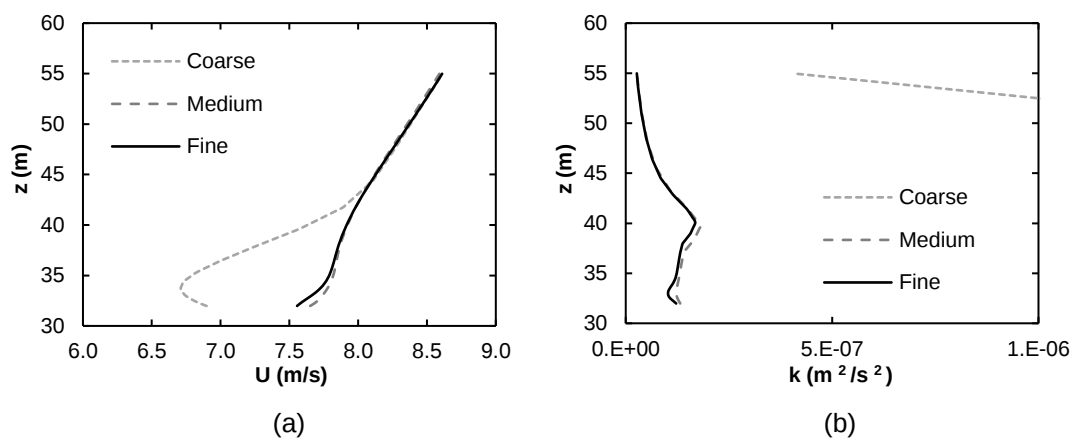
4.3.3.1. Edificio

Se establece una velocidad del viento de 7.2 m/s (U_{prom} máxima) a 10 m de altura (h_r) para determinar el perfil de velocidades para las superficies de entrada del dominio (*velocity-inlet*). Como se indicó anteriormente, estas simulaciones se realizaron usando el modelo de turbulencia *Realizable k - ε* con tratamiento de pared mejorado. Tener en cuenta que se ha elegido un $\alpha = 0.30$, que es un valor conservador para zonas urbanas. Los resultados de U y

k obtenidos con las 3 mallas evaluadas, en una línea imaginaria sobre el centro de la azotea del edificio, se muestran en la **Figura 46**. Como se aprecia en la **Figura 46a**, los errores (desviaciones) de U entre las mallas *Medium* y *Fine* son relativamente bajos, logrando un valor máximo de 1.35%. Además, los resultados obtenidos para k con estas mallas son muy similares (ver **Figura 46b**). Debido a las pequeñas diferencias para U y k encontradas entre las mallas *Medium* y *Fine*, se elige la malla *Medium* para realizar las siguientes simulaciones.

Figura 46

Perfiles verticales de U y k . Estudio de independencia de malla



Nota. (a) U y (b) k .

Los detalles de la malla *Medium* se muestran en la **Figura 47**. La altura de la primera celda cercana a las superficies del edificio (*Building*) y del suelo (*Ground*) es de 1×10^{-6} m y 2×10^{-6} m, respectivamente. Esta configuración mantiene $y^+ < 5$ en todas las paredes. Como se ve en la **Figura 47a**, los elementos más grandes (celdas de mayor tamaño) se ubican lejos de las superficies del edificio. Mientras que los elementos más finos (celdas pequeñas) se ubican alrededor de las superficies del edificio, donde aparecen grandes gradientes del flujo. De manera similar, los elementos más finos se colocan cerca de los bordes del edificio (ver **Figura 47b** y **Figura 47c**). Tener en cuenta que la malla sobre el edificio contiene 104 elementos en su borde y 106 elementos de altura.

4.3.3.2. Aerogenerador

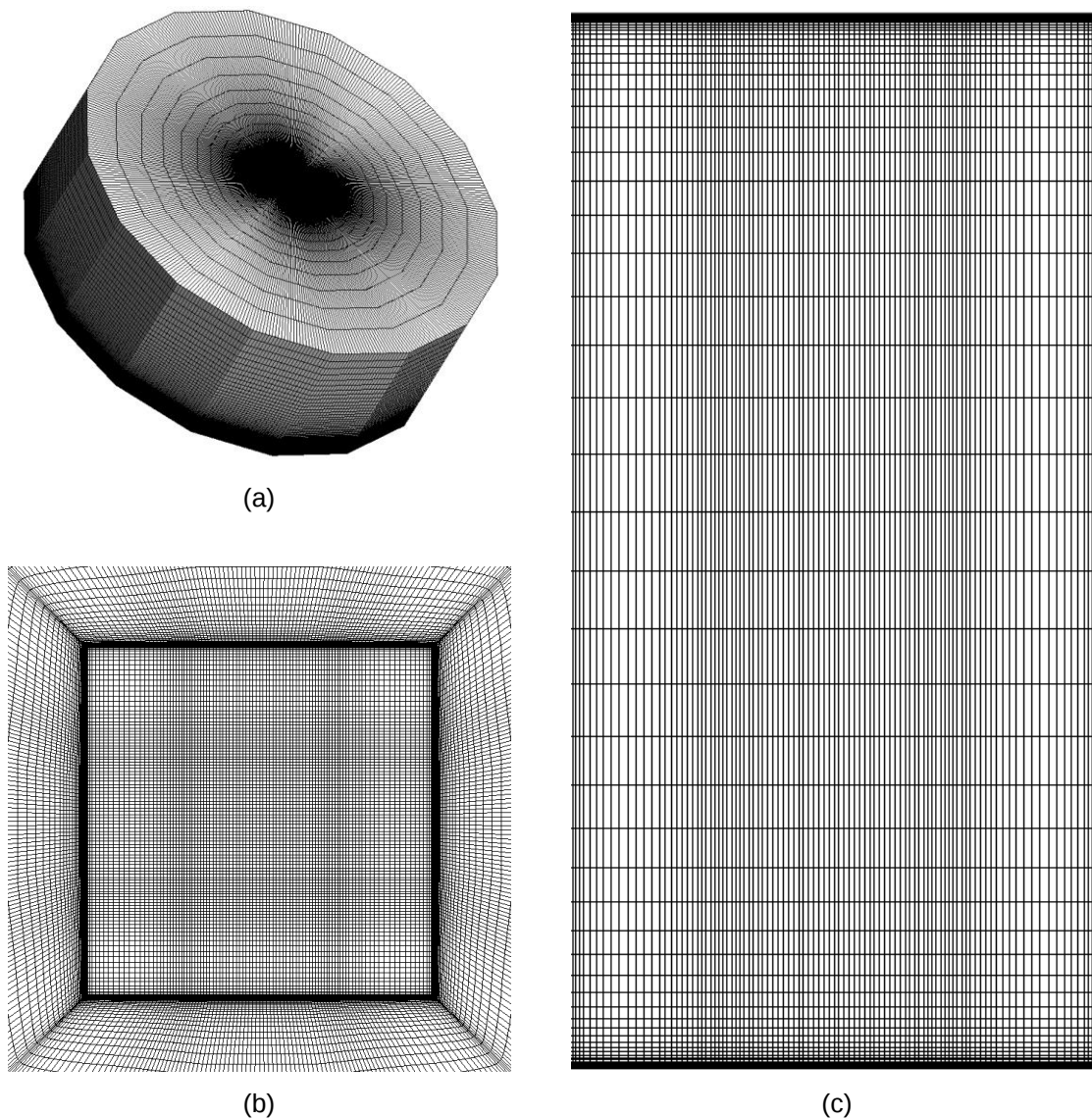
En la validación del modelo de aerogenerador se realizó un estudio de independencia de malla utilizando el modelo de turbulencia $SST\ k - \omega$, donde se realizaron comparaciones entre el empuje y el torque obtenidos con 4 mallas (ver la **Tabla 12**). El modelo fue validado para $U = 10$ m/s, que es una velocidad superior a las utilizadas en este caso de estudio, por lo que se esperan resultados numéricos aceptables al utilizar aquellas velocidades

determinadas en la etapa de datos del viento. En base a los resultados, se puede determinar que la independencia de malla se logra con la malla *Medium*, ya que las discrepancias entre las mallas *Medium* y *Fine* son menores al 0.8% y 2.2% para el empuje y el torque, respectivamente. Por lo tanto, se utilizará la malla *Medium* para simular los siguientes casos.

Los detalles de la malla *Medium* se muestran en la **Figura 34**. Tener en cuenta que una gran cantidad de elementos se encuentra cerca del borde de ataque y fuga de los perfiles que conforman el álabo. Esto se debe a que en dichas zonas se espera que se produzcan mayores gradientes de los parámetros del flujo. La altura de la primera celda sobre las superficies de los álabos fue de 10^{-6} m.

Figura 47

Detalles de la malla Medium (Edificio)



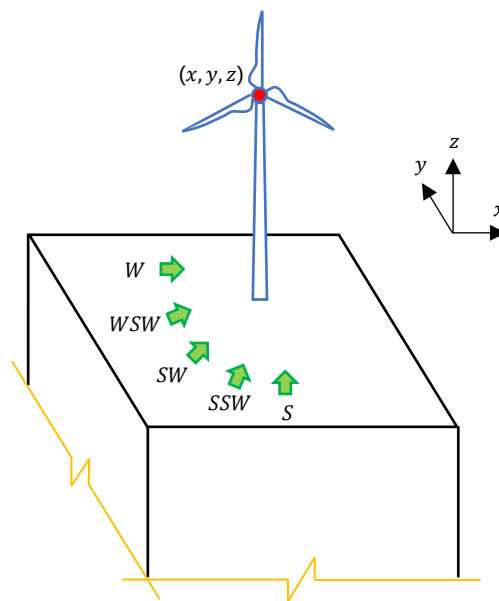
Nota. (a) Dominio externo, (b) vista de planta y (c) vista en elevación del edificio.

4.3.4. Evaluación del recurso eólico

Utilizando el modelo del edificio, se simularon 15 casos para estimar el recurso eólico sobre la azotea del edificio (ver **Figura 48**). Estos resultados ayudan en la comprensión del comportamiento del viento sobre la azotea del edificio, para encontrar zonas donde el flujo presenta velocidades inferiores a 3 m/s. Estas zonas no se tendrán en cuenta dentro del espacio de búsqueda del proceso de optimización porque los aerogeneradores generalmente comienzan a generar electricidad con velocidades mayores a la mencionada.

Figura 48

Representación de las direcciones de viento simuladas en la evaluación del recurso eólico



Seguido, las velocidades del viento obtenidas en la evaluación del recurso eólico son analizadas en diferentes planos, como se aprecia en la **Figura 49**. La **Figura 50** muestra las zonas donde el flujo de aire presenta velocidades inferiores a 3 m/s (color verde) para 2 planos YZ en la parte media y posterior sobre el edificio, y para 3 direcciones de viento libre, S, SSW y SW. Como se aprecia en la **Figura 50a**, la zona verde es más grande en el plano medio que en la parte posterior. Tener en cuenta que la zona verde es irregular para las direcciones del viento SSW y SW debido a las vistas representadas en la **Figura 50b** y **Figura 50c**, que no están alineadas con el flujo de viento libre.

Figura 49

Planos usados para analizar las velocidades de viento

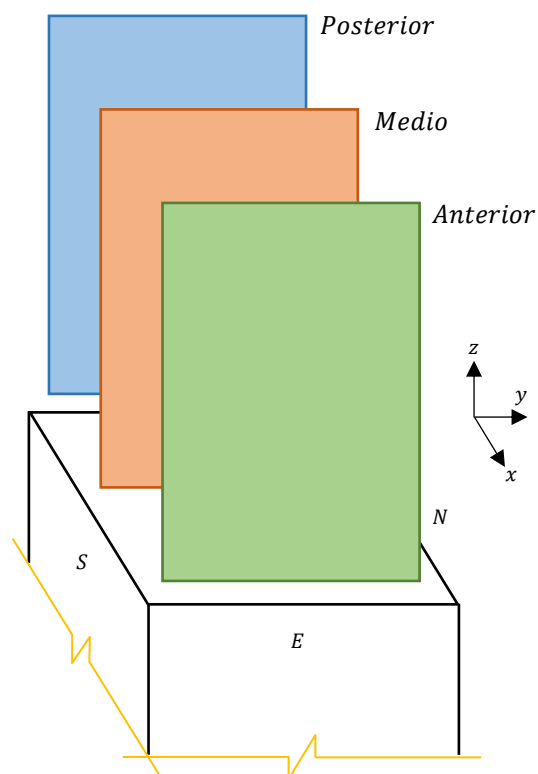
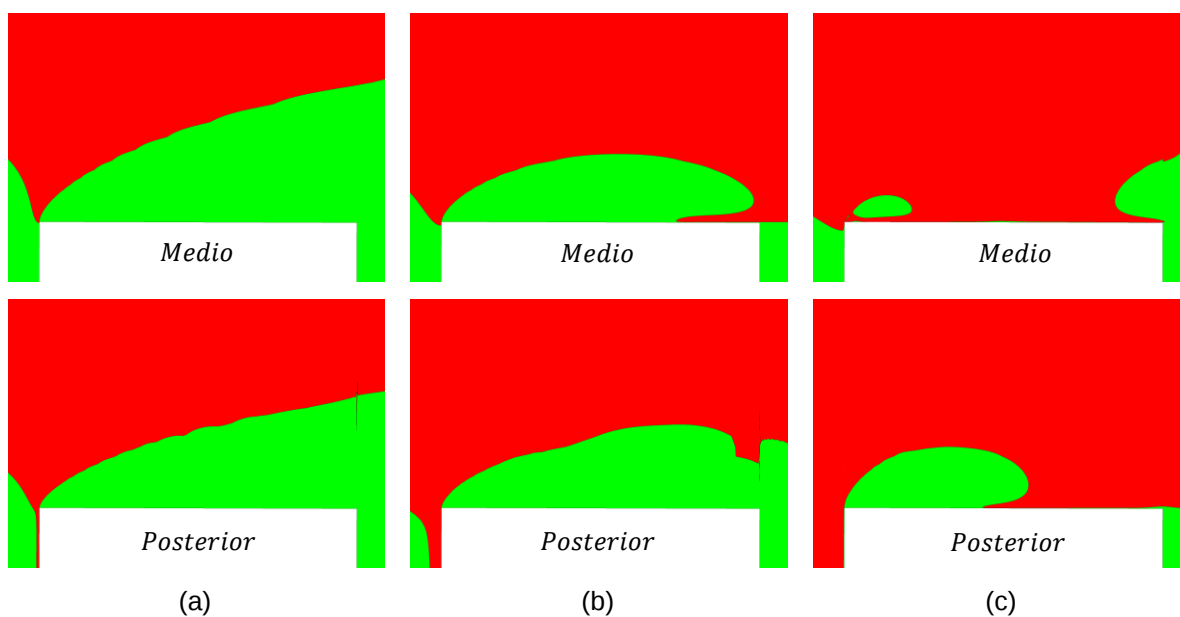


Figura 50

Velocidades del viento superiores a 3 m/s (rojo) y menores (verde) encima de la azotea del edificio



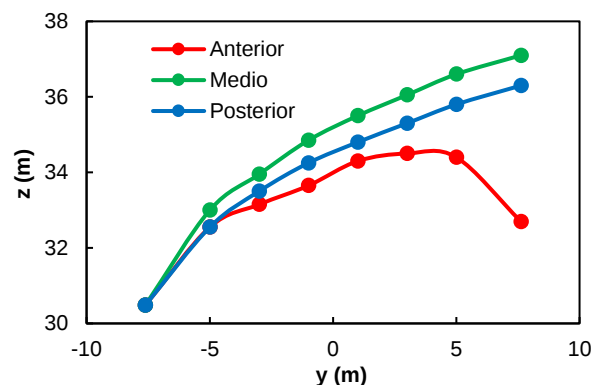
Nota. Direcciones del viento para $U = 2.44$ m/s: (a) S, (b) SSW y (c) SW.

El campo de velocidades del viento obtenido en la evaluación del recurso eólico se utilizará en el proceso de optimización para determinar la cantidad de energía eólica aprovechada por el rotor del aerogenerador ubicado en un punto específico sobre la azotea del edificio.

Por otro lado, la **Figura 51** muestra las curvas (para diferentes planos de la **Figura 49**) que se utilizarán como límites inferiores en el espacio de búsqueda dentro del proceso de optimización; las zonas por debajo de estas curvas están asociadas con valores de U y TI por debajo de 3 m/s y superiores a 20%, respectivamente. Tener en cuenta que los altos niveles de TI causan tensión mecánica adicional en los álabes de los aerogeneradores, lo que puede reducir su vida operativa (De Prada Gil et al., 2012). Por tanto, se elige un límite inferior de 37.1 m de altura total (7.1 m por encima de la azotea del edificio). Tener en cuenta también que el límite superior del espacio de búsqueda está determinado por la altura del edificio sobre la azotea de este.

Figura 51

Restricciones geométricas sobre la azotea del edificio

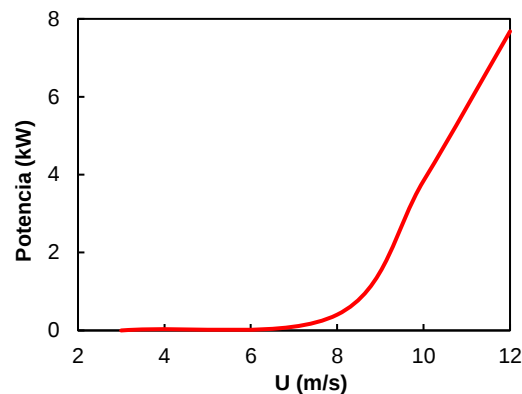


4.3.5. Diseño o selección del aerogenerador

Para realizar esta etapa se seleccionó el rotor del aerogenerador *MEXICO*, para lo cual se realizan simulaciones numéricas de este aerogenerador utilizando diferentes velocidades de viento para calcular su curva de potencia. La curva de potencia se muestra en la **Figura 52**. Como se observa en esta figura, solo se contabilizaron velocidades menores a 12 m/s, ya que estas velocidades del viento se encuentran en la etapa de evaluación del recurso eólico. Tener en cuenta que la curva de potencia del aerogenerador calculada aquí está de acuerdo con aquella construida a partir de mediciones experimentales y presentada por X. Wang et al. (2009). El aerogenerador *MEXICO* alcanza aproximadamente sus condiciones de diseño ($P_N = 15$ kW y $TSR = 6.67$) para $U = 15$ m/s (Snel et al., 2009).

Figura 52

Curva de potencia del aerogenerador MEXICO



4.3.6. Optimización del posicionamiento

En cuanto al proceso de optimización utilizado aquí (**Figura 53**), el *GA* inicialmente crea una generación conformada por 30 individuos. Cada individuo representa un punto del plano cartesiano (x, y, z). Estos puntos se tratan como la posición del eje del *BMW T*, alrededor del cual se construye un área circular con el mismo diámetro del rotor del aerogenerador *MEXICO* para extraer las velocidades del viento sobre dicha área (datos que corresponden a la etapa de evaluación del recurso eólico). Tener en cuenta que el área circular es perpendicular a cada dirección de velocidad del viento libre simulada (*W, WSW, SW, SSW, S*). A continuación, se calcula una velocidad promedio a partir del área circular. Esta velocidad servirá para encontrar la potencia del aerogenerador a partir de la curva de potencia (datos de la etapa de diseño o selección del aerogenerador). Después, utilizando el porcentaje de velocidades y direcciones del viento (rosa de viento), se calcula la producción de energía anual del aerogenerador. Luego, se evalúa la *OF* de cada individuo, que es utilizada en el proceso de optimización. Finalmente, se evalúan los criterios de convergencia del *GA* para corroborar si se cumplen o no. En caso no se cumplan los criterios de convergencia, el *GA* vuelve a crear una nueva generación de 30 individuos. Tener en cuenta que el enfoque utilizado aquí requiere menor costo computacional que realizar simulaciones *CFD* de ambos modelos numéricos (edificio y aerogenerador) al mismo tiempo en cada iteración del algoritmo.

Los resultados del proceso de optimización se observan en la **Figura 54**. La figura muestra que el algoritmo encuentra rápidamente el óptimo global incluso acercándose a él en las primeras generaciones. El algoritmo converge en la generación 27 logrando un $CoE = 3.05146$ \$/kWh (mejor individuo) en las coordenadas 5.322 m, 5.282 m, 60.896 m (x, y, z). El aerogenerador produce 1 407.17 kWh/año a un costo total de \$ 85 878.7.

Figura 53

Diagrama de flujo del proceso de optimización

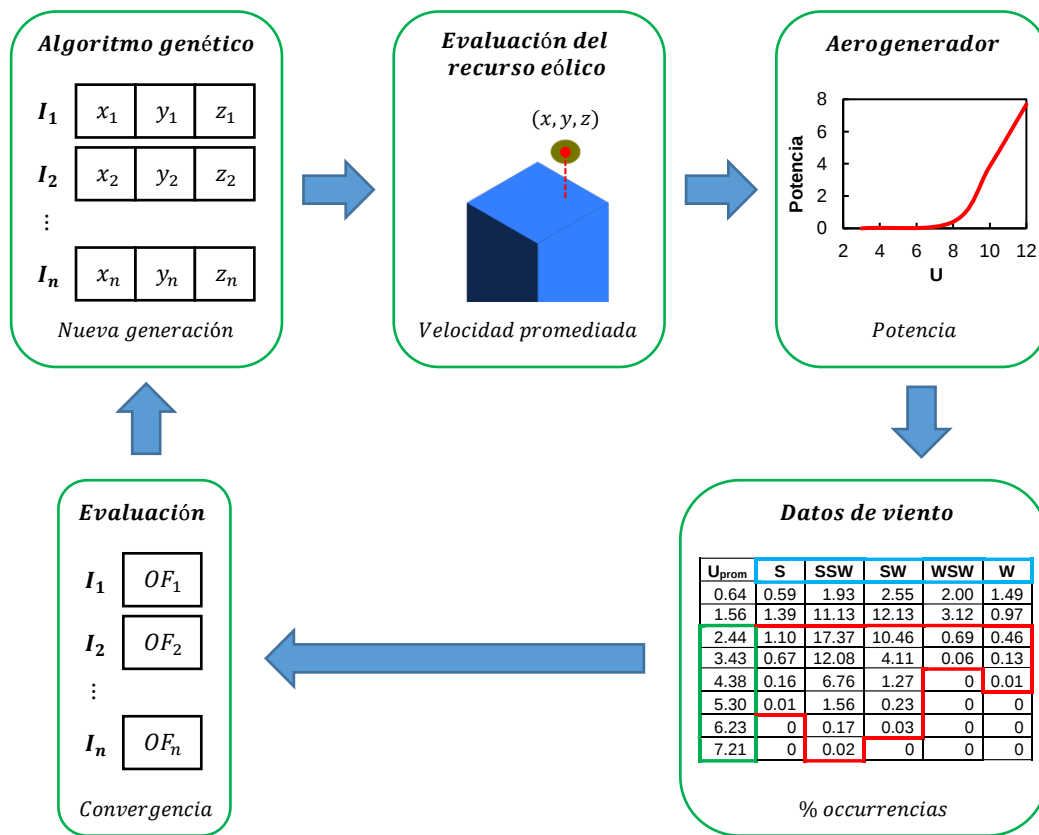
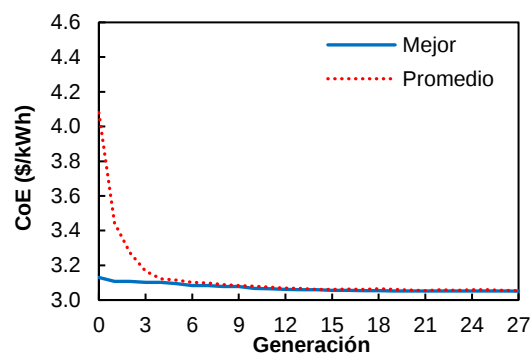


Figura 54

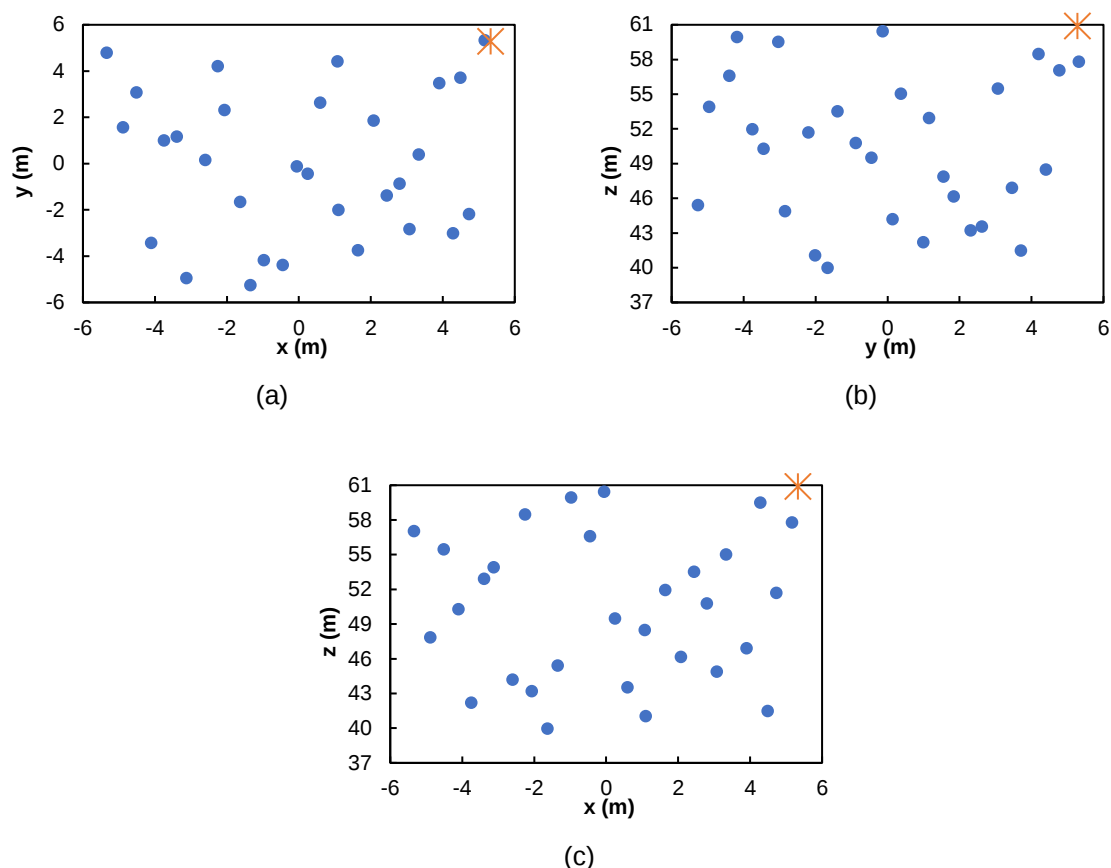
Valores de la función objetivo durante el proceso de optimización



Tener en cuenta que el mejor individuo está ubicado en el límite superior del espacio de búsqueda en la dirección z (**Figura 55**), donde la velocidad del viento es máxima, por ello, la cantidad de energía generada por el aerogenerador también es máxima. La ubicación de los individuos de la población inicial se representa por puntos celestes, mientras que el mejor individuo figura con el símbolo de asterisco. De los resultados se concluye que la cantidad de energía producida por el aerogenerador es el parámetro clave para reducir el CoE del sistema.

Figura 55

Población inicial y mejor individuo del proceso de optimización



Nota. Planos (a) XY, (b) YZ y (c) XZ.

El costo de la energía obtenido aquí (3.05 \$/kWh) es relativamente alto, para las condiciones técnicas y económicas de este caso particular, en comparación con la tarifa eléctrica residencial del Perú (0.17 \$/kWh) y otros sistemas eólicos. Esta disparidad se explica por la baja velocidad media del viento en el distrito de Jesús María (2.3 m/s), en contraste con velocidades superiores encontradas en investigaciones anteriores (más de 4 m/s). Por ejemplo, Deltenre y Runacres (2019) reportaron costos nivelados de la energía entre 0.30 y 0.16 \$/kWh para velocidades medias del viento de 4 a 6 m/s, respectivamente. En su estudio, evaluaron la viabilidad de instalar un aerogenerador de 10 kW en la azotea de un edificio de 150 m de altura, donde las velocidades del viento disponibles eran mucho más favorables que el caso particular de estudio en la presente tesis. Además, el estudio mencionado aprovechó diversos incentivos económicos destinados a las energías renovables (como *green certificates*, *tax depreciation* y *superdeductibility*), lo cual contribuyó significativamente a reducir el costo de generación eléctrica del aerogenerador. Orrell y Foster (2015) encontraron costos nivelados de la energía entre 0.09 y 0.38 \$/kWh (incluye incentivos económicos) para aerogeneradores de 10 kW. Asimismo, Stehly et al., (2019) obtuvieron un

costo nivelado de la energía de 0.16 \$/kWh (después de la aplicación de incentivos) para un aerogenerador de 20 kW, operando con una velocidad del viento incidente de 5.5 m/s. Estos estudios destacan que a medida que aumenta el potencial eólico del sitio (es decir, la velocidad del viento), los costos de la energía tienden a reducirse notablemente. Es importante señalar que los costos obtenidos en los trabajos mencionados están condicionados a la aplicación de incentivos económicos, los cuales no fueron considerados en la presente tesis debido a la ausencia de normativas nacionales que los contemplen.

A continuación, se lleva a cabo el análisis de sensibilidad del CoE variando F en el plano de referencia que se muestra en la **Figura 56**. Los resultados de este análisis se aprecian en la **Figura 57**. Como se muestra en la **Figura 57a**, el CoE más bajo equivale a 3.05146 \$/kWh (mejor individuo para $F = 1$), el cual se encuentra en la zona cercana al límite superior del espacio de búsqueda en la dirección z (color azul), como se discutió anteriormente. Se observa un comportamiento similar del CoE para $F = 5$ (ver **Figura 57b**), donde el mejor valor obtenido (menor magnitud) fue 5.02261 \$/kWh. Por otro lado, a medida que F aumenta, la posición del mejor CoE disminuye en altura (dirección z), como se aprecia en la **Figura 57c** (7.36298 \$/kWh), **Figura 57d** (9.45926 \$/kWh), **Figura 57e** (11.46483 \$/kWh) y **Figura 57f** (13.40085 \$/kWh). Tener en cuenta que, a medida que F aumenta, el CoE aumenta, como se esperaba. Tener en cuenta también que el CoE más bajo siempre se encuentra en la zona aguas abajo de la azotea del edificio. Estos resultados evidencian que valores altos de F influyen en el CoE , volviéndose F más importante que la energía total generada por el $BMWT$. Se recomienda realizar análisis adicionales sobre los costos relacionados con los refuerzos que se adicionarán a los edificios para soportar la instalación de los $BMWTs$, estos análisis pueden considerarse como trabajos futuros.

Figura 56

Plano usado en el análisis de sensibilidad del costo de la energía

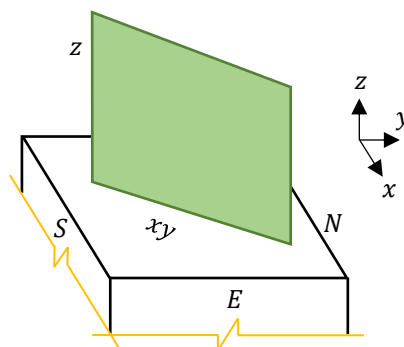
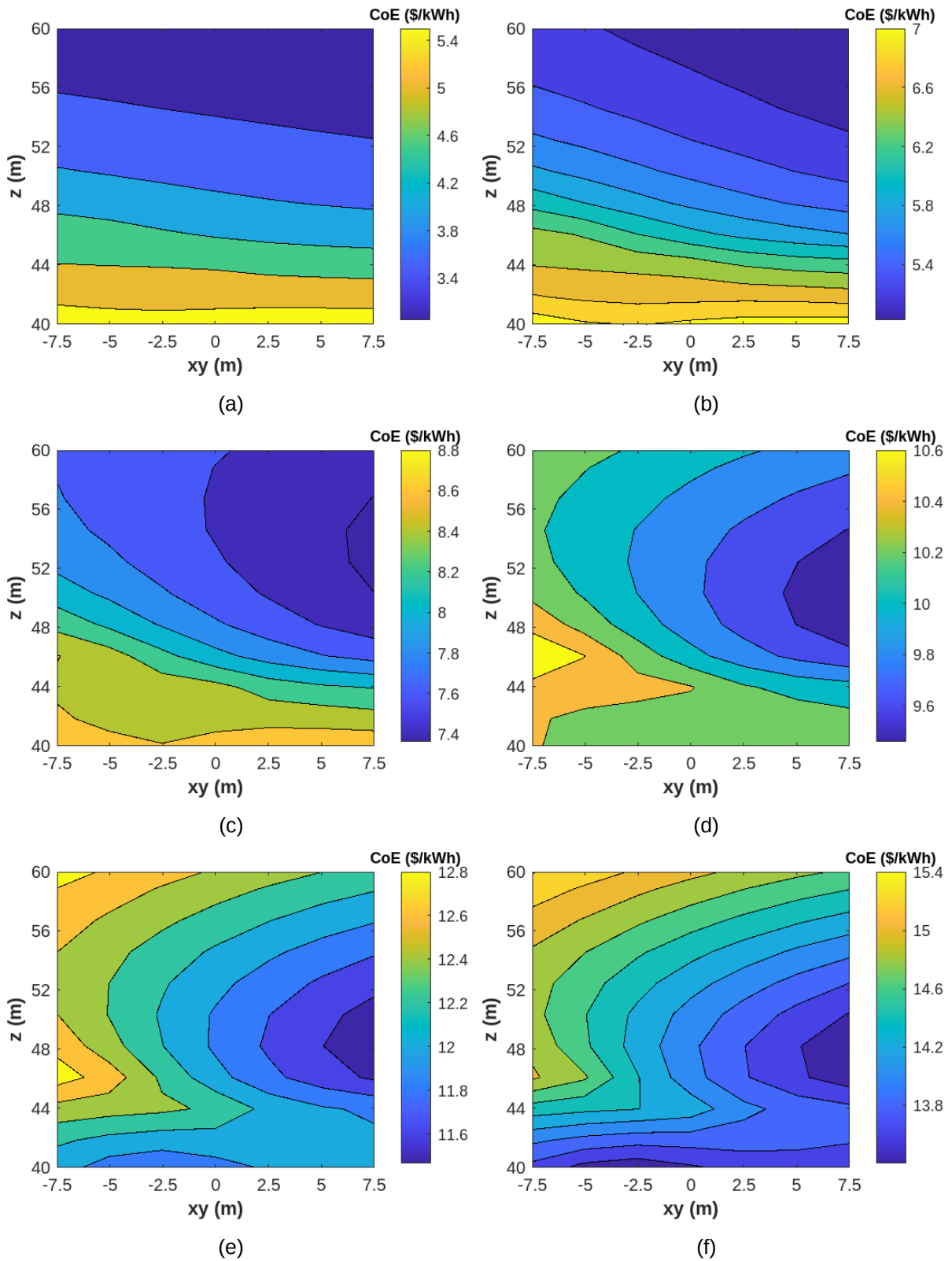


Figura 57

Análisis de sensibilidad del costo de la energía al variar los factores de refuerzo del edificio



Nota. Factores de refuerzo: (a) $F = 1$, (b) $F = 5$, (c) $F = 10$, (d) $F = 15$, (e) $F = 20$ y (f) $F = 25$.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

En la presente tesis, se desarrolla una metodología de posicionamiento óptimo de aerogeneradores urbanos que impacta sobre su economía de generación eléctrica lográndose una reducción en el CoE de 5.70054 \$/kWh (caso desfavorable) a 3.05146 \$/kWh (**OG**). Esto confirma la **HG**, la cual afirma que la metodología propuesta en esta tesis impacta económicamente en la generación eléctrica del aerogenerador urbano, ya que se logra un cambio en el CoE . Asimismo, se da respuesta a la **PG**, ya que se demuestra que la metodología propuesta impacta económicamente en la generación eléctrica (mejora en el CoE , impacto positivo).

A continuación, se detallan las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos en cada capítulo (paper asociado) de la presente tesis.

5.1.1. Conclusiones del Paper 1

Entre los hallazgos se puede destacar que todos los estudios primarios realizaron simplificaciones geométricas de los entornos urbanos, lo cual afectó a la predicción del comportamiento del flujo del viento. Además, los $UWTs$ que utilizan sistemas de amplificación se colocaron en las azoteas de los edificios para aprovechar el fenómeno de aumento de U y consecuente aumento del C_p del aerogenerador, ya que el flujo de viento se desvía y acelera a medida que se acerca a los edificios.

La mayoría de los autores utilizaron $VAWTs$ como *Darrieus* y *Savonius* en sus análisis. Notar que la capacidad de arranque, la menor vibración, los menores niveles de ruido y la independencia en relación con la dirección del viento hacen que los $VAWTs$ sean particularmente atractivos para su instalación en entornos urbanos. Nótese también que los valores máximos de A_f , C_p y C_t encontrados en los estudios primarios fueron 1.8, 0.4627 y 0.4195, respectivamente.

Por otro lado, el modelo de turbulencia *Standard $k - \varepsilon$* fue el más utilizado en las simulaciones *CFD* (42% de los estudios). El y^+ se consideró de acuerdo con los requisitos de cada modelo de turbulencia. Las condiciones de contorno se establecieron generalmente como *velocity-inlet*, *pressure-outlet*, *symmetry* y *wall*. El estado estacionario fue el más usado en lugar del transitorio. La forma del dominio rectangular fue la más utilizada (88% de los estudios),

mientras que las mallas no estructuradas fueron las preferidas para modelar los *UWTs*. El enfoque *RANS* fue usado en todas las simulaciones.

Además, la simulación de los *BMWTs* ha evolucionado desde los análisis *2D* hacia los *3D*, incorporando más detalles a los *UWTs* y al modelado de entornos urbanos. La evaluación de la potencia de salida de los *BMWTs* ha pasado del uso de la curva de potencia de los *UWTs* comerciales hacia la predicción de la potencia mediante simulaciones *CFD* en *3D*. Por otro lado, la evaluación de la potencia de salida de los *BIWTs* se viene realizando principalmente mediante la predicción de la potencia a través de simulaciones *CFD* en *2D* o *3D*. Dentro de las investigaciones que involucraron *BMWTs* y *BIWTs*, se desarrollaron nuevos *UWTs* y dispositivos de amplificación de la velocidad del viento.

5.1.2. Conclusiones del Paper 2

Se concluye que en el pasado se realizaron algunos estudios relacionados con simulaciones del edificio de gran altura o del aerogenerador de eje horizontal, pero ninguno de estos estudios incluyó la validación de ambos modelos numéricos en un mismo trabajo.

Los resultados numéricos obtenidos con ambos modelos de turbulencia coincidieron con las mediciones experimentales. Particularmente, el modelo *Realizable k – ε* superó al *SST k – ω* en la predicción del patrón de flujo sobre la azotea del edificio de gran altura. Se obtuvieron *HR* superiores a 0.813 y 0.375 para *U* y *k*, respectivamente, y se encontró el mejor *NMSE* (0.022) utilizando el modelo *Realizable k – ε* . Por otro lado, el modelo *SST k – ω* mostró mejores resultados que el modelo *Realizable k – ε* al simular el aerogenerador. El mejor valor de *HR* (0.485) se calculó mediante el modelo *Realizable k – ε* , pero se obtuvo un mejor valor de *MSE* (0.37) mediante el modelo *SST k – ω* . Estos hallazgos confirman la **HE1**, la cual afirma que los errores entre los resultados numéricos y datos experimentales para el edificio y aerogenerador son relativamente pequeños. Asimismo, se da una respuesta numérica a la **PE1** mediante las métricas comparativas métricas: *HR*, *NMSE* y *MSE*.

Es importante destacar que los resultados obtenidos demuestran que las simulaciones individuales del edificio de gran altura y el aerogenerador de eje horizontal deberían realizarse a través de los modelos *Realizable k – ε* y *SST k – ω* , respectivamente. Las simulaciones tanto del edificio como del aerogenerador (aplicaciones en ambientes urbanos) se pueden realizar simultáneamente utilizando el modelo *SST k – ω* , ya que este predice de mejor forma la presión sobre los álabes del aerogenerador y es capaz de capturar el comportamiento del flujo del viento sobre la azotea del edificio, donde es habitual la instalación de los *HAWTs*.

5.1.3. Conclusiones del Paper 3

La metodología propuesta en esta tesis muestra algunas ventajas en comparación con aquellas metodologías encontradas en trabajos anteriores. Por ejemplo, la mayoría de estudios pasados no consideraron una evaluación inicial del sitio, como se llevó a cabo aquí. En los trabajos anteriores generalmente se simula solo una dirección y una velocidad del viento en la etapa de evaluación del recurso eólico, lo cual no es apropiado cuando el viento del sitio de interés tiene un comportamiento multidireccional. Por el contrario, la metodología propuesta aquí tuvo en cuenta varias velocidades y direcciones del viento en diferentes etapas. Además, en los trabajos pasados no se realizó la optimización del posicionamiento del *BMWT*, el cual si es realizado aquí. Por otro lado, dado que las simulaciones *CFD* del entorno urbano y del aerogenerador se realizan por separado, la metodología propuesta permite el uso de las predicciones de viento, obtenidas en la evaluación del recurso eólico, para la optimización del posicionamiento de varios *BMWTs*.

La mayoría de las velocidades promedio diarias del viento estuvieron entre 1.5 y 3 m/s (velocidad promedio de 2.3 m/s). Además, la mayoría de estas velocidades ocurrieron en las direcciones *SSW* y *SW* (81.8% de las ocurrencias). Las velocidades del viento entre las direcciones *S* y *W* (*S*, *SSW*, *SW*, *WSW* y *W*) representaron el 94.7% del total de ocurrencias. Dado que la mayoría de los aerogeneradores tienen un *cut-in* superior a 3 m/s, no es necesario simular velocidades del viento inferiores a dicho valor. Por lo tanto, se analizaron 20 casos en la etapa de evaluación del recurso eólico, pero solo se simularon 15 casos con respecto a las direcciones del viento *S*, *SSW* y *SW* debido a la simetría de la topología del edificio.

En el estudio de independencia de malla del modelo del edificio, los errores (discrepancias) entre las mallas *Medium* y *Fine* fueron relativamente bajos para U (máximo 1.35%) y k ; por lo tanto, se eligió la malla *Medium* (8'101 184 elementos) para realizar las siguientes simulaciones. Notar que la validación del modelo del aerogenerador *MEXICO* fue realizado en el **Paper 2**. Con base en los resultados, se eligió la malla *Medium* (8'094 168 elementos) para usar en los siguientes casos. Tener en cuenta que los errores (discrepancias) entre las mallas *Medium* y *Fine* fueron inferiores al 0.8% y 2.2% para la fuerza de empuje y el torque, respectivamente. Para construir la curva de potencia del aerogenerador *MEXICO* solo se tuvo en cuenta $U < 12$ m/s, ya que estas velocidades del viento fueron halladas en la etapa de evaluación del recurso eólico.

Dado que era necesario evitar las zonas que contenían $U < 3$ m/s y $TI > 20\%$, se eligió un límite inferior de 37.1 m de altura total (7.1 m sobre la azotea del edificio) como límite inferior

del espacio de búsqueda usado en el proceso de optimización basado en *GA*. La población usada en el *GA* estuvo conformada por 30 individuos. Cada individuo representó un punto de coordenadas en el plano cartesiano (x, y, z), siendo las posiciones del *hub* del aerogenerador de *MEXICO*. El *GA* converge en la generación 27 logrando un $CoE = 3.05146$ \$/kWh (mejor individuo) en la posición 5.322 m, 5.282 m, 60.896 m (x, y, z). Este hallazgo confirma la **HE2** y responde a la **PE2**, ya que al posicionar de manera óptima el aerogenerador se logró reducir su CoE (3.05146 \$/kWh) en comparación con otros posicionamientos no óptimos donde el CoE alcanza valores de 5.70054 \$/kWh. Asimismo, se confirma la **HG** y se da respuesta a la **PG**, ya que, en el caso estudiado, la posición del aerogenerador (5.322 m, 5.282 m, 60.896 m en x, y, z , respectivamente) impacta en su economía de generación eléctrica reduciendo su CoE . El aerogenerador produce 1 407.17 kWh/año con un costo total de \$ 85 879. Los resultados mostraron que la cantidad de energía producida anualmente por el *BMWT* es el parámetro clave para reducir el CoE . Tener en cuenta también que el CoE obtenido es relativamente alto en comparación con trabajos anteriores debido a la baja velocidad promedio del viento encontrada en el distrito de Jesús María (2.3 m/s).

En el análisis de sensibilidad del CoE variando F se encontró que, a medida que F aumenta, el CoE aumenta, y la posición del CoE más favorable se encuentra a una altura más baja en la dirección z . Para $F = 1, 5, 10, 15, 20$ y 25 , se obtuvieron valores del $CoE = 3.05146, 5.02261, 7.36298, 9.45926, 11.46483$ y 13.40085 \$/kWh, respectivamente. El CoE depende notablemente de la velocidad del viento (U), y de los incentivos de promoción de la introducción de esta nueva tecnología.

5.2. Recomendaciones

En investigaciones futuras se deben hacer mediciones más detalladas del campo de viento de áreas específicas ubicadas dentro de ambientes urbanos reales, lo cual es importante para la validación de modelos numéricos relacionados con el aprovechamiento del recurso eólico dentro de las ciudades. También es necesario contar con mediciones del rendimiento de los *UWTs* instalados en ambientes urbanos.

Es importante conocer el costo computacional de las simulaciones *CFD* representado por los parámetros de tiempo de cálculo (horas de CPU) y número de elementos de la malla, el cual podría brindar una idea acerca de la cantidad de memoria RAM requerida para resolver el problema numérico; en este sentido, las investigaciones futuras deben mostrar estos parámetros en sus análisis. Además, se requiere un mayor número de simulaciones utilizando enfoques *LES* y *DNS* para mejorar la precisión en la predicción del comportamiento del viento y del rendimiento de los *UWTs*.

Es necesario desarrollar enfoques integrados para el diseño *CFD* y posicionamiento óptimo de los *UWTs*, no solo de los *BMWTs*. Las ramas incluidas en estos enfoques podrían ser la aerodinámica, la ciencia de los materiales (análisis estructural de todo el aerogenerador), la vibración, el control de la estabilidad, el análisis económico y el análisis medioambiental (visual, acústico y biodiversidad).

Por otro lado, analizar el impacto de incorporar *UWTs* a un sistema de distribución eléctrica (red inteligente), cuando los *UWTs* están sometidos a distintas condiciones de viento (velocidades y direcciones), a lo largo de un período, también representaría un trabajo futuro.

Dado que la literatura científica revisada muestra generalmente la simulación de un solo aerogenerador por cada caso simulado, sería interesante estudiar el comportamiento del viento incidiendo sobre varios *UWTs* ubicados en entornos urbanos, y su interacción cuando los edificios circundantes actúan como obstáculos para el viento, desviando su dirección, y ocasionando la reducción del rendimiento de los *UWTs*. Por ello, se recomienda el desarrollo de métodos de control para reducir el efecto adverso que causan los obstáculos sobre la dirección del viento y su posterior incidencia sobre el rendimiento de los aerogeneradores.

El desarrollo y la optimización de nuevos aerogeneradores y dispositivos de amplificación de velocidad del viento para mejorar el rendimiento y precisión en la predicción de la potencia de salida de los *UWTs* representan también un trabajo futuro. En este caso, los aerogeneradores, dispositivos de amplificación y entorno urbano deberían simularse juntos.

Se recomienda realizar un modelamiento estocástico y la optimización de *UWTs* operando bajo distintos escenarios, que incluyen la modificación de la altura de los edificios dentro del entorno urbano y el desgaste de los materiales de los álabes de los aerogeneradores, con respecto a diferentes pronósticos meteorológicos.

En función de las normas y regulaciones técnicas de cada país, los *UWTs* pueden tener restricciones adicionales. Estas restricciones pueden estar relacionadas con la producción de energía, los niveles de ruido y vibración, y el efecto *flicker*. La aplicación de estas restricciones puede considerarse como un trabajo futuro.

En cuanto al análisis económico de los sistemas eólicos de pequeña escala, se recomienda proponer estructuras de costos más detalladas, con las cuales se pueda analizar con mayor precisión los cambios en el diseño de los *UWTs*. Se recomienda también realizar análisis de los costos del reforzamiento que se adicionaría a los edificios para soportar la instalación de los *UWTs*.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelghany, E. S., Sarhan, H. H., Alahmadi, R., & Farghaly, M. B. (2023). Study the Effect of Winglet Height Length on the Aerodynamic Performance of Horizontal Axis Wind Turbines Using Computational Investigation. *Energies*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/en16135138>
- AbdelSalam, A. M., & Ramalingam, V. (2014). Wake prediction of horizontal-axis wind turbine using full-rotor modeling. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 124, 7–19. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.11.005>
- Abu-Thuraia, H., Aygun, C., Paraschivoiu, M., & Allard, M. A. (2018). Computational fluid dynamic analysis of roof-mounted vertical-axis wind turbine with diffuser shroud, flange, and vanes. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 42(4), 404–415. <https://doi.org/10.1139/tcsme-2017-0093>
- Akhter, M. Z., Ali, A. R., Jawahar, H. K., Omar, F. K., & Elnajjar, E. (2023). Performance enhancement of small-scale wind turbine featuring morphing blades. *Energy*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127772>
- Alexander, S., & Walton, M. (2011). Strata SE1, London, UK: The first in-house wind generator. *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*, 21(1), 37–40. <https://doi.org/10.2749/101686611X12910257102235>
- Allwine, K. J., & Flaherty, J. E. (2006). Joint Urban 2003: Study Overview and Instrument Locations. (Tech Rep PNNL-15967, pp. 1–92). Pacific Northwest National Laboratory. *US Department of Energy - Pacific Northwest National Laboratory*.
- Amini, S., Golzarian, M. R., Mahmoodi, E., Jeromin, A., & Abbaspour-Fard, M. H. (2021). Numerical simulation of the Mexico wind turbine using the actuator disk model along with the 3D correction of aerodynamic coefficients in OpenFOAM. *Renewable Energy*, 163, 2029–2036. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.120>
- Ani, S. O., Polinder, H., & Ferreira, J. A. (2013). Comparison of energy yield of small wind turbines in low wind speed areas. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(1), 42–49. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2197426>
- Anup, K. C., Whale, J., & Urmee, T. (2019). Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: A review. In *Renewable Energy* (Vol. 131, pp. 268–283). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.050>

- Architectural Institute of Japan. (2020). *Guidebook for CFD Predictions of Urban Wind Environment*. https://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index_e.htm
- Arteaga-López, E., & Angeles-Camacho, C. (2021). Innovative virtual computational domain based on wind rose diagrams for micrositing small wind turbines. *Energy*, 220. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119701>
- Arteaga-López, E., Ángeles-Camacho, C., & Bañuelos-Ruedas, F. (2019). Advanced methodology for feasibility studies on building-mounted wind turbines installation in urban environment: Applying CFD analysis. *Energy*, 167, 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.191>
- AWS Scientific Inc. (1997). Wind Resource Assessment Handbook. *National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA*.
- Ayhan, D., & Sağlam, A. (2012). A technical review of building-mounted wind power systems and a sample simulation model. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16, Issue 1, pp. 1040–1049). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.028>
- Balduzzi, F., Bianchini, A., Carnevale, E. A., Ferrari, L., & Magnani, S. (2012). Feasibility analysis of a Darrieus vertical-axis wind turbine installation in the rooftop of a building. *Applied Energy*, 97, 921–929. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.008>
- Balduzzi, F., Bianchini, A., & Ferrari, L. (2012). Microeolic turbines in the built environment: Influence of the installation site on the potential energy yield. *Renewable Energy*, 45, 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.02.022>
- Bechmann, A., Sørensen, N. N., & Zahle, F. (2011). CFD simulations of the MEXICO rotor. *Wind Energy*, 14(5), 677–689. <https://doi.org/10.1002/we.450>
- Bianchini, A. (2019). Trends, Prospects, and R&D Directions in Wind Turbine Technology. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.11864-0>
- Bianchi, S., Bianchini, A., Ferrara, G., & Ferrari, L. (2013). Small wind turbines in the built environment: Influence of flow inclination on the potential energy yield. *Journal of Turbomachinery*, 136(4). <https://doi.org/10.1115/1.4025169>
- Cheng, Y., Lien, F. S., Yee, E., & Sinclair, R. (2003). A comparison of large Eddy simulations with a standard k- ϵ Reynolds-averaged Navier-Stokes model for the prediction of a fully developed turbulent flow over a matrix of cubes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(11), 1301–1328. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2003.08.001>

- Chen, J., & Wang, Q. (2017). Wind turbine airfoils and blades: Optimization design theory. In *Wind Turbine Airfoils and Blades: Optimization Design Theory* (Vol. 3). Walter de Gruyter GmbH & Co KG. <https://doi.org/10.1515/9783110344387>
- Chen, K., Song, M. X., Zhang, X., & Wang, S. F. (2016). Wind turbine layout optimization with multiple hub height wind turbines using greedy algorithm. *Renewable Energy*, 96, 676–686. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.018>
- Cho, K. P., Jeong, S. H., & Sari, D. P. (2011). Harvesting wind energy from aerodynamic design for building integrated wind turbines. *International Journal of Technology*, 2(3), 189–198. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v2i3.1056>
- Chong, W. T., Fazlizan, A., Poh, S. C., Pan, K. C., Hew, W. P., & Hsiao, F. B. (2013). The design, simulation and testing of an urban vertical axis wind turbine with the omni-direction-guide-vane. *Applied Energy*, 112, 601–609. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.064>
- Clausen, P. D., & Wood, D. H. (2000). Recent advances in small wind turbine technology. *Wind Engineering*. <https://doi.org/10.1260/0309524001495558>
- Colley, G. (2012). *Design, Operation and Diagnostics of a Vertical Axis Wind Turbine*. University of Huddersfield.
- Cooney, C., Byrne, R., Lyons, W., & O'Rourke, F. (2017). Performance characterisation of a commercial-scale wind turbine operating in an urban environment, using real data. *Energy for Sustainable Development*, 36, 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.11.001>
- Deltenre, Q., & Runacres, M. C. (2019). Installation of a Small Building-Mounted Wind Turbine: A Case Study from Idea to Implementation. In *Research Topics in Wind Energy* (Vol. 8, pp. 71–88). https://doi.org/10.1007/978-3-030-13531-7_5
- De Prada Gil, M., Gomis-Bellmunt, O., Sumper, A., & Bergas-Jané, J. (2012). Power generation efficiency analysis of offshore wind farms connected to a SLPC (single large power converter) operated with variable frequencies considering wake effects. *Energy*, 37(1), 455–468. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.010>
- Dey, N. (2023). *Applied Genetic Algorithm and Its Variants Case Studies and New Developments*.
- Dilimulati, A., Stathopoulos, T., & Paraschivoiu, M. (2018). Wind turbine designs for urban applications: A case study of shrouded diffuser casing for turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 175, 179–192. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.01.003>

- Diógenes, J. R. F., Claro, J., Rodrigues, J. C., & Loureiro, M. V. (2020). Barriers to onshore wind energy implementation: A systematic review. In *Energy Research and Social Science* (Vol. 60). <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101337>
- Dursun, B., & Gokcol, C. (2011). The role of hydroelectric power and contribution of small hydropower plants for sustainable development in Turkey. *Renewable Energy*, 36(4), 1227–1235. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.10.001>
- Ehsan, A., & Yang, Q. (2018). Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques. *Applied Energy*, 210(July 2017), 44–59. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.106>
- Elfarra, M. A., Sezer-Uzol, N., & Akmandor, I. S. (2014). NREL VI rotor blade: Numerical investigation and winglet design and optimization using CFD. *Wind Energy*, 17(4), 605–626. <https://doi.org/10.1002/we.1593>
- 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>
- Feng, K., Hubacek, K., Siu, Y. L., & Li, X. (2014). The energy and water nexus in Chinese electricity production: a hybrid life cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 342–355.
- Fields, J., Oteri, F., Preus, R., & Baring-Gould, I. (2016). Deployment of Wind Turbines in the Built Environment: Risks, Lessons, and Recommended Practices. *National Renewable Energy Laboratory*, June, 46.
- Fingersh, L., Hand, M., & Laxson, A. (2006). Wind Turbine Design Cost and Scaling Model. In *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* (Vol. 29, Issue December).
- Freiberg, A., Scheffer, C., Hegewald, J., & Seidler, A. (2019). The influence of wind turbine visibility on the health of local residents: a systematic review. In *International Archives of Occupational and Environmental Health* (Vol. 92, Issue 5, pp. 609–628). <https://doi.org/10.1007/s00420-019-01403-w>
- Gagliano, A., Nocera, F., Patania, F., & Capizzi, A. (2013). Assessment of micro-wind turbines performance in the urban environments: An aided methodology through geographical information systems. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 4(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/2251-6832-4-43>

- Ghasemian, M., Ashrafi, Z. N., & Sedaghat, A. (2017). A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus vertical axis wind turbines. In *Energy Conversion and Management* (Vol. 149, pp. 87–100). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.016>
- Gousseau, P., Blocken, B., & Van Heijst, G. J. F. (2013). Quality assessment of Large-Eddy Simulation of wind flow around a high-rise building: Validation and solution verification. *Computers and Fluids*, 79, 120–133. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.03.006>
- Guerri, O., Sakout, A., & Hamdouni, A. (2010). Numerical simulation of the fluid flow around a roof mounted wind turbine. *Wind Engineering*, 34(5), 501–516. <https://doi.org/10.1260/0309-524X.34.5.501>
- Hang, W. X., Tong, C. W., Hoe, W. K., Chin-Tsan, W., Huat, S. L., Chew, P. S., & Hin, L. S. (2018). Preliminary Assessment of Optimized Accessorial Roof Shape for Performance of Wind Turbine Mounted on Eco-Roof System. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 5(3), 375–385. <https://doi.org/10.1007/s40684-018-0040-7>
- Hassanat, A., Almohammadi, K., Alkafaween, E., Abunawas, E., Hammouri, A., & Prasath, V. B. S. (2019). Choosing mutation and crossover ratios for genetic algorithms-a review with a new dynamic approach. *Information (Switzerland)*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/info10120390>
- Hassanli, S., Kwok, K. C. S., & Zhao, M. (2018). Performance assessment of a special Double Skin Façade system for wind energy harvesting and a case study. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 175, 292–304. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.02.002>
- Heath, M. A., Walshe, J. D., & Watson, S. J. (2007). Estimating the potential yield of small building-mounted wind turbines. *Wind Energy*, 10(3), 271–287. <https://doi.org/10.1002/we.222>
- Herraez, I., Medjroubi, W., Stoevesandt, B., & Peinke, J. (2014). Aerodynamic simulation of the MEXICO rotor. *Journal of Physics: Conference Series*, 555(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/555/1/012051>
- Hütter, U. (1942). *Beitrag zur Schaffung von Gestaltungsgrundlagen für Windkraftwerke*. na.
- Hu, W., Yang, Q., Chen, H. P., Guo, K., Zhou, T., Liu, M., Zhang, J., & Yuan, Z. (2022). A novel approach for wind farm micro-siting in complex terrain based on an improved genetic algorithm. *Energy*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123970>
- IEA. (2023). World Energy Outlook 2023. International Energy Agency.

- IEC. (2013). IEC 61400-2:2013 - Wind Turbines II. Small Wind Turbines. In *IEC 61400-2:2013*.
- Ishihara, T., & Qian, G. W. (2018). A new Gaussian-based analytical wake model for wind turbines considering ambient turbulence intensities and thrust coefficient effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 177, 275–292. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.04.010>
- Ishugah, T. F., Li, Y., Wang, R. Z., & Kiplagat, J. K. (2014). Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 37, pp. 613–626). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.053>
- Jafari, S. A. H., Hassanli, S., Kwok, K., Safaei, F., Kosasih, B., & Zhao, M. (2019). Building integration of stator-augmented PowerWindow, a linear cascade wind turbine. *Energy Science and Engineering*, 7(2), 581–598. <https://doi.org/10.1002/ese3.300>
- Jafari, S. A. H., Kwok, K. C. S., Safaei, F., Kosasih, B., & Zhao, M. (2018). The effects of installation configuration and solidity on the power generation of a linear cascade wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 180, 122–135. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.07.015>
- Jamieson, P. (2011). Innovation in Wind Turbine Design. In *Innovation in Wind Turbine Design*. <https://doi.org/10.1002/9781119975441>
- Juan, Y. H., Rezaeiha, A., Montazeri, H., Blocken, B., Wen, C. Y., & Yang, A. S. (2022). CFD assessment of wind energy potential for generic high-rise buildings in close proximity: Impact of building arrangement and height. *Applied Energy*, 321. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119328>
- Juan, Y. H., Wen, C. Y., Chen, W. Y., & Yang, A. S. (2021). Numerical assessments of wind power potential and installation arrangements in realistic highly urbanized areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135(July 2020), 110165. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110165>
- Kamalov, B., Batay, S., Zhangaskhanov, D., Zhao, Y., & Ng, E. Y. K. (2022). Arbitrary Hybrid Turbulence Modeling Approach for High-Fidelity NREL Phase VI Wind Turbine CFD Simulation. *Fluids*, 7(7). <https://doi.org/10.3390/fluids7070236>
- Katoch, S., Chauhan, S. S., & Kumar, V. (2021). A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications*, 80(5), 8091–8126. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>
- Kim, H. G., Jeon, W. H., & Kim, D. H. (2016). Wind resource assessment for high-rise BIWT using RS-NWP-CFD. *Remote Sensing*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/rs8121019>

- Kitchenham, B. (2004). Procedures for performing systematic reviews. *Keele University, UK and National ICT Australia*, 33, 28. <https://doi.org/10.1.1.122.3308>
- Krishnan, A., & Paraschivoiu, M. (2016). 3D analysis of building mounted VAWT with diffuser shaped shroud. *Sustainable Cities and Society*, 27, 160–166. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.06.006>
- Kumar, M., Soomro, A. M., Uddin, W., & Kumar, L. (2022). Optimal multi-objective placement and sizing of distributed generation in distribution system: a comprehensive review. *Energies* (Vol. 15, pp. 7850). <https://doi.org/10.3390/en15217850>
- Kumar, R., Raahemifar, K., & Fung, A. S. (2018). A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 89, pp. 281–291). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.033>
- Larin, P., Paraschivoiu, M., & Aygun, C. (2016). CFD based synergistic analysis of wind turbines for roof mounted integration. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 156, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.06.007>
- Li, K., Bian, H., Liu, C., Zhang, D., & Yang, Y. (2015). Comparison of geothermal with solar and wind power generation systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 42, pp. 1464–1474). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.049>
- Li, Q. S., Shu, Z. R., & Chen, F. B. (2016). Performance assessment of tall building-integrated wind turbines for power generation. *Applied Energy*, 165, 777–788. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.114>
- Liu, J., & Niu, J. (2016). CFD simulation of the wind environment around an isolated high-rise building: An evaluation of SRANS, LES and DES models. *Building and Environment*, 96, 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.007>
- Li, Z., Han, R., Gao, P., & Wang, C. (2019). Analysis and implementation of a drag-type vertical-axis wind turbine for small distributed wind energy systems. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(1). <https://doi.org/10.1177/1687814019825709>
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. In *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. <https://doi.org/10.1002/9781119994367>
- Masoumi-Verki, S., Gholamalipour, P., Haghighat, F., & Eicker, U. (2021). Embedded LES of thermal stratification effects on the airflow and concentration fields around an isolated high-rise building: Spectral and POD analyses. *Building and Environment*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108388>

- Meng, Y., & Hibi, K. (1998). Turbulent measurements of the flow field around a high-rise building. *Wind Engineers, JAWWE*, 1998(76), 55–64. https://doi.org/10.5359/jawe.1998.76_55
- Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- Michalewicz, Z., & Schoenauer, M. (n.d.). *Evolutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems*.
- Moorthy, C. B., Deshmukh, M. K., & Mukherejee, D. (2014). New approach for placing wind turbines in a wind farm using genetic algorithm. *Wind Engineering*, 38(6), 633-642.
- Moorthy, C. B., & Deshmukh, M. K. (2015). A new approach to optimise placement of wind turbines using particle swarm optimisation. *International Journal of Sustainable Energy*, 34(6), 396-405.
- Moreira Chagas, C. C., Pereira, M. G., Rosa, L. P., da Silva, N. F., Vasconcelos Freitas, M. A., & Hunt, J. D. (2020). From megawatts to kilowatts: A review of small wind turbine applications, lessons from the US to Brazil. *Sustainability (Switzerland)*, 12(7), 2760. <https://doi.org/10.3390/su12072760>
- Nunes, M. M., Brasil Junior, A. C. P., & Oliveira, T. F. (2020). Systematic review of diffuser-augmented horizontal-axis turbines. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 133). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110075>
- Onakpoya, I. J., O'Sullivan, J., Thompson, M. J., & Heneghan, C. J. (2015). The effect of wind turbine noise on sleep and quality of life: A systematic review and meta-analysis of observational studies. *Environment International*, 82, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.04.014>
- Orrell, A. C., & Foster, N. F. (2014). *2014 Distributed Wind Market Report*. <http://www.ntis.gov/about/form.aspx>
- Orrell, A. C., & Foster, N. F. (2015). *2015 Distributed Wind Market Report*. <http://www.ntis.gov/about/form.aspx>
- Orrell, A. C., & Rhoads, H. E. (2013). *2013 Distributed Wind Market Report*. <http://www.ntis.gov/about/form.aspx>
- Ovgor, B., Lee, S. K., & Lee, S. (2012). A method of micro-siting of wind turbine on building roof-top by using joint distribution of wind speed and direction, and computational fluid dynamics. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(12), 3981–3988. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0897-2>

- Park, J., Jung, H. J., Lee, S. W., & Park, J. (2015). A new building-integrated wind turbine system utilizing the building. *Energies*, 8(10), 11846–11870. <https://doi.org/10.3390/en81011846>
- Pellegrini, M., Guzzini, A., & Sacconi, C. (2021). Experimental measurements of the performance of a micro-wind turbine located in an urban area. *Energy Reports*, 7, 3922–3934. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.05.081>
- Plaza, B., Bardera, R., & Visiedo, S. (2015). Comparison of BEM and CFD results for MEXICO rotor aerodynamics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 145, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.05.005>
- PRISMA. (n.d.). *Prisma-statement*. Retrieved May 23, 2020, from <http://www.prisma-statement.org/PRISMAStatement/FlowDiagram>
- Rajper, S., & Amin, I. J. (2012). Optimization of wind turbine micro-siting: A comparative study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5485–5492. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.014>
- Rakib, M. I., Nay, S., Evans, S., & Clausen, P. (2019). Wind Regimes in Urban Environments: Experimental Comparison with the IEC 61400.2-2013 Open Terrain Wind Model. In *Research Topics in Wind Energy* (Vol. 8, pp. 201–214). https://doi.org/10.1007/978-3-030-13531-7_12
- Razali, N. M., & Geraghty, J. (2011). Genetic algorithm performance with different selection strategies in solving TSP. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2(1), 1–6.
- Regodeseves, P. G., & Morros, C. S. (2020). Unsteady numerical investigation of the full geometry of a horizontal axis wind turbine: Flow through the rotor and wake. *Energy*, 202, 117674. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117674>
- Rezaeiha, A., Montazeri, H., & Blocken, B. (2020). A framework for preliminary large-scale urban wind energy potential assessment: Roof-mounted wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 214(October 2019), 112770. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112770>
- Ricci, A., Kalkman, I., Blocken, B., Burlando, M., Freda, A., & Repetto, M. P. (2017). Local-scale forcing effects on wind flows in an urban environment: Impact of geometrical simplifications. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 170, 238–255. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.08.001>
- Ricci, A., Kalkman, I., Blocken, B., Burlando, M., & Repetto, M. P. (2020). Impact of turbulence models and roughness height in 3D steady RANS simulations of wind flow in an urban environment. *Building and Environment*, 171, 106617. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106617>

- Riva, L., Giljarhus, K. E., Hjertager, B., & Kalvig, S. M. (2017). Implementation and application of the actuator line model by OpenFOAM for a vertical axis wind turbine [Italy]. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 276, Issue 1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/276/1/012002>
- Rocha, P. A. C., Rocha, H. H. B., Carneiro, F. O. M., da Silva, M. E. V., & de Andrade, C. F. (2016). A case study on the calibration of the k- ω SST (shear stress transport) turbulence model for small scale wind turbines designed with cambered and symmetrical airfoils. *Energy*, 97, 144–150. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.081>
- Rodrigues, R. V., & Lengsfeld, C. (2019). Development of a computational system to improve wind farm layout, Part I: Model validation and near wake analysis. *Energies*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/en12050940>
- Rodriguez, C. V., & Celis, C. (2022). Design optimization methodology of small horizontal axis wind turbine blades using a hybrid CFD/BEM/GA approach. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(6), 254.
- Rodriguez, C. V., Ríos, A., & Luyo, J. E. (2021). CFD Design of Urban Wind Turbines: A Review and Critical Analysis. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 11(2), 618-637.
- Rodriguez, C. V., Ríos, A., & Luyo, J. E. (2024). High-rise Building and a Horizontal Axis Wind Turbine CFD Models Validation Using Two RANS Turbulence Models. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, accepted for publication.
- Rodriguez, C. V., Ríos, A., & Luyo, J. E. (2024). Methodology for Optimal Micrositing of Building Mounted Wind Turbines Using Computational Fluid Dynamics and Genetic Algorithms. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, accepted for publication.
- Rodriguez-Hernandez, O., Martinez, M., Lopez-Villalobos, C., Garcia, H., & Campos-Amezcu, R. (2019). Techno-economic feasibility study of small wind turbines in the Valley of Mexico metropolitan area. *Energies*, 12(5), 890.
- Schatzmann, M., Olesen, H., & Franke, J. (2010). Cost 732 Model Evaluation Case Studies : Approach and Results. *COST Action*, 732, 732.
- Schepers, J. G., & Snel, H. (2007). Model Experiments in Controlled Conditions. In *ECN*. Model experiments in controlled conditions, ECN Report: ECN-E-07-042 (2007).

- Shen, X., Yang, H., Chen, J., Zhu, X., & Du, Z. (2016). Aerodynamic shape optimization of non-straight small wind turbine blades. *Energy Conversion and Management*, 119, 266–278. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.008>
- Shih, T.-H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., & Zhu, J. (1995). A new k- ϵ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24(3), 227–238. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-T](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-T)
- Shirzadi, M., Mirzaei, P. A., & Naghashzadegan, M. (2017). Improvement of k-epsilon turbulence model for CFD simulation of atmospheric boundary layer around a high-rise building using stochastic optimization and Monte Carlo Sampling technique. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 171(January), 366–379. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.10.005>
- Simões, T., & Estanqueiro, A. (2016). A new methodology for urban wind resource assessment. *Renewable Energy*, 89, 598–605. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.008>
- Smith, R. F., & Killa, S. (2007). Bahrain World Trade Center (BWTC): The first large-scale integration of wind turbines in a building. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 16(4), 429–439. <https://doi.org/10.1002/tal.416>
- Snel, H., Schepers, J. G., & Siccama, N. B. (2009). Mexico project: The database and results of data processing and interpretation. *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. <https://doi.org/10.2514/6.2009-1217>
- Soebiyanto, V., Bobby Saragih, J. F., & Tedja, M. (2017). Study on high-rise building using wind energy at humid tropical climate. *Chemical Engineering Transactions*, 56, 241–246. <https://doi.org/10.3303/CET1756041>
- Song, M. X., Chen, K., & Wang, J. (2018). Three-dimensional wind turbine positioning using Gaussian particle swarm optimization with differential evolution. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 172(May 2017), 317–324. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.10.032>
- Sørensen, N. N., Michelsen, J. A., & Schreck, S. (2002). Navier-Stokes predictions of the NREL phase VI rotor in the NASA Ames 80-by-120 wind tunnel. *ASME 2002 Wind Energy Symposium, WIND2002*, 169(March), 94–105. <https://doi.org/10.1002/we.64>
- Stehly, T., Beiter, P., & Duffy, P. (2019). *2019 Cost of Wind Energy Review*. www.nrel.gov/publications.
- Tabrizi, A. B., Whale, J., Lyons, T., & Urmee, T. (2014). Performance and safety of rooftop wind turbines: Use of CFD to gain insight into inflow conditions. *Renewable Energy*, 67, 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.033>

- Thangavelu, S. K., Goh, C. Y., & Sia, C. V. (2019). Design and Flow Simulation of Concentrator Augmented Wind Turbine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 501(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/501/1/012041>
- Toja-Silva, F., Kono, T., Peralta, C., Lopez-Garcia, O., & Chen, J. (2018). A review of computational fluid dynamics (CFD) simulations of the wind flow around buildings for urban wind energy exploitation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 180, 66–87. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.07.010>
- Toja-Silva, F., Peralta, C., Lopez-Garcia, O., Navarro, J., & Cruz, I. (2015a). On roof geometry for urban wind energy exploitation in high-rise buildings. *Computation*, 3(2), 299–325. <https://doi.org/10.3390/computation3020299>
- Toja-Silva, F., Peralta, C., Lopez-Garcia, O., Navarro, J., & Cruz, I. (2015b). Roof region dependent wind potential assessment with different RANS turbulence models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 142, 258–271. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.04.012>
- Tominaga, Y. (2015). Flow around a high-rise building using steady and unsteady RANS CFD: Effect of large-scale fluctuations on the velocity statistics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 142, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.03.013>
- Tominaga, Y. (2023). CFD Prediction for Wind Power Generation by a Small Vertical Axis Wind Turbine: A Case Study for a University Campus. *Energies*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/en16134912>
- Tominaga, Y., Mochida, A., Murakami, S., & Sawaki, S. (2008). Comparison of various revised k- ϵ models and LES applied to flow around a high-rise building model with 1:1:2 shape placed within the surface boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(4), 389–411. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.01.004>
- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indraj, V., & Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.027>
- van Bussel, G. J. W., & Mertens, S. M. (2005). Small wind turbines for the built environment. In *The Fourth European & African Conference on Wind Engineering* (Vol. 5, Issue 2015).
- Vargas, S. A., Esteves, G. R. T., Maçaira, P. M., Bastos, B. Q., Cyrino Oliveira, F. L., & Souza, R. C. (2019). Wind power generation: A review and a research agenda. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 218, pp. 850–870). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.015>
- Vita, V. (2017). Development of a decision-making algorithm for the optimum size and placement of distributed generation units in distribution networks. *Energies*, 10(9).

- Vranešević, K. K., Ćorić, S., & Glumac, A. Š. (2023). LES study on the urban wind energy resources above the roof of buildings in generic cluster arrangements: Impact of building position. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105503>
- Vranešević, K. K., Vita, G., Bordas, S. P. A., & Glumac, A. Š. (2022). Furthering knowledge on the flow pattern around high-rise buildings: LES investigation of the wind energy potential. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 226.
- Wang, Q., Wang, J., Hou, Y., Yuan, R., Luo, K., & Fan, J. (2018). Micrositing of roof mounting wind turbine in urban environment: CFD simulations and lidar measurements. *Renewable Energy*, 115, 1118–1133. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.045>
- Wang, X., Shen, W. Z., Wei, J. Z., Jens, N. S., & Chen, J. (2009). Shape optimization of wind turbine blades. *Wind Energy*, 12(8), 781–803. <https://doi.org/10.1002/we.335>
- Windrose. (n.d.). Retrieved May 22, 2021, from <https://github.com/python-windrose/windrose>
- Wong, K. H., Chong, W. T., Sukiman, N. L., Poh, S. C., Shiah, Y. C., & Wang, C. T. (2017). Performance enhancements on vertical axis wind turbines using flow augmentation systems: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 73, pp. 904–921). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.160>
- Xiong, M., Chen, B., Zhang, H., & Qian, Y. (2022). Study on Accuracy of CFD Simulations of Wind Environment around High-Rise Buildings: A Comparative Study of k- ϵ Turbulence Models Based on Polyhedral Meshes and Wind Tunnel Experiments. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(14). <https://doi.org/10.3390/app12147105>
- Yoshie, R., Mochida, A., Tominaga, Y., Kataoka, H., Harimoto, K., Nozu, T., & Shirasawa, T. (2007). Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(9–11), 1551–1578. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.02.023>
- Zabarjad Shiraz, M., Dilimulati, A., & Paraschivoiu, M. (2020). Wind power potential assessment of roof mounted wind turbines in cities. *Sustainable Cities and Society*, 53.
- Zhu, H., Li, C., Hao, W., Ding, Q., & Yu, W. (2018). Investigation on aerodynamic characteristics of building augmented vertical axis wind turbine. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 10(5). <https://doi.org/10.1063/1.5028198>

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

Título: Metodología de posicionamiento óptimo de aerogeneradores urbanos y su impacto económico en la generación eléctrica.					
Problema de estudio	Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables y dimensiones	Diseño metodológico
El posicionamiento donde se coloca el rotor del aerogenerador urbano se determina de manera empírica, ya que no se conoce con certeza los niveles de turbulencia y dirección que tendrá el flujo de viento luego de incidir sobre los edificios ubicados dentro de los ambientes urbanos. Debido a esto, no se puede asegurar que el aerogenerador producirá la energía eléctrica requerida. Notar que mientras más alto es colocado el rotor del aerogenerador urbano, los costos de instalación	PG: ¿De qué manera el posicionamiento óptimo de los aerogeneradores urbanos impacta económicamente en la generación eléctrica?	OG: Desarrollar una metodología de posicionamiento óptimo de aerogeneradores urbanos que impacte económicamente en la generación eléctrica.	HG: La metodología de posicionamiento óptimo de aerogeneradores urbanos desarrollada impacta económicamente en la generación eléctrica.	Variable independiente 1: Posicionamiento óptimo del aerogenerador. DIMENSIONES: - Posicionamiento. Variable dependiente 1: Impacto económico en la generación eléctrica. DIMENSIONES: - Costo de la energía eléctrica generada.	Tipo de investigación: Aplicada. Nivel de investigación: Explicativo. Método: Analítico. Diseño: No experimental.
	PE1: ¿Cuál es el error obtenido en la validación de modelos numéricos de un edificio y un aerogenerador urbano?	OE1: Validar los modelos numéricos de un edificio y un aerogenerador usando <i>CFD</i> .	HE1: Los errores entre los resultados numéricos y los datos experimentales en la validación de los modelos del edificio y aerogenerador son relativamente pequeños.	Variable independiente 2: Modelo de turbulencia. DIMENSIONES: - Ecuaciones diferenciales. Variable dependiente 2: Grado de error. DIMENSIONES: - Error.	Población y muestra: Población: - Ambientes urbanos. - Aerogeneradores urbanos. Muestra: - Edificio hipotético. - Aerogenerador MEXICO. Técnicas e instrumentos de recolección de datos: TÉCNICA: - Documental. INSTRUMENTOS: - Computadora.

Título: Metodología de posicionamiento óptimo de aerogeneradores urbanos y su impacto económico en la generación eléctrica.					
Problema de estudio	Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables y dimensiones	Diseño metodológico
aumentan (se requiere una torre de mayor tamaño), pero se cuenta con mayor densidad de energía eólica (vientos con mayor velocidad) que puede ser transformada en electricidad.	PE2: ¿Una metodología de posicionamiento óptimo de aerogeneradores urbanos que considera el uso de <i>CFD</i> y <i>GA</i> permite reducir los costos de energía del sistema eólico?	OE2: Desarrollar una metodología de posicionamiento óptimo de aerogeneradores urbanos que considera el uso de <i>CFD</i> y <i>GA</i> para reducir los costos de energía.	HE2: La metodología de posicionamiento óptimo de aerogeneradores urbanos que utiliza <i>CFD</i> y <i>GA</i> permite reducir los costos de energía del sistema eólico.	Variable independiente 3: Posicionamiento del aerogenerador. DIMENSIONES: - Posicionamiento. Variable dependiente 3: Costo de la energía. DIMENSIONES: - Costo de la instalación. - Cantidad de energía generada.	Técnicas e instrumentos de análisis y procesamiento de datos: TÉCNICA: - Estadística. - Simulación. INSTRUMENTOS: - Computadora.

Anexo 2: Matriz de operacionalización

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Operacionalización			Escala de medición
			Dimensiones	Indicadores	Índices y/o ítems	
Variable independiente 1: Posicionamiento óptimo del aerogenerador.	Representa las coordenadas cartesianas de la posición del hub del aerogenerador (plano de giro) sobre la azotea del edificio.	El posicionamiento del aerogenerador se evalúa mediante el valor de sus coordenadas cartesianas sobre la azotea de un edificio.	- Posicionamiento.	- Coordenada x . - Coordenada y . - Coordenada z .	N/A.	Razón.
Variable dependiente 1: Impacto económico en la generación eléctrica.	Aumento o disminución del costo de la energía eléctrica generada por el aerogenerador.	El impacto económico se evalúa comparando los costos de generación eléctrica de distintos aerogeneradores.	- Costo de la energía eléctrica generada.	- Costo del aerogenerador. - Costo específico de la torre. - Energía generada.	N/A.	Razón.
Variable independiente 2: Modelo de turbulencia.	Modelo que busca predecir la turbulencia encontrada en el flujo de un fluido y que sirve como cierre de las ecuaciones de Navier-Stokes.	El modelo de turbulencia viene incorporado en el solver usado para la simulación de fluidos (Fluent).	- Ecuaciones diferenciales parciales.	- Modelo de turbulencia <i>Realizable $k - \varepsilon$</i> . - Modelo de turbulencia <i>SST $k - \omega$</i> .	N/A.	Nominal.
Variable dependiente 2: Grado de error.	Desviación del valor verdadero.	El error se evalúa mediante métricas comparativas.	- Error.	- <i>Hit rate</i> . - <i>Mean square error</i> . - <i>Normalized mean square error</i> .	N/A.	Razón.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Operacionalización			Escala de medición
			Dimensiones	Indicadores	Índices y/o ítems	
Variable independiente 3: Posicionamiento óptimo del aerogenerador.	Representa las coordenadas cartesianas de la posición del hub del aerogenerador (plano de giro) sobre la azotea del edificio.	El posicionamiento del aerogenerador se evalúa mediante el valor de sus coordenadas cartesianas sobre la azotea de un edificio.	- Posicionamiento.	- Coordenada x . - Coordenada y . - Coordenada z .	N/A.	Razón.
Variable dependiente 3: Costo de la energía.	Costo de la instalación (aerogenerador y torre) dividido por la cantidad de energía generada en un periodo de 20 años.	El costo de la energía se evalúa mediante la división del costo total de la instalación (incluye el costo del aerogenerador y el costo de la torre) y la cantidad de energía generada en un periodo de 20 años.	- Costo de la instalación. - Cantidad de energía generada.	- Costo del aerogenerador. - Costo específico de la torre. - Energía generada.	N/A.	Razón.