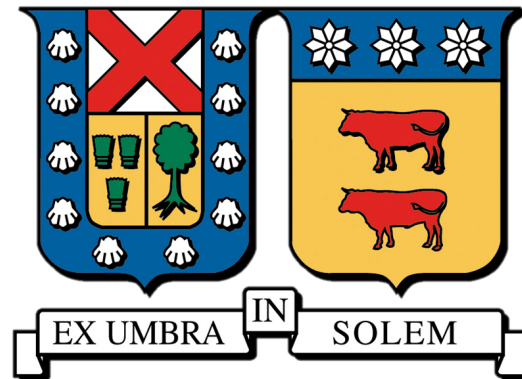


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL



EFECTO DEL RÉGIMEN DE FLUJO EN OPERACIÓN DE
TURBINA EÓLICA VAWT

JAIME TOMÁS ISLA UGALDE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
QUÍMICA

PROFESOR GUÍA: IVÁN CORNEJO GARCÍA

PROFESORES CO-REFERENTES: GONZALO CORNEJO, EDUARDO SALAMANCA

Agosto-2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: EFECTO DEL RÉGIMEN DE FLUJO EN OPERACIÓN DE TURBINA EÓLICA VAWT

Nombre del candidato(a): Jaime Tomás Isla Ugalde

Carrera / Grado: Magíster en Ciencias de la Ingeniería Química

Campus: Santiago San Joaquín ; Departamento: DIQA

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Iván Cornejo García, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 29/08/25

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 29/08/25

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen

La aplicación de turbinas VAWT (turbinas eólicas de eje vertical) de pequeña escala, desde las últimas décadas ha sido un campo de investigación de interés, ya que tanto por geometría y versatilidad, se posiciona como la tecnología predilecta para operar bajo flujos de vientos urbanos caracterizados por una menor velocidad media (menor a 12 m/s), cambios rápidos de dirección y altas fluctuaciones de velocidad (sobre 10% de intensidad de la turbulencia).

La generación eléctrica de baja escala está planificada para ser un aporte y no un sustituto de la red eléctrica central en ciudades, por lo que la velocidad media no resulta un inconveniente. El alto cambio de dirección del viento, gracias a su geometría vertical, le permite trabajar sin mayores interrupciones.

Las conclusiones en torno a la incidencia de la turbulencia en VAWT experimentales, tanto en túneles de viento o en sitios urbanos, son contradictorios. Esto es por la dificultad de lidiar con parámetros de operación frente al comportamiento aleatorio del viento.

Las simulaciones computacionales (CFD), se posicionan como una opción a complementar los resultados experimentales, tanto de túneles de viento y operación. Los modelos numéricos han sido un pilar fundamental para el estudio aerodinámico de las turbinas, tanto en avances de sus diseños, como de operación. Actualmente los estudios no han tenido como objetivo cuantificar la incidencia de flujos turbulentos, ya que, en su mayoría están basados en dominios 2D con esquemas de flujo RANS. Esta configuración no tiene la capacidad de cuantificar las fluctuaciones de velocidad (considera promedios temporales), siendo capaces de analizar parámetros del rotor con flujos invariantes, principalmente. Por otro lado, las simulaciones que realizan estudios detallados de fluctuaciones de velocidad son planteados mediante secciones de dominio (2.5D) y esquemas de flujo LES o SAS. Su objetivo se centra en el análisis del comportamiento de las estelas generadas por el rotor a velocidades definidas, o por otro lado, cuantificar la diferencia de cálculo entre esquemas de flujo sobre coeficientes aerodinámicos.

La presente tesis de grado evalúa la incidencia de la turbulencia sobre un rotor en operación, ponderando tanto los efectos de las fluctuaciones en relación a las características inherentes de un flujo turbulento. Se lleva a cabo una simulación computacional en ANSYS Fluent, acoplado un esquema de flujo LES (large eddy simulation) con un modelo de rotación de la turbina (6DOF).

Se propone, en primer lugar, la puesta en marcha de un rotor de dimensiones e inercia comercial frente a un flujo laminar de 9 m/s. Una vez alcanzado el estado estadísticamente estacionario, se procede a exponer el aerogenerador a 3 regímenes de flujo: laminar, laminar pulsante y turbulento. Mediante el estudio de un flujo laminar pulsante de frecuencia constante (5 Hz), que es determinada a través de un estudio de dimensionamiento, se cuantifica la incidencia de la fluctuación de velocidad (intensidad de la turbulencia) en relación a las características inherentes de un flujo turbulento al poseer fluctuaciones de igual magnitud ($I = 10\%$), pero de distinta frecuencia.

Según los casos analizados, el flujo que genera una mayor diferencia de velocidad de rotor en relación al caso laminar es el laminar pulsante. Este anota un aumento de hasta un 3% en su velocidad en estado estadísticamente estacionario, con tendencia a aumentar para todo tiempo. El caso turbulento, por el contrario, tanto en magnitudes y comportamiento resulta similar al caso laminar, anotando velocidades por debajo de hasta un máximo de 1%.

En relación a los datos expuestos, se afirma la hipótesis al percibir un mayor impacto de las fluctuaciones por sobre las características caóticas de la turbulencia de un flujo que entra en contacto con un rotor.

Finalmente, se plantea un análisis de energía cinética de la turbulencia de la línea central del dominio en el tiempo final de simulación. Existe una disipación total de la energía de fluctuaciones del inlet antes de entrar en contacto con el rotor para el caso turbulento, que su contraparte (pulsante) conserva en su totalidad. Por su estudio de dimensionamiento y la magnitud de frecuencia posicionada en la escala micro meteorológica, el rotor es capaz de coleccionar una porción de energía adicional (aumentando su velocidad tangencial). La disipación total de la energía de las fluctuaciones, por el contrario, conlleva a que el flujo entrante al aerogenerador posea comportamiento y magnitudes laminares, como es el fenómeno ocurrido en el turbulento.

Abstract

The deployment of small-scale Vertical Axis Wind Turbines (VAWTs) has emerged over recent decades as a subject of considerable research interest. Due to their geometric configuration and operational versatility, VAWTs are increasingly recognized as the preferred technology for harnessing wind energy in urban environments, where wind flows are typically characterized by lower average wind speeds (below 12 m/s), rapid directional shifts, and high velocity fluctuations (turbulence intensities exceeding 10

Small-scale electricity generation is planned to complement, rather than replace, the central electrical grid in cities, so average wind speed is not a major issue. The high wind direction variability, thanks to their vertical geometry, allows them to operate with minimal interruptions, though the effect of turbulence on their performance remains undetermined.

Conclusions regarding the impact of turbulence on experimental vertical turbines, whether in wind tunnels or urban environments, have been contradictory. This is due to the difficulty in managing operational parameters against the random behavior of wind.

Computational simulations (CFD) are positioned as a complementary tool to experimental results from both wind tunnels and field operations. Numerical models have been a fundamental pillar for the aerodynamic study of turbines, advancing both their design and operational efficiency. However, current studies have not focused on quantifying the effects of turbulent flows, as they are mostly based on 2D domains with RANS flow schemes. This configuration is incapable of quantifying speed fluctuations (since it considers temporal averages), and mainly analyzes rotor parameters under invariant flows.

On the other hand, simulations that examine detailed speed fluctuations are conducted using domain sections (2.5D) and LES or SAS flow schemes. Their goal is to analyze the behavior of the wakes generated by the rotor at defined speeds or, alternatively, to quantify the calculation differences between flow schemes and aerodynamic coefficients.

This thesis evaluates the impact of turbulence on a rotor in operation, considering both the effects of fluctuations relative to the inherent characteristics of turbulent flow. A computational simulation is carried out in ANSYS Fluent, coupling an LES (large eddy simulation) flow scheme with a turbine rotation model (6DOF).

The first step involves the startup of a commercially-sized rotor facing a laminar flow of 9 m/s. Once statistically steady-state is reached, the wind turbine is exposed to three flow regimes: laminar, pulsating laminar, and turbulent. By studying a pulsating laminar flow with a constant frequency (5 Hz), determined through a sizing study, the impact of speed fluctuation (turbulent intensity) is quantified in relation to the inherent characteristics of a turbulent flow with similar fluctuation magnitude ($I = 10\%$), but different frequencies.

According to the analyzed cases, the flow that generates the greatest rotor speed difference compared to the laminar case is the pulsating laminar flow. It shows up to a 3% increase in speed at steady-state, with a tendency to keep increasing over time. The turbulent case, on the other hand, both in terms of magnitude and behavior, is similar to the laminar case, with rotor speeds remaining below a maximum of 1

Based on the data presented, the hypothesis is confirmed by observing a greater impact from the fluctuations than from the chaotic characteristics of turbulence in a flow that comes into contact with a rotor.

Finally, an analysis of turbulent kinetic energy along the centerline of the domain at the final simulation time is presented. There is a total dissipation of fluctuation energy from the inlet before it contacts the rotor in the turbulent case, whereas its counterpart (pulsating) retains it fully. Due to its sizing study and the frequency magnitude positioned in the micrometeorological scale, the rotor is able to collect additional energy (increasing its tangential speed). In contrast, the total dissipation of fluctuation energy leads to the incoming flow exhibiting laminar behavior and magnitudes, as observed in the turbulent case.

Tabla de Contenidos

1	Introducción y Antecedentes Generales	1
2	Objetivos	7
2.1	Objetivo general	7
2.2	Objetivos específicos	7
2.3	Hipótesis	7
2.4	Alcances	8
3	Marco Teórico	9
3.1	Turbinas eólicas	9
3.1.1	Clasificación general	9
3.1.2	Turbinas eólicas horizontales (HAWT)	11
3.1.3	Turbinas eólicas verticales (VAWT)	16
3.1.4	Principios físicos de la energía eólica	30
3.2	Modelación computacional	51
3.2.1	Software: ANSYS Fluent	51
3.3	Mallado (ANSYS Meshing)	52
3.3.1	Clasificación de mallas	53
3.3.2	Calidad de malla	54
3.3.3	Malla dinámica (Moving Mesh)	58
3.3.4	Modelo de seis grados de libertad (6DOF)	62
3.4	Modelo de flujo	65
3.4.1	Turbulencia y sus modelos	70
3.5	Análisis espectral	72
3.5.1	Transformada de Fourier discreta	73
3.5.2	Transformada rápida de Fourier (FFT)	74
3.5.3	Densidad de potencia espectral (PSD)	74

4	Modelo Computacional	77
4.1	Dominio	77
4.2	Discretización del dominio	79
4.3	Modelo de flujo LES	80
4.3.1	Condiciones de frontera	84
4.3.2	Métodos de resolución numérica del modelo	86
4.4	Modelo 6DOF	87
4.4.1	Configuración general	88
5	Diseño experimental	90
5.1	Simulaciones	90
5.1.1	Estudio paramétrico de modelo 2.5D	90
5.1.2	Análisis del efecto de régimen de flujo	90
5.2	Estudio de malla computacional	91
5.2.1	Independencia de malla horizontal	92
5.2.2	Independencia de malla vertical	93
5.3	Estudio de validación 6DOF	94
5.4	Validación esquema de flujo LES	99
6	Estudio paramétrico de grosor 2.5D	101
6.1	Metodología de estudio	102
6.2	Análisis de resultados	102
7	Análisis de resultados	106
7.1	Fase 1: Aceleración de rotor	106
7.1.1	Estado no estacionario	106
7.1.2	Estado estadísticamente estacionario	108
7.2	Fase 2: Variación de regímenes de flujo	110
7.2.1	Análisis de velocidad de rotor	110
7.2.2	Fase 3: Análisis de dominio	113
8	Conclusiones y Recomendaciones	118

Lista de Tablas

1.1	Detalle de potencia instalada de energía eólica, Chile 2022	3
3.1	Variación de z_0 y m según el terreno	24
3.2	Resumen de las diferencias relevantes entre turbinas de baja escala	28
3.3	Modelos de airfoil utilizados en aeronáutica	46
3.4	Rango de valores de skewness	57
3.5	Clasificación de modelos RANS	70
4.1	Configuración general 6DOF	89
5.1	Lista de experimentos, estudio de dominio 2.5D	90
5.2	Lista de experimentos, aceleración de rotor	91
5.3	Lista de experimentos, efecto de regímenes de flujo	91
5.4	Resultados de escalamiento, independencia malla	91
5.5	Métricas y características de discretización espacial: horizontal	92
5.6	Métricas y características de discretización espacial: vertical	93
5.7	Parámetros de diseño generales, estudio 6DOF	94
5.8	Parámetros de movimiento rotacional, estudio 6DOF	95
5.9	Parámetros de rotación en relación a su área transversal, estudio 6DOF	95
6.1	Lista de simulaciones y sus parámetros, estudio dominio 2.5D	102
6.2	Wall-time y desviación porcentual de velocidad, estudio 2.5D	104
6.3	Estudio de frecuencias de ángulo azimutal, estadísticamente estacionario	105

Lista de Figuras

1.1	Potencia instalada mundial porcentual, año 2022	1
1.2	Capacidad instalada acumulada de energía eólica mundial	2
1.3	Crecimiento de potencia instalada mundial	2
1.4	VAWT DS-1500 de 1.5kW, Hong Kong	4
1.5	Estructura de vórtices en modelo 2.5D de VAWT H-rotor (CFD): (a) esquema de flujo RANS; (b) esquema de flujo LES	6
3.1	Clasificación según construcción de turbinas eólicas	9
3.2	Diseños de turbinas verticales (VAWT)	10
3.3	Brush windmill original de 1888, Cleveland, Ohio	11
3.4	Esquema elemental de turbina HAWT	12
3.5	Vista transversal HAWT, Siemens	13
3.6	Representación del tren de potencia de HAWT	14
3.7	Curva de potencia para diferentes turbinas eólicas	16
3.8	(a) Vista superior de aerogenerador Savonius.(b) Vista lateral de rotor Savonius	17
3.9	(a) Turbina Savonius abasteciendo a una torre de telefonía. (b) Detalle de aerogenerador Savonius	19
3.10	VAWT Darrieus, Heroldstatt (Alemania)	19
3.11	(a) Prototipo Darrieus de altura 50 m, 500kW (Sandia National Laboratories). (b) Darrieus de altura 19 m, 170 kW (American Flowind company).	20
3.12	Izquierda: H-rotor de 200 kW en Falkenberg. Centro: prototipo terrestre NENUPHAR de 600 kW. Derecha: Turbina Anew-B1 de 1.5 MW	21
3.13	Línea de tiempo de VAWT sobre 100 kW. Superior: Modelos VAWT. Inferior: Capacidad instalada, incluyendo todos los VAWTs construidos en un solo año	22
3.14	Distribución de frecuencia de la energía eólica fluctuante dentro de la subcapa interna	25
3.15	Factores que afectan la propagación del ruido	27
3.16	(a) HAWT de pequeña escala, Bergey Wind Co. (b) VAWT de pequeña escala, Lincoln Financial Field	27

3.17	Aerogeneradores HAWT (derecha) y VAWT (izquierda)	29
3.18	Turbina H-rotor T1. Throsholm, Suecia	29
3.19	Influencia de I_u en coeficiente de potencia para diversos valores de tip speed ratio (λ)	30
3.20	Comportamiento de flujo de aire según ley de Betz	32
3.21	Valores de coeficiente de potencia según cociente de velocidad	34
3.22	Fuerzas aerodinámicas incidentes en un cuerpo expuesto a un flujo	35
3.23	Cuerpo trasladado por arrastre (drag)	35
3.24	Airfoil expuesto a fuerzas aerodinámicas de arrastre y sustentación	37
3.25	Esquema vectorial de fuerzas aerodinámicas sobre airfoil de rotor VAWT	38
3.26	Esquema de teoría de momento considerando la rotación de estela	39
3.27	Coeficiente de potencia para diferentes diseños de rotor	40
3.28	Modelo de tiras o blade element theory	41
3.29	Fuerzas dinámicas sobre una sección transversal de un airfoil según modelo de blade element	42
3.30	Definición de airfoil	43
3.31	Nomenclatura general de airfoil	44
3.32	Selección de airfoils de 4 dígitos	45
3.33	Variación de C_l de un airfoil NACA0012	47
3.34	Distribución de presión para un airfoil NACA0012, $\alpha = 5$	47
3.35	Variación de C_d de un airfoil NACA0012	48
3.36	Variación de C_l/C_d de un airfoil NACA0012	48
3.37	Distribución de velocidad en airfoil NACA 0012	49
3.38	Coeficiente de momento para un rotor WKA-60	50
3.39	Coeficiente de potencia para un rotor WKA-60	51
3.40	Ejemplo malla estructurada, no estructurada	53
3.41	Malla con elementos cuadriláteros estructurados cerca de las paredes y elementos triangulares no estructurados en sección de flujo	54
3.42	Trazos de elemento triangular para cálculo de relación de aspecto	56
3.43	Trazos de elemento cuadrilátero para cálculo de relación de aspecto	56
3.44	Comparación gráfica para elementos con sesgo (skewness) ideal o bajo	57
3.45	Vectores necesarios para estimar calidad ortogonal de una celda	58
3.46	Expansión de cilindro mediante método remeshing	60
3.47	a) Malla en estado inicial; b) Dominio interno presenta movimiento definido por cuerpo rígido.	62
3.48	Sistema de referencia para movimiento de cuerpo rígido	63
3.49	Rotaciones que definen los Ángulos de Euler	64

3.50	Representación de capa límite para un flujo paralelo a una placa plana	65
3.51	Descomposición de Reynolds para la velocidad de flujo	66
3.52	Energía espectral de la turbulencia	69
3.53	Comparación de velocidad en un punto para un flujo turbulento según modelo de turbulencia	72
3.54	Espectro de energía de un flujo turbulento	75
4.1	Diagrama 2D del dominio del problema	77
4.2	Dimensiones de dominio 2D	78
4.3	(a) Configuración angular azimutal de airfoils, dominio interno. (b) Valores paramétricos del dominio interno	79
4.4	Vista superior: (a) dominio global; (b) detalle contorno del rotor; (c) sub-dominio móvil; (d) detalle airfoil.	80
4.5	Diagrama 2D del dominio, condiciones de borde	86
5.1	(a) Velocidad tangencial v/s tiempo; (b) Diferencia relativa de velocidad tangencial respecto a malla fina	92
5.2	(a) Velocidad tangencial v/s tiempo; (b) Diferencia relativa de velocidad respecto a malla fina	93
5.3	(a) Tip speed ratio (TSR) v/s Tiempo adimensional (t/T); (b) Diferencia relativa de TSR respecto a datos experimentales	96
5.4	(a) Tip speed ratio adimensional (TSR*) v/s Tiempo adimensional (t/T); (b) Diferencia relativa de TSR adimensional respecto a datos experimentales	96
5.5	Puntos de muestreo de energía resuelta, dominio interno	99
5.6	Porcentaje de energía, caso turbulento: (a) Nodos horizontales ; (b) Nodos verticales	100
6.1	Vista isométrica: (a) Dominio 2.5D, (b) Dominio 2D	101
6.2	(a) Sección alar (airfoil), (b) Dominio interno de dominio 2.5D	102
6.3	(a) Velocidad tangencial v/s tiempo; (b) Diferencia relativa de velocidad tangencial respecto a dominio $H=2c$	103
6.4	Valores medios de velocidad de rotor: (a) ventana acumulada; (b) ventana móvil . .	104
6.5	Análisis angular de cada modelo de dominio 2.5D	105
7.1	Velocidad tangencial de rotor en el tiempo, LES 2D	107
7.2	Coefficiente de potencia (C_p) v/s TSR, LES 2D	107
7.3	(a) Coeficiente de momento v/s tiempo; (b) Momento aplicado al rotor v/s tiempo .	108
7.4	(a) Velocidad tangencial v/s tiempo; (b) Angulo azimutal v/s tiempo	109
7.5	Momento sobre rotor v/s ángulo azimutal.	109

7.6	Coeficiente de potencia v/s tiempo	110
7.7	Velocidad tangencial rotor v/s tiempo	111
7.8	Diferencia porcentual de velocidad de rotor en relación a caso laminar	112
7.9	Esquema de línea transversal de dominio 2D, análisis de dominio	113
7.10	Línea central: (a) Energía cinética sgs v/s Posición; (b) Energía cinética total v/s Posición, caso laminar	114
7.11	Línea central: (a) Energía cinética sgs v/s posición; (b) Energía cinética total v/s posición, caso turbulento	115
7.12	Línea central: (a) Energía cinética sgs v/s posición; (b) Energía cinética total v/s posición, caso laminar pulsante.	116
7.13	Contorno de magnitud de velocidad, caso laminar	116
7.14	Contorno de magnitud de velocidad, caso turbulento	117
7.15	Contorno de magnitud de velocidad, caso laminar pulsante	117

Nomenclatura

Abreviaciones

6DOF	Six degrees of freedom
CFL	Courant Friedrichs Lewy number
CFD	Computational Fluid Dynamics
FFT	Fast Fourier Transform
HAWT	Horizontal axis wind turbine
LES	Large eddy simulation
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
PSD	Power Spectral Density
RANS	Reynolds averaged Navier Stokes
SAS	Scale-Adaptive Simulation turbulence model
TSR	Tip speed ratio
VAWT	Vertical axis wind turbine

Símbolos

A_P	Área proyectada de rotor,	m^2
B	Número de palas	
c	Distancia de chord de airfoil,	m
C_ϵ	Parámetro de modelo LES	
C_k	Parámetro de modelo LES	
C_D	Coefficiente de arrastre	
C_M	Coefficiente de momento	
C_L	Coefficiente de sustentación	
C_p	Coefficiente de potencia	
Δ	Ancho del filtro LES	
δ_{ij}	Delta de Kronecker	
D	Fuerza de arrastre, drag,	N
ϵ	Tasa disipación de energía cinética turbulenta,	m^2s^{-3}
E	Energía cinética neta del flujo de viento,	kgm^2s^{-2}
$E(k)$	Espectro de energía cinética,	m^2s^{-2}

Símbolos

ϕ, θ, ψ	Ángulos de Euler,	rad
Γ	Coefficiente de difusión,	m^2s^{-3}
I_u, IT	Intensidad turbulenta,	%
J, I	Momento de inercia,	kgm^2
k	Energía cinética,	m^2s^{-1}
k_{res}	Energía cinética de resuelta,	m^2s^{-1}
k_{sgs}	Energía cinética de sub-malla,	m^2s^{-1}
k_{TOT}	Energía cinética de total,	m^2s^{-1}
λ	Tip speed ratio	
L	Fuerza de sustentación, lift,	N
L_c	Largo característico,	m
μ	Viscosidad,	Pa s
μ_T	Viscosidad de la turbulencia,	Pa s
m	Coefficiente de rugosidad de terreno	
M	Torque externo neto,	$\text{kgm}^2\text{s}^{-1}$
ω	Velocidad angular de rotor,	rad s^{-1}
P	Presión promedio,	Pa
P_0	Potencia de viento incidente,	W
P_{mech}	Potencia mecánica colectada por turbina,	W
ρ	Densidad,	kgm^{-3}
R, r	Radio de rotor,	m
Re	Número de Reynolds	
S	Tensor de esfuerzo,	s^{-1}
σ	Solidity	
θ	Ángulo azimutal,	°
t	Tiempo,	s
\vec{u}_g	Velocidad de malla,	m^{-1}
\vec{u}	Vector de velocidad de flujo ,	m^{-1}
U_{inf}, U	Velocidad media del viento,	ms^{-1}
z	Altura de turbina,	m

Capítulo 1

Introducción y Antecedentes Generales

El análisis en torno a los factores del cambio climático se centra en los gases de efecto invernadero, especialmente en el CO_2 , que aproximadamente es el 60% de los antropogénicos [1]. Dentro de los esfuerzos para disminuir dicho porcentaje, está reformular la matriz energética mundial sostenida principalmente en combustibles fósiles. A comienzos del siglo XXI, la emisión volumétrica de CO_2 a la atmósfera era en torno a los 23,000 millones de toneladas métricas anuales, alcanzando ya para el año 2024 un máximo registrado de 37,400 millones [2]. Para dar respuesta a este inexorable aumento de dióxido de carbono, las energías renovables presentan una pujante lucha para transformar el mercado eléctrico, donde sus proyecciones buscan aumentar en un 60% el consumo de energía renovable de sectores eléctricos, calefacción y transporte entre 2024 y 2030. Esto conlleva lograr un consumo de renovables cercano al 20% del total para 2030, frente al 13% de 2023 [3]. Según la matriz energética mundial, en 2022 se estimaba una presencia de fuentes fósiles cercana al 60%, destacándose que la energía eólica se ubicaba solo detrás de la hidráulica (hegemónica de las renovables). El detalle de cada fuente renovable y no renovable se resume en la Figura 1.1.

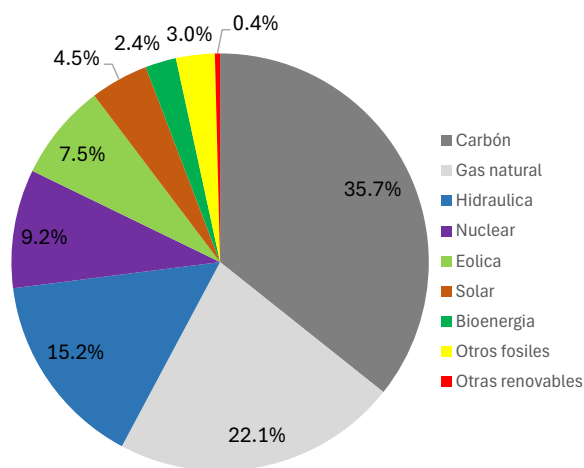


Figura 1.1: Potencia instalada mundial porcentual, año 2022 [4]

La presencia de la energía eólica del 7.5 % del 2022, se traduce en un valor cercano al millón de Megawatt instalados en todo el mundo (930,716 MW), como lo indica la Figura 1.2.

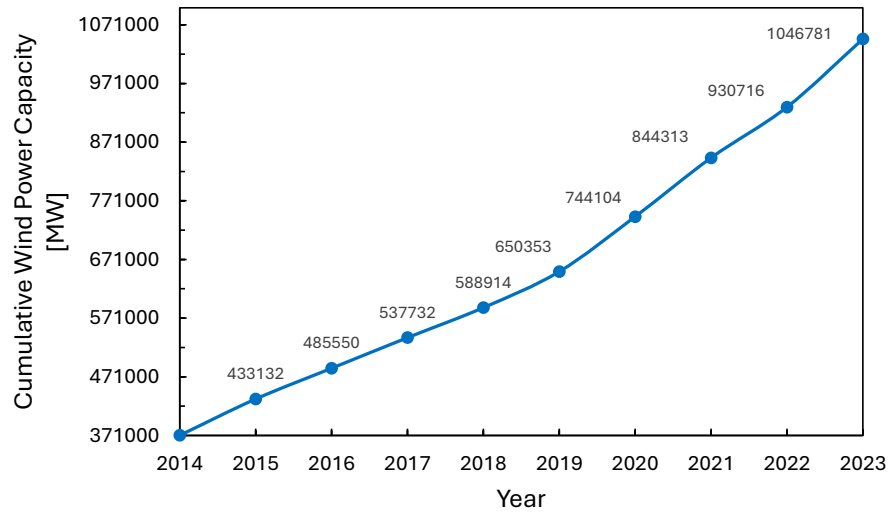


Figura 1.2: Capacidad instalada acumulada de energía eólica mundial [5]

En relación comportamiento del mercado eólico, solo para el transcurso de 2022 y 2023, anotó un aumento de 116,000 (MW), que representa un crecimiento de un 12.5%. Este valor no es un caso aislado, ya que se presenta una tendencia sostenida al alza al observar su curva de potencia instalada anual desde el año 2014, como lo expresa la Figura 1.3.

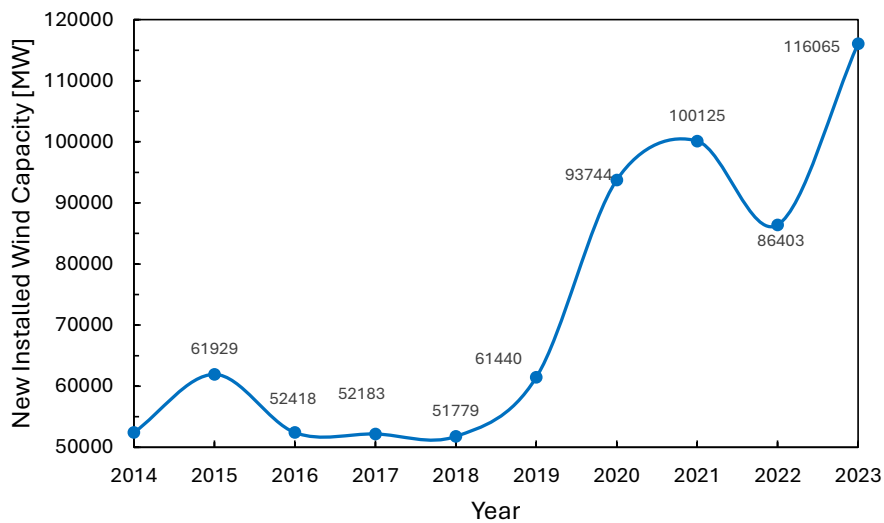


Figura 1.3: Crecimiento de potencia instalada mundial [5]

El país latinoamericano destacado en la puesta en marcha de proyectos eólicos para 2023, en

términos porcentuales de su matriz, fue Brasil. Dicho año presentó el mayor aumento a nivel mundial con un 20.8 %, siendo China el segundo con 19.0%. Con esta alza se ubicó como el tercer mercado mundial para nuevas plantas de energía eólica, sumando 4.9 GW de capacidad en tan sólo un año (2023). En capacidad total ocupa el quinto lugar, logrando una capacidad de 28.6 GW, posicionándose como el líder de América del sur [5].

El segundo puesto de América del sur, es Chile. Actualmente posee una potencia instalada de 4.8 GW, anotando un crecimiento de 1 GW en dos años. Para 2022 presentaba 3.8 GW instalados, que se traducían en un 12% del sistema eléctrico nacional [6]. La contribución de la potencia instalada de energía eólica en los diversos sistemas eléctricos para dicho año, se detallan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Detalle de potencia instalada de energía eólica, Chile 2022 [6]

	Eólica (MW)	Total (MW)	
SEN	3,805	31,709	12.0%
SEA	3.1	66	4.7%
SEM	2.6	116	2.20%
Total	3,810.7	31,891	12.0%

Los proyectos eólicos que aportan la potencia eléctrica instalada a nivel mundial, son exclusivamente turbinas horizontales (HAWT) de gran escala. Este diseño de aerogenerador posee la mayor capacidad de colección de energía del medio, pero para lograr una operación sin interrupciones y con las magnitudes de generación nominales, se debe realizar un estudio del viento riguroso. Por diseño, las turbinas horizontales requieren de bajos cambios de dirección de viento y fluctuaciones de velocidad (intensidad turbulenta), además de presentar problemas de mantenimiento (generador en altura) y ruido a población rural aledaña.

Los estados del Golfo, Arabia Saudita, Emiratos Árabes Unidos, Kuwait y Omán, son ejemplos de países con interés en diversificar su matriz energética hacia aerogeneradores, pero lamentablemente presentan ciertas dificultades para dar inicio a proyectos de gran escala. Tanto en la planificación y despliegue de proyectos de energía eólica existe un avance, sin embargo, el medio se caracteriza por tener un potencial eólico esporádico en sus áreas montañosas, que por consecuencia conlleva a que los HAWT no puedan desplegar su gran ventaja en términos de potencia [7].

Las turbinas verticales (VAWT), por factores únicamente de diseño, se posiciona como la alternativa a muchos de los desafíos que merman la operación de una horizontal. Esta tecnología se destaca por su mayor versatilidad a la hora de alimentar zonas remotas o fuera de la red, pero también se caracterizan por tener una menor capacidad de coleccionar energía del viento. A pesar de que HAWT posee la hegemonía del mercado eléctrico, los aerogeneradores de eje vertical, especialmente las turbinas H-rotor, han recibido mucha atención en los últimos años para aplicaciones de pequeña

escala. La facilidad de mantenimiento, su simplicidad en la fabricación de las palas, el menor nivel de ruido operativo y una operación omnidireccional frente al viento, representan una gran ventaja sobre las turbinas convencionales para entornos urbanos [8].

Las dimensiones de una turbina urbana (pequeña escala) no superan los 10 (m) de altura debido a las limitaciones de las ciudades. La Figura 1.4 expone una turbina vertical ubicada en el techo de un edificio de la ciudad de Hong Kong. Su diseño contempla 7 (m) de altura total, un diámetro cercano a 3 (m) y una velocidad de viento de operación de 12 (m/s). Analizando su limitada capacidad de generación eléctrica (1.5 kW nominal, para este caso), se proyectan como un complemento a la red central de energía, ya que tienen la habilidad de proporcionar energía de forma local y directa a edificios o condominios aledaños. El fin del consumo in situ de energía radica en disminuir los costos de transporte de energía y de construcción de torres de transmisión, ya que los aerogeneradores pueden instalarse sobre la cima de los rascacielos, colinas de los parques o grandes avenidas. La energía eólica urbana, por lo tanto, se espera a que cohabite con la red principal de abastecimiento en las futuras ciudades inteligentes, especialmente en regiones ventosas con baja radiación solar [9].



Figura 1.4: VAWT DS-1500 de 1.5kW, Hong Kong [10]

Las características positivas de diseño y operación de VAWT, la posicionan como la tecnología idónea para las zonas urbanas, pero los entornos urbanos y semiurbanos fuera de presentar flujos turbulentos de alta fluctuación, presentan una menor magnitud de velocidad media que disminuye la generación eléctrica independiente cual sea la tecnología a implementar. La característica caótica

del viento urbano, se asocia principalmente por [11]:

- Alta rugosidad de la superficie.
- Interacción entre los flujos entrantes y las estructuras locales complejas de los edificios.
- Inestabilidades atmosféricas causadas por fuentes de calor locales.

Actualmente existen diversos estudios experimentales del impacto que genera la turbulencia del viento sobre la operación de una turbina vertical de pequeña escala. Las conclusiones resultan poco confiables y contradictorias, ya que se asegura que su efecto es positivo, negativo, o dependiente de la velocidad. La incongruencia resulta a lo menos entendible, ya que experimentalmente existe una imposibilidad en controlar todas las condiciones externas e influencias de un entorno urbano real [9]. Afortunadamente, de forma paralela a todos estos esfuerzos en laboratorios, existe un vasto campo de estudios computacionales para complementar sus conclusiones de las turbinas que se encuentran operando, tanto en sitios urbanos o túneles de viento.

Los métodos numéricos, específicamente volúmenes finitos aplicados en fluido dinámica (CFD), son considerados una herramienta fundamental para estudiar las fuerzas aerodinámicas de los VAWT en las últimas dos décadas. Se constituyen como el pilar fundamental para el desarrollo de diseño de rotores, estudios de parámetros de operación o incluso para modelos más complejos, la reacción del rotor frente a diferentes regímenes de flujo del aire incidente.

De forma general, los modelos computacionales implementados para estudiar los aerogeneradores se dividen en dominios 2D y secciones de turbinas llamados 2.5D. Las simulaciones se componen por su sistema de movimiento de cuerpo rígido (6DOF), que a su vez está acoplado al esquema de flujo a elección (RANS, LES, DNS, etc). Debido a su exigente costo en términos de tiempo de simulación, los dominios 2D con esquemas de flujo RANS son los más utilizados para simular el rendimiento aerodinámico de los VAWT. Este enfoque, en comparación con los resultados experimentales, otorga una tendencia comparable de su velocidad angular, pero sobrestima los coeficientes de potencia (C_p) [12].

Estudios acerca de las diferencias entre modelos de flujo para simulaciones de VAWT mediante CFD, son variadas. Dentro de los aspectos que posicionan a RANS en desventaja frente a otros métodos de cálculo de fluctuaciones de velocidad (SAS, LES, DNS), se destaca:

- Desprendimiento de capa límite: no presentan precisión a la hora de simular el flujo sobre la superficie de las aspas. Esto ocasiona una distribución de velocidad errónea produciendo una posible sobre estimación de coeficientes aerodinámicos.
- Promedio de fluctuaciones: estos esquemas son promedios temporales de las fluctuaciones, por lo que sus resultados son una estimación de los efectos que debiese tener un flujo turbulento y no un cálculo de sus fluctuación de velocidad, que entrarán en contacto con las aspas.

Dentro de las alternativas para llevar a cabo una simulación que se asemeje aún más a los valores de coeficiente de potencia, distribución de velocidad colindante al rotor y simulación de un flujo turbulento incidente (zonas urbanas), es el Large Eddy Simulation (LES). De manera cualitativa, la Figura 1.5 describe como trabaja cada esquema de flujo los vórtices generados por el efecto de rotación de las aspas frente a una misma velocidad de operación ($TSR=1.96$).

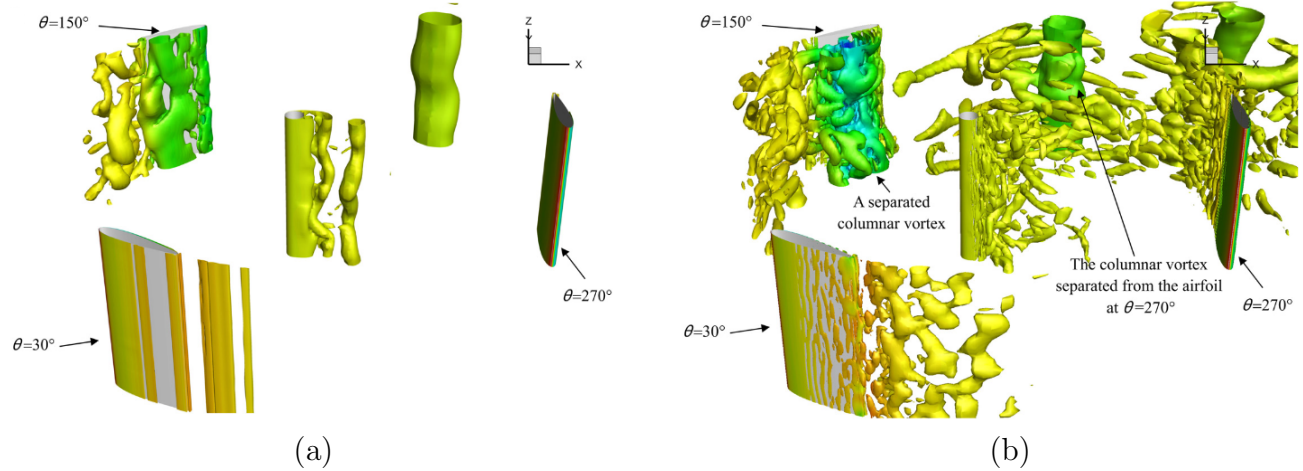


Figura 1.5: Estructura de vórtices en modelo 2.5D de VAWT H-rotor (CFD): (a) esquema de flujo RANS; (b) esquema de flujo LES [13]

LES, de forma general, es capaz de calcular las fluctuaciones de velocidad de mayor tamaño conocidos como vórtices de mayor energía (anisotrópicos). Estas estructuras, por su nivel de energía, eventualmente afectarán con mayor relevancia a la rotación del rotor en comparación a los de menor energía, por lo tanto, los más pequeños (isotrópicos) pueden ser estimados (simulados) mediante un esquema SGS (sub-grid-scale). La diferenciación entre dichas estructuras, LES lo lleva a cabo mediante un filtro espacial (Δ), discriminando en una porción de fluctuaciones calculadas (anisotrópicos), y otras, solo simuladas (isotrópicos).

Los análisis espectrales del aire, son la herramienta que dan a conocer distribución de la energía disponible del viento en frecuencia. Las micro estructuras son la fracción de energía que las turbinas actuales, por si mismas, no son capaces de coleccionar, abriendo una posibilidad de aumentar su capacidad de generación. Para el presente trabajo de título, fuera de validar un esquema de flujo LES y un modelo de rotación de cuerpo rígido (6DOF) para una turbina de inercia comercial, se procede a plantear la capacidad de una turbina en reaccionar a dichas distribuciones de frecuencia. Esto se concreta mediante la exposición frente a un flujo turbulento (distribución de frecuencias) y un caso laminar pulsante. Dicho régimen laminar posee una frecuencia constante de fluctuación, aislando la fracción de micro estructuras del flujo para observar y cuantificar la reacción del rotor.

Capítulo 2

Objetivos

2.1 Objetivo general

Determinar el efecto de diferentes regímenes de flujo del aire incidente en la operación de una turbina eólica vertical (VAWT).

2.2 Objetivos específicos

- i. Evaluar la capacidad de resolución de un dominio 2D sobre la velocidad tangencial de un rotor en el tiempo mediante un estudio paramétrico de grosor de dominio 2.5D.
- ii. Calcular la fase de aceleración y estado estadísticamente estacionario de un aerogenerador gracias a un sistema acoplado de esquema de flujo LES y de rotación 6DOF.
- iii. Determinar la incidencia de régimen de flujo de entrada sobre el rotor en estado estadísticamente estacionario, implementado arreglo de experimentos ortogonales (laminar, turbulento, laminar pulsante).

2.3 Hipótesis

La operación del rotor se encuentra determinada por las fluctuaciones de flujo. En este sentido, los resultados de energía producida bajo regímenes de flujo laminar transitorio y turbulentos podrían ser comparables. De este modo, se demostraría que la intermitencia de flujo es preponderante respecto a la naturaleza caótica de la turbulencia.

2.4 Alcances

En este trabajo se implementa un modelo computacional de sección de turbina eólica vertical, que consta de un esquema de flujo y de rotación de cuerpo rígido (6DOF). El fin de la simulación computacional es determinar el comportamiento de la aceleración de un rotor en relación a los regímenes de flujo que será sometido (laminar, laminar pulsante y turbulento). Para determinar aquello, se utiliza el método de volúmenes finitos mediante la herramienta computacional ANSYS Fluent. El modelo de flujo empleado es LES (large eddy simulation), que permite calcular de forma veraz la fenomenología del flujo incidente sobre la superficie de las aspas.

Debido al alto costo computacional que conlleva acoplar dicho esquema de flujo con el movimiento de cuerpo rígido, se plantea una simulación en primera instancia de aceleración del rotor hasta conseguir su estado estadísticamente estacionario con un flujo laminar. Una vez conseguido, se efectuarán las tres simulaciones que representan los regímenes de flujo en cuestión, para posteriormente evidenciar el comportamiento de la velocidad tangencial del rotor en el tiempo. Con dichos resultados se podrá tener una mayor comprensión de cómo las diferentes características del flujo afectan el desempeño de las turbinas eólicas, proporcionando información para mejoras de su diseño.

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1 Turbinas eólicas

3.1.1 Clasificación general

Existen dos clasificaciones de turbinas eólicas, diferenciadas por:

- Fuerza aerodinámica gobernante: se identifican según la fuerza aerodinámica que genera el movimiento del rotor. Esta puede ser mediante la fuerza de arrastre (drag) o gracias a la fuerza de sustentación (lift).
- Diseño o construcción: la más común, ya que es posible de identificar a simple vista. Se diferencian por la orientación del eje de rotación del rotor, siendo un modelo vertical (VAWT) y otro horizontal (HAWT), como se observa en la Figura 3.1.

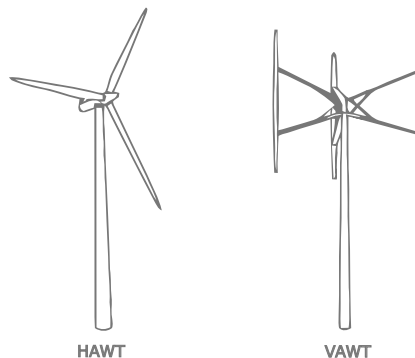


Figura 3.1: Clasificación según construcción de turbinas eólicas [14]

Es común relacionar a los aerogeneradores por su orientación HAWT, pero tanto el prototipo pionero de generación eléctrica como el primer molino de vientos de molienda de granos que se tiene información (manufacturado por persas en el siglo X, actualmente Irán), fueron de orientación vertical (VAWT) [15]. Posteriormente se desarrollaron diversos modelos de aerogeneradores verticales (Figura 3.2), ya que cada rotor fue dando una solución tanto en la operación, tecnología en manufacturación y/o diseño disponible para la época.

El primer diseño de aerogenerador VAWT contemplaba como fuerza aerodinámica impulsora el arrastre (drag). Este modelo se le conoce como “Savonius rotor”, patentado en 1925. Alcanzó cierta popularidad en Finlandia para generación eléctrica en 1960, principalmente por tener un diseño simple y bajos costos de construcción, pero finalmente no prosperó comercialmente en dicho mercado.

En 1930, el ingeniero francés Georges Darrieus construyó el primer modelo basado en la sustentación (lift). El “rotor Darrieus”, dentro de sus innovaciones destacó la forma curva de sus palas que permitió basarse en el lift, pero conllevó a que la manufactura fuera compleja para la época. De igual forma que el rotor Savonius, la turbina Darrieus fue ignorada prácticamente hasta que fue reinventada en Canadá en 1970 [16].

Para dar solución a ciertas desventajas del rotor Darrieus, se propuso el modelo “H-rotor”. En lugar de palas de rotor curvas, se reemplazaron por palas rectas unidas al eje del rotor de forma transversal, resultando ser simples de fabricar y a un menor costo. Tanto en Reino Unido, Estados Unidos y Alemania se realizaron estudios para desarrollar el diseño hasta su madurez comercial, sin embargo, hasta el día de hoy los costos de producción son altos al compararse con una turbina horizontal (HAWT) de gran escala [14].

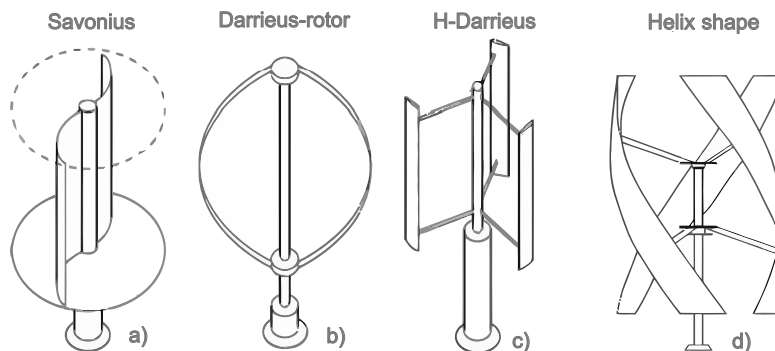


Figura 3.2: Diseños de turbinas verticales (VAWT) [14]

Si bien el modelo pionero de turbina eólica patentada fue de Savonius en 1925 (VAWT), el primer intento de generar electricidad mediante el uso del viento se realizó en Estados Unidos gracias al inventor y constructor Charles Brush en 1888. Modificando un molino de viento de

molienda (horizontal), como se aprecia en la Figura 3.3, logró implementar el primer generador eólico conocido como “Brush windmill” (molino de Brush), que tenía como finalidad la carga de baterías (DC), ya que la velocidad de giro del molino causaba variaciones en la energía entregada al sistema. Las especificaciones del “Brush windmill” eran de 12 (kW) de corriente continua (DC) para cargar baterías de almacenamiento, que resultaba en un suministro de 350 luces incandescentes de aquella época [14].

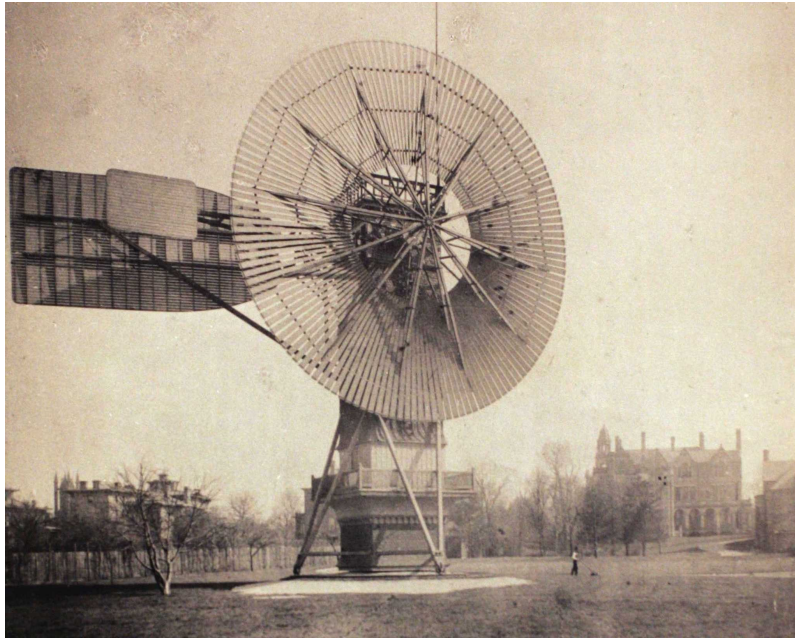


Figura 3.3: Brush windmill original de 1888, Cleveland, Ohio [14]

3.1.2 Turbinas eólicas horizontales (HAWT)

Las turbinas eólicas hegemónicas del mercado eléctrico actual son de eje horizontal (HAWT). La indiscutible superioridad de este diseño (en términos de generación eléctrica a gran escala) hasta la fecha, se basa en lo siguiente [14]:

- Tanto la velocidad del rotor y la potencia generada se pueden controlar inclinando las palas alrededor de su eje longitudinal (blade pitch control). Además, resulta ser la protección más eficaz contra velocidades extremas del viento.
- El diseño de las palas del rotor se optimizaron aerodinámicamente, logrando aumentar al máximo la sustentación aerodinámica (lift) durante la segunda mitad del siglo XX y XXI.
- Ha presentado el mayor desarrollo tecnológico (mayor inversión), lo que conlleva a que se posicione como la primera opción del mercado eólico.

La operación de una turbina horizontal depende de una amplia gama de factores, pero se destacan en primer lugar la altura de torre (H), diámetro de rotor (D) y el número de palas (B), como se describe en la Figura 3.4. Tanto la altura de torre, que determina la velocidad media de viento (U_∞) disponible, y el diámetro de rotor, definen la potencia disponible (P) que puede colectar un aerogenerador, estimada por la Ecuación (3.1).

$$P = \frac{1}{2} C_P \rho A U_\infty^3 \quad (3.1)$$

Siendo C_P el coeficiente de potencia, A (m^2) área de rotor y ρ (kg/m^3) la densidad del aire. Con respecto al número de palas (B), suele ser dos o tres. Las turbinas de dos palas presentan un costo de construcción menor (al poseer menos palas), pero a la hora de comparar su operación, presentan desventajas. Por lo general, presentan una velocidad angular mayor que una de tres palas bajo las mismas condiciones ambientales, por lo que tienden a tener interrupciones de producción de energía, además de tener una eficiencia aerodinámica menor [16].

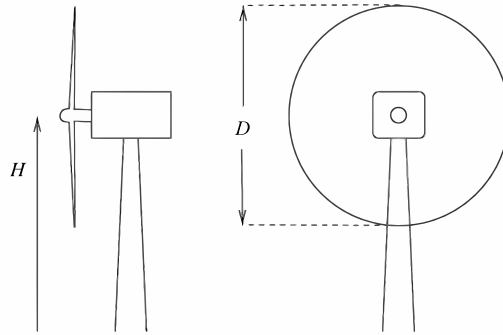


Figura 3.4: Esquema elemental de turbina HAWT [17]

El rotor es el componente del aerogenerador que mayor desarrollo ha experimentado en los últimos años. Los perfiles aerodinámicos (airfoils) utilizados en las primeras palas resultaban de modelos de avión, por lo que no presentaban estudios de optimización para ángulos de ataque más pronunciados que frecuentemente se describen en la operación de un rotor de estas características. Dentro de las cualidades de los materiales de las palas, estudiados y probados ampliamente en los últimos 50 años, se destaca que deben ser lo suficientemente resistentes y rígidos, presentar un límite de resistencia a la fatiga alto y ser lo más económico posible. Hoy en día la mayoría de palas están construidas con plástico reforzado con fibra de vidrio, pero también se utilizan otros materiales como madera laminada [17].

Diseño general de turbina HAWT

Una turbina eólica no solo presenta en su estructura el rotor, siendo las aspas su principal componente a simple vista, sino que posee una estructura de diversos componentes tanto mecánicos y eléctrico llamado “Power-train subsystem”, cuya finalidad es convertir la potencia mecánica del rotor a potencia eléctrica, como se puede apreciar en la la Figura 3.5.

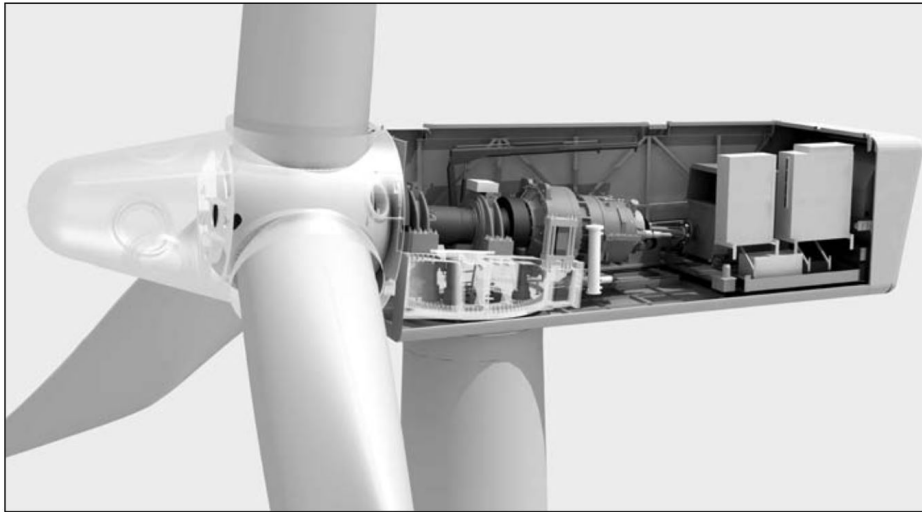


Figura 3.5: Vista transversal HAWT, Siemens [17]

Para un modelo de mediana-gran escala, un tren de potencia puede ser descrito por la Figura 3.6, donde se destacan:

- Eje del rotor (Turbine shaft assembly): eje de rotación de la turbina ó de baja velocidad.
- Caja de cambios (Gearbox): variador de velocidad del eje del rotor. Existen modelos con sistema “Direct drive” en su lugar.
- Eje de transmisión del generador (Generator drive shaft): eje posterior al aumento de velocidad por gearbox (eje de alta velocidad).
- Freno del rotor (Rotor brake): utilizado solo en emergencias o mantenimiento, ya que los HAWT presentan el “Pitch control” para operar bajo variaciones de velocidad del viento.
- Generador eléctrico: por lo general está en altura.
- Sistemas auxiliares: control eléctrico, lubricación y refrigeración.

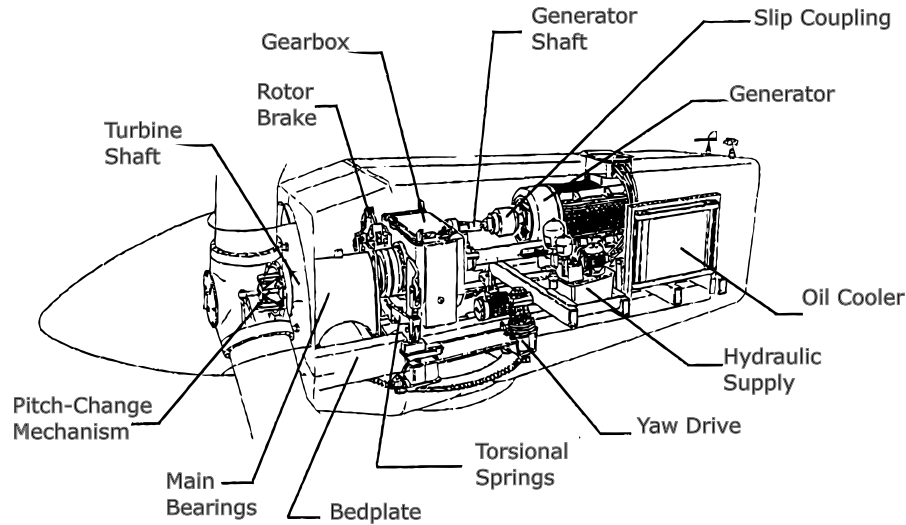


Figura 3.6: Representación del tren de potencia de HAWT [16]

Para cada modelo, como también escala, se tienen diversas especificaciones de cada componente.

1. Sistema de guiñada (yaw mechanism): el sistema de guiñada tiene como función principal permitir operar frente a cambios de dirección del viento, asunto que no resulta problemático para una turbina VAWT, ya que se definen como omnidireccionales. Los sistemas de guiñada fuera de presentar un costo de diseño, también requieren de mantención y sistemas de control [17].
2. Ubicación del generador: debido a que el eje de rotación se encuentra en altura, el generador de un HAWT también, lo que conlleva a un costo adicional en relación a mantención, como también instalación. En el caso de las turbinas VAWT, al tener su eje perpendicular al terreno, es posible ubicar dicho generador eléctrico por debajo de su torre [15].
3. Direct drive ó gearbox: un sistema con accionamiento directo (direct drive), se comprende en que la velocidad de giro de rotor es el mismo que el del generador eléctrico, por lo que la caja de cambios (gearbox) pasa a ser prescindible del tren de potencia. Excluir el sistema de variación de velocidad disminuye las fallas, como también la necesidad de mantenimiento. Ahora bien, un generador con accionamiento directo de escala comercial resulta ser de mayor tamaño y peso, por lo que se desarrollaron modelos con el fin de reducir su tamaño, peso y el costo del generador eléctrico, y así poder competir con generadores que operan a mayor velocidad que el rotor principal [16].

Finalmente, el rendimiento de la turbina eólica, ya sea VAWT o HAWT, se vé reflejado numéricamente con el coeficiente de potencia (C_P), que se expresa como la constante de proporcionalidad de la Ecuación (3.1). Este coeficiente se traduce como la cantidad de potencia del viento

que es posible capturar por la turbina de viento.

Teóricamente, el valor máximo de C_P es de 0.59, ya que está calculado para condiciones ideales de operación para una turbina eólica (límite de Betz). Como es entendible debido al contexto histórico y actual, los valores para HAWT son superiores a su contraparte, ya que se encuentran entre 0.40 y 0.50, mientras que para los pocos casos de gran escala VAWT, no se tiene una estimación transversal. Sin embargo, estudios teóricos y experimentales dan un valor al rededor de 0.40 para VAWT, lo que las posiciona por debajo en torno a la capacidad de transferir la energía del viento a potencia eléctrica [15].

Para comparar el C_P de diversas turbinas, primero se debe definir un parámetro de operación fundamental, que es el “Tip speed ratio” (TSR ó λ), expresado según la Ecuación (3.2). Este parámetro puede tener un valor superior a la unidad, ya que se podría cumplir que el rotor tenga una velocidad mayor que el de la entrada de viento.

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (3.2)$$

Siendo, ω la velocidad angular de la turbina (rad/s), R el radio del rotor (m) y v la velocidad del viento de entrada (m/s). Con respecto al C_P , este coeficiente es obtenido para diversos valores de λ , logrando evidenciar el posible rendimiento que tendría a diferentes velocidades de rotor, según sea el modelo o tipo de turbina en estudio. La Figura 3.7 ejemplifica dicha comparación para las siguientes turbinas [15]:

- Darrieus: 500kW (Sandia-34), desarrollada por National Renewable Energy Laboratory, USA
- HAWT: Datos históricos representativos de National Renewable Energy Laboratory, USA
- H-Rotor: 100kW (2 palas), Inglaterra.

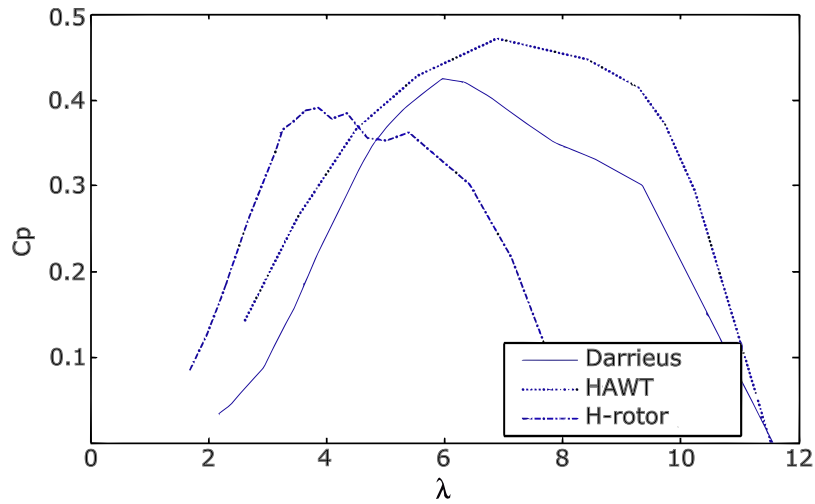


Figura 3.7: Curva de potencia para diferentes turbinas eólicas [15]

Dentro de las conclusiones del estudio de C_P de la Figura 3.7, se destaca:

- El valor máximo es obtenido para HAWT, que se explica por su alta inversión y optimización en diseño.
- Darrieus presenta valores competitivos con respecto a HAWT, ya que presentan comportamiento similar en torno a λ . Existe un campo de optimización en torno a la aerodinámica de sus airfoils con la finalidad de reducir el arrastre (drag).
- El H-rotor presenta un mejor desempeño para valores bajos de λ , pero se destaca que la partida para un VAWT debe ser asistida por la red, no así para HAWT que arranca por si mismo.

3.1.3 Turbinas eólicas verticales (VAWT)

Las plantas eólicas de gran escala (Mega Vatios, MW), están prácticamente conformadas exclusivamente por tecnología HAWT. A pesar de que existen investigaciones e inversiones considerables en el último tiempo, no existe un aerogenerador VAWT que compita con dichas turbinas horizontales. Dentro del mercado de generación eléctrica se cuestionan los potenciales de los parques eólicos impulsados por aerogeneradores verticales, ya que además de requerir una inversión para aumentar su eficiencia, hay un buen número de fabricantes de sistemas eólicos tradicionales que pueden documentar años de experiencia e instalaciones exitosas, ya que al tratarse de proyectos de gran tamaño, resultaría difícil hallar una empresa que asuma el riesgo [18].

Al analizar instalaciones de pequeña escala, con una potencia nominal de hasta aproximadamente

10 (kW), esta tecnología resulta ser una alternativa relevante. Por diseño, los sistemas horizontales encuentran sus límites cuando se ubican en áreas de alta montaña, regiones con vientos extremadamente fuertes y en áreas urbanas (alta intensidad turbulenta). VAWT plantea diversos modelos (Savonius, Darries, H-rotor, etc), donde dentro de sus ventajas se encuentra tolerar cambios de dirección del viento, operar a velocidades bajas (zonas urbanas) y no emitir niveles de ruido molesto para zonas donde las granjas eólicas horizontales causan un daño insostenible para la vida cotidiana de poblaciones rurales.

Savonius

Son los únicos impulsados exclusivamente por la fuerza de arrastre o drag. Siguiendo el principio de generar arrastre, su diseño desde los primeros prototipos se basaron en dividir un cilindro por su mitad y desplazarlos alrededor de un eje central de rotación, como se observa en la Figura 3.8. Como se indica en el esquema, las partes principales son el radio del rotor y el grado de desplazamiento (o superposición) de cada mitad de cilindro.

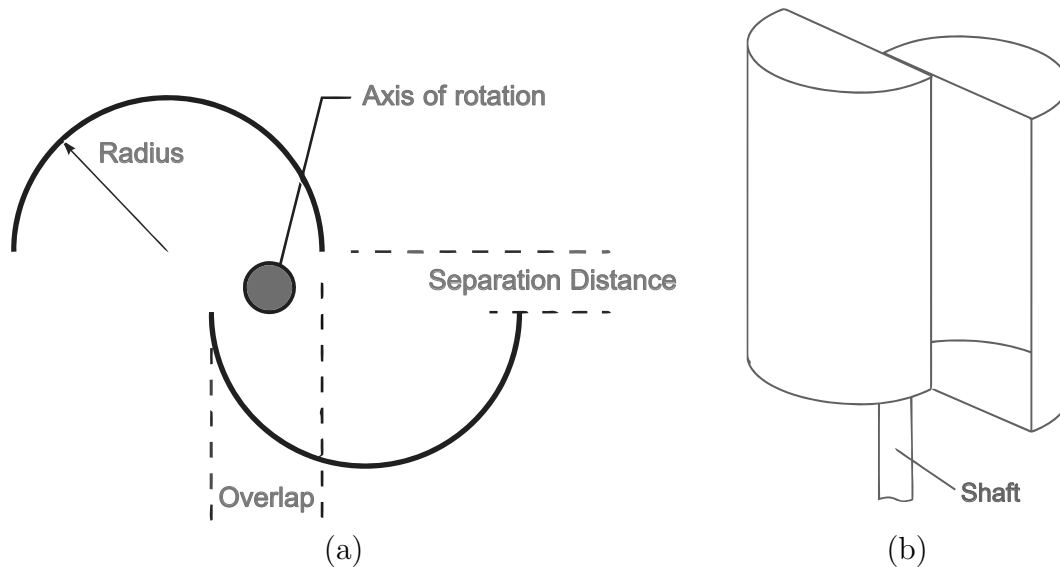


Figura 3.8: (a) Vista superior de aerogenerador Savonius.(b) Vista lateral de rotor Savonius [19]

Dentro de las ventajas que presenta Savonius en relación a HAWT, se resumen en [20]:

- Construcción simple y de bajo costo.
- No presenta problemas operacionales debido a cambio de dirección del viento.
- Baja emisión de ruido y velocidad angular.
- Poco desgaste en partes móviles.

- Diversas configuraciones de rotor.

La capacidad de generación de potencia, que se compara en términos del coeficiente de potencia (C_p), presenta un valor cercano al 15% que lo ubica muy por debajo a una turbina horizontal (HAWT), que está entre el 40% y 50 % [19]. Según lo anterior, Savonius no resulta ser competitiva con aerogeneradores de gran escala al compararse solo en términos potencia, pero tienen diversas aplicaciones ingenieriles y energéticas de pequeña escala que actualmente están siendo estudiadas e implementadas, ya que la omni-direccionalidad frente al flujo incidente, bajo costo de diseño y construcción la ubican como una tecnología polivalente para diversos campos de abastecimiento energético.

Dentro de las aplicaciones del aerogenerador, se destacan [21]:

- Zonas rurales: dispositivo útil para bombear agua con fines agrícolas.
- Zonas urbanas: su adaptación para ubicarse en lugares reducidos permite que se instale en tejado de edificios, abasteciendo de energía a sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC)
- Ventilador Flettner: dispositivo de refrigeración que a menudo se observa en los techos de furgonetas y autobuses.

En el rubro de las telecomunicaciones, últimamente estos aerogeneradores están tomando cierto protagonismo para abastecer las antenas de telefonía, ya que los requisitos energía típicos son de 1 a 3 (kW) para la electrónica de una torre moderna. Con el rápido avance de la tecnología celular, las torres de comunicación se están construyendo tanto en áreas urbanas como rurales donde la conectividad a la red no está disponible [19]. En el caso de no poseer acceso a una red fija de electricidad, las turbinas Savonius de pequeña escala pueden ser una opción viable para generar la energía necesaria, como se aprecia en la Figura 3.9.

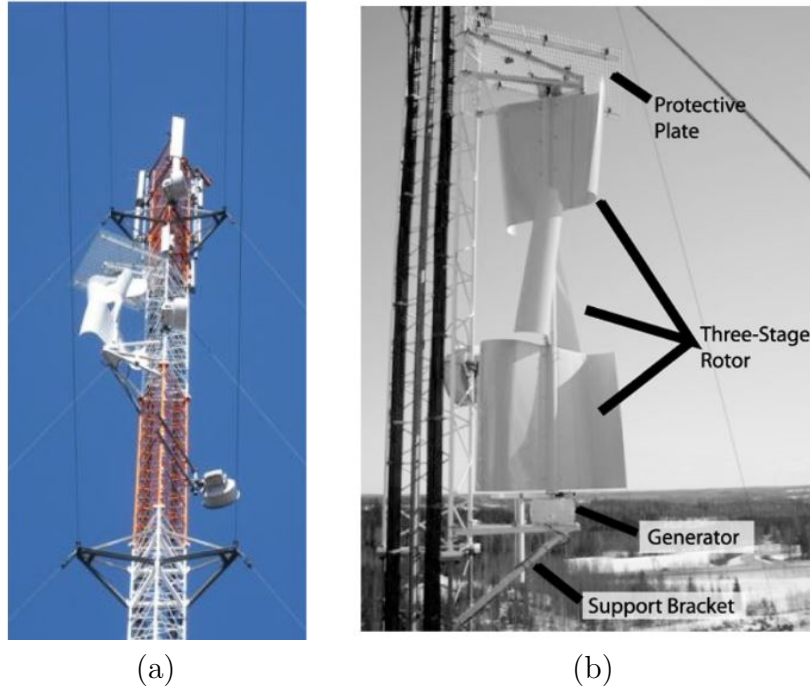


Figura 3.9: (a) Turbina Savonius abasteciendo a una torre de telefonía.(b) Detalle de aerogenerador Savonius [19]

Darrieus (convencional y H-rotor)

El diseño propuesto en 1925 por Darrieus consideraba un rotor con palas de forma curva que giraban en torno a un eje vertical como se observa en la Figura 3.10, que por lo general se construyen con dos o tres palas. La fuerza aerodinámica que constituye el movimiento en este diseño es el lift.



Figura 3.10: VAWT Darrieus, Heroldstatt (Alemania)[22]

Dentro de los aspectos negativos del diseño que consiguieron que se desplazara del mercado eléctrico en consecuencia, se destaca [14]:

- Complejo diseño y fabricación de palas curvas.
- Menor coeficiente de potencia (C_p).
- Incapacidad de arrancar de forma autónoma.
- No presenta control de producción de energía (no posee sistema de inclinación de palas).

Para evidenciar cuantitativamente la brecha de eficiencia de esta tecnología, se efectuaron mediciones del coeficiente de potencia entre la década de 1970 y 1990, tanto para prototipos Darrieus y sus pares HAWT de gran escala. Dichos estudios fueron transversalmente aceptados, ya que se construyeron turbinas de tamaños comparables a los HAWT, como se observa en la Figura 3.11.

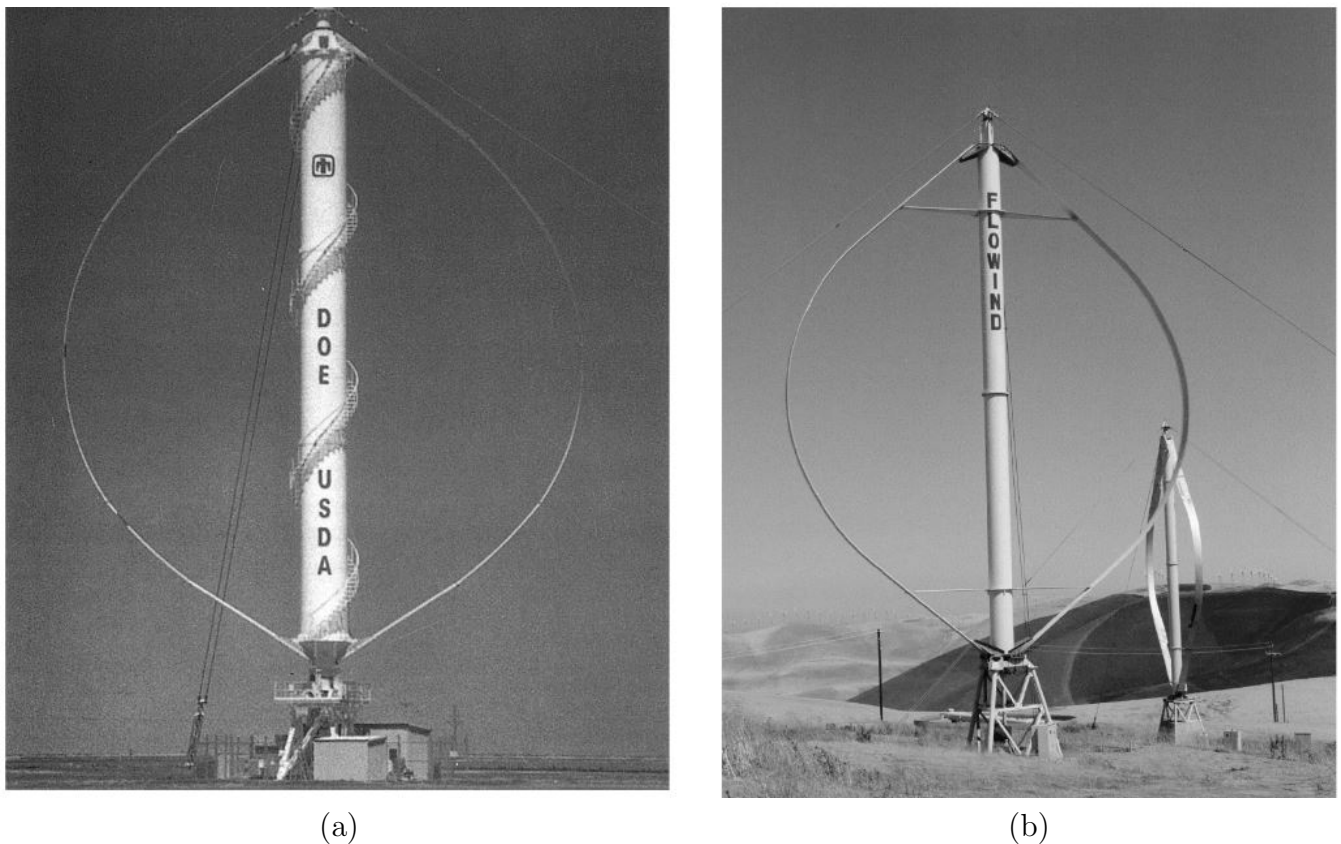


Figura 3.11: (a) Prototipo Darrieus de altura 50 m, 500kW (Sandia National Laboratories) [23]. (b) Darrieus de altura 19 m, 170 kW (American Flowind company) [14]

Una variación del rotor Darrieus es el llamado “H-rotor”. En lugar de palas curvas, se utilizan palas rectas conectadas al eje del rotor por tirantes. Dentro de las ventajas comparativas en relación

a un Darrieus convencional, es la posibilidad de diseñar una torre más alta proporcionando un mejor rendimiento y operación, ya que el rotor se sometería a un flujo de aire con menor intensidad turbulenta disminuyendo la carga de fatiga asociada. En términos de diseño, las palas rectas (que dan un área de barrido más grande y de forma cuadrada) son más simples y económicas de fabricar [24]. Las virtudes y facilidades de construcción de las torres permiten desarrollar proyectos en que la potencia nominal supere los 600 (kW), como se describe en la Figura 3.12.



Figura 3.12: Izquierda: H-rotor de 200 kW en Falkenberg. Centro: prototipo terrestre NENUPHAR de 600 kW. Derecha: Turbina Anew-B1 de 1.5 MW [24]

Los diseños H-rotor, en el contexto de gran escala, se les considera más costosos que los HAWT contemporáneos según los estudios del Departamento de energía del Reino Unido (DOE). En relación a los modelos VAWT, tomando en cuenta sus ventajas de diseño y fabricación, esta tecnología presenta un aumento sostenido de inversión y proyectos desde la década de 1990 como lo describe la Figura 3.13, ya que aún podrían tener un potencial de desarrollo. Uno de los puntos de investigación a destacar es la posibilidad de superar en tamaño a sus pares HAWTs, logrando estar a la vanguardia para escalas superiores a 20 (MW), que en la actualidad es poco probable de llevar a cabo [24].

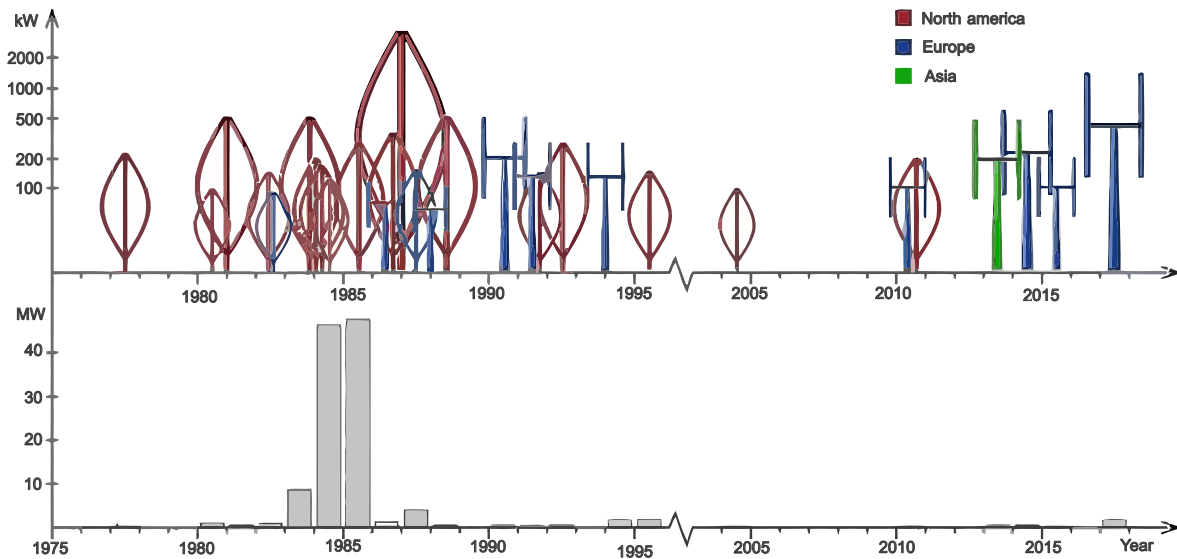


Figura 3.13: Línea de tiempo de VAWT sobre 100 kW. Superior: Modelos VAWT. Inferior: Capacidad instalada, incluyendo todos los VAWTs construidos en un solo año [24]

Turbinas de pequeña escala (urbanas)

La energía eólica de menor escala (small scale wind power) se destina principalmente para consumo habitacional, lo que se comprende en una magnitud de unidades de kW de potencia instalada. Un sistema de generación de dichas dimensiones, puede resultar ser una alternativa para consumidores que presenten dificultades para incorporarse al sistema interconectado de la región, o en casos extremos, zonas rurales donde no exista conexión a un sistema eléctrico.

Un tamaño promedio para una turbina de pequeña escala, independiente si es VAWT o HAWT, resulta inferior a 10 metros de altura, ya que dentro de su objetivo es ser una alternativa en zonas urbanas, instalándose sobre edificios, parques o grandes avenidas principalmente [22].

La aplicación en zonas residenciales tiene la capacidad de generar un porcentaje significativo del consumo eléctrico residencial, pero se debe tener en cuenta las siguientes situaciones:

- Sistema autónomo: es posible consumir la energía generada de forma directa, solo si el sistema presenta un almacenamiento de la energía (la generación de electricidad es variante durante el día).
- Conectado a red domiciliaria: es posible generar energía y venderla de forma directa a la red eléctrica regional, sin la necesidad de presentar sistema de almacenamiento.

La potencia generada por una turbina eólica, independiente de la tecnología que sea, estará directamente ligada a la magnitud de la velocidad del aire que presenta la zona del proyecto. La

estimación de la velocidad, por su comportamiento fluctuante, no es posible de asumir constante. Con el objetivo de representar dicha fluctuación de velocidad, se define la “intensidad turbulenta” (I_u). Este factor se calcula mediante el cociente entre el valor RMS de las fluctuaciones de velocidad (u') y su valor medio (U), como se describe en la Ecuación (3.3).

$$I_u = \frac{\sqrt{\overline{(u')^2}}}{U} = \frac{1}{U} \left[\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} (u')^2 dt \right]^{1/2} \quad (3.3)$$

T_s se entiende por el tiempo de muestreo del flujo de aire, que a su vez tiene que cumplir con ser lo suficientemente vasto para que resulte una intensidad turbulenta representativa del perfil del aire de entrada.

De forma general, la intensidad turbulenta depende de las características del terreno, que se clasifican como predios lisos a los de menor intensidad turbulenta cercanos a 10%, y su contraparte, los rugosos que alcanzan el 20%. Como factor de diseño, la altura de la torre afecta en la intensidad de turbulencia que va a experimentar el aspa, donde si se aumenta su altura, disminuye la intensidad turbulenta [25]. Esto se observa directamente con la estimación de la velocidad media del aire incidente en función de la altura ($U(z)$), como se aprecia en la Ecuación (3.4).

$$U(z) = U(h_r) \left(\frac{z}{h_r} \right)^m \quad (3.4)$$

Siendo h_r la altura de referencia (usualmente 10 m), z es la altura de la turbina y m una exponente que depende de la rugosidad del terreno, la cual es posible de estimar según la Ecuación (3.5).

$$m = 0.096 \log_{10}(z_0) + 0.016(\log_{10}(z_0))^2 + 0.24 \quad (3.5)$$

Donde z_0 es el “roughness length”, que representa la incidencia de la rugosidad de superficie en la estimación de I_u . La magnitud de m es mínima para zonas más lisas (océano), hasta alcanzar los máximos para zonas urbanas (rugosas). La Tabla 3.1 ejemplifica el aumento del coeficiente m en las posibles locaciones que regularmente se proponen proyectos eólicos.

El aire en zonas urbanas, se puede entender como altamente fluctuante debido a la irrupción de diversos edificios, parques o zonas residenciales, que en términos generales, se les clasifica como zonas con un alto valor de z_0 (rugosas). Esto en términos de velocidad, por lo general, se traducirá en perfiles de menor magnitud, además de forzar ángulos de ataque adversos (α) que son propensos a generar pérdidas por arrastre (drag). Los valores representativos para zonas urbanas, se resumen según [9]:

- Velocidad media: $U \sim 9$ m/s.
- Intensidad turbulenta: $I_u > 10$ %

Tabla 3.1: Variación de z_0 y m según el terreno [25]

Terreno	z_0 , mm	m
Océano abierto	0.200	0.104
Nieve	3	0.100
Pasto	10	0.112
Plantaciones	50	0.131
Arboles dispersos	100	0.160
Muchos arboles	250	0.188
Bosque	500	0.213
Suburbios	1500	0.257
Centro de ciudades	3000	0.289

Las fluctuaciones de velocidad, comúnmente conocidas como ráfagas (gusts), presentan una distribución de energía disponible del recurso eólico en términos de frecuencias, como lo indica la Figura 3.14.

Poseer un gran valor medio de velocidad es fundamental para obtener una mayor colección de energía, sin embargo, existe una porción de energía disponible de las ráfagas que comúnmente no se considera al momento de diseñar un rotor. Micro meteorología es la escala que presenta dicho pico adicional de energía, donde al manifestarse en altas frecuencias, los rotores no son capaces por si mismos de reaccionar a su fluctuación de velocidad. El origen de esta escala se relaciona por la interacción del flujo con edificios ó estructuras en entornos urbanos, que se manifiesta alrededor de los 0.1 (Hz). Su magnitud está influenciado tanto por el tamaño y la forma de las estructuras urbanas, y el rango de frecuencias de sus fluctuaciones, varia según los diferentes sitios (Tabla 3.1). Existe la posibilidad de extraer una porción de esta energía, pero añadiendo un sistema de controles avanzados a las turbinas. Los sistemas de monitoreo se les reconoce como un punto de investigación importante para aumentar la potencia extraída del medio urbano, aportando en el rendimiento general de los aerogeneradores [26]. Dentro de los rangos de frecuencia que tienen los sistemas de control de las turbinas que modifican su operación en funciona del viento, se encuentran entre 0.5 y 0.1 (Hz), posicionandolas dentro de la sección de micro escala de la distribución del espectro de energía en términos de su operación.

Es de interés transversal que los sistemas de seguimiento de ráfagas posean la capacidad de coleccionar la potencia ubicada en las frecuencias altas del viento. Sin embargo, actualmente los costo de su implementación frenan su inserción en el diseño de turbinas, como también en las arquitecturas de control para operar en el rango de frecuencias analizado [11].

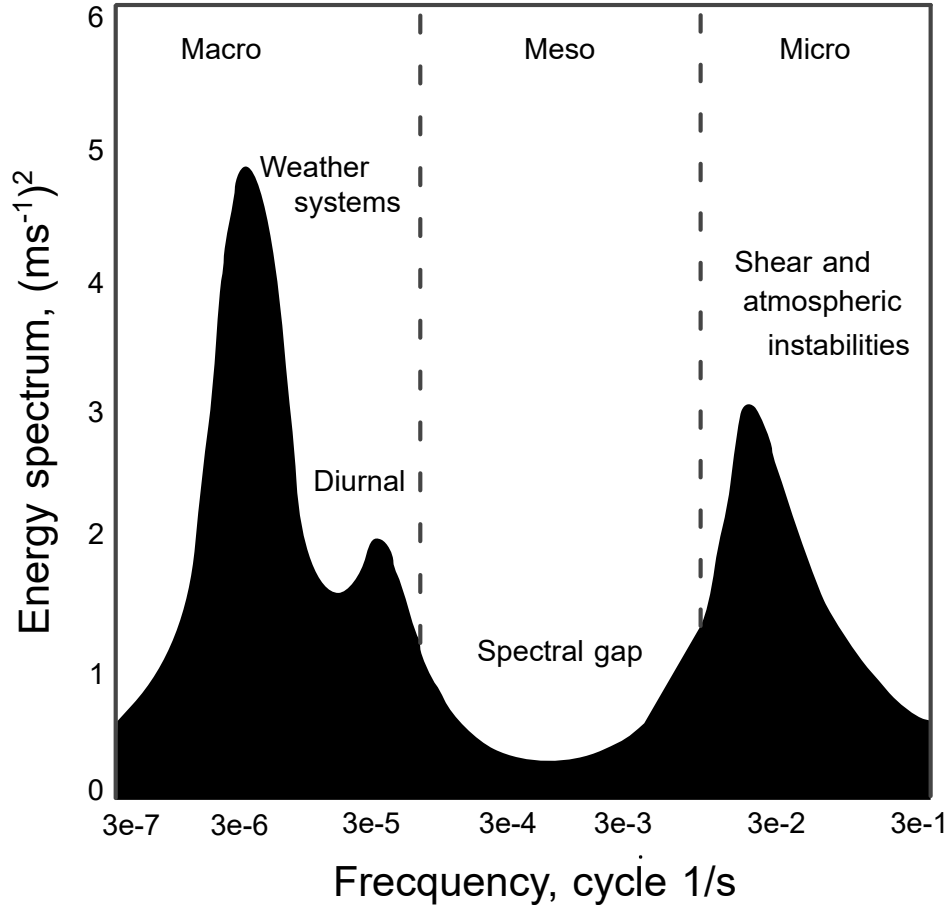


Figura 3.14: Distribución de frecuencia de la energía eólica fluctuante dentro de la subcapa interna [11]

Los aerogeneradores HAWT son la tecnología hegemónica del mercado eólico, donde representan sobre el 90%. Con respecto a su aplicación, son de gran tamaño (de 60 a 90 m de altura) y su instalación se debe realizar en granjas eólicas, que son predios ubicados a una distancia considerable de zonas urbanas. Dentro de los retos que ha tenido la optimización de la potencia convertida por esta tecnología, es disminuir la interferencia de estelas (wake interference) entre turbinas, donde cada una debe estar lo suficientemente espaciadas para lograr una condición de aislación y no verse afectada por las estelas generadas por la turbina contigua. Como consecuencia, los HAWT requieren áreas de instalación considerable, ubicándose en zonas alejadas de ciudades o poblaciones rurales. Los diseños de escala urbana, como el que se muestra en la Figura 3.16.a, poseen un mayor coeficiente de potencia nominal (C_P) que su contraparte VAWT, pero la operación se ve afectada por las condiciones del viento en sitios urbanos, caracterizados por tener una mayor intensidad turbulenta que en zonas rurales y un evidente cambio de dirección del viento durante el día [27]. Los aerogeneradores verticales (VAWT) son actualmente líderes en aplicaciones eólicas a pequeña escala. Su ventaja en el mercado proviene de su independencia en torno a la dirección del viento,

como también su adaptación a lugares reducidos debido a que se puede aumentar el área de barrido mediante la altura de su pala [26]. Dentro de los puntos que posiciona dicha tecnología, está que su generador y sistema mecánico de transmisión se encuentran a la altura del suelo, lo que facilita su mantenimiento. El ruido se considera una de las desventajas principales de los aerogeneradores, donde los niveles de ruido en viviendas y otras áreas sensibles están regulados por la legislación nacional restringiendo las ubicaciones potenciales para los aerogeneradores. Por ejemplo, en Suecia, las recomendaciones para el ruido de los aerogeneradores son establecidas por la Agencia Sueca de Protección Ambiental (SEPA), fijando un límite de 40 dBA en viviendas y 35 dBA en áreas específicamente sensibles, como parques naturales y áreas recreativas planificadas. Estos límites se basan en la intensidad del sonido con respecto a una velocidad del viento de 8 m/s, 10 m sobre el suelo y medida durante 4 horas [28].

La propagación del ruido depende de diversos factores, como se observa en la Figura 3.15, pero se destaca que las VAWT tienen cierta ventaja en relación al ruido emitido. Las variables que fundamentan la afirmación anterior se resumen según [15]:

- Ruido aerodinámico: aumenta proporcionalmente con la velocidad del aspa de la turbina (blade tip speed). Una turbina VAWT suele tener una velocidad cercana a la mitad de su par HAWT, por lo tanto, producirá menos ruido aerodinámico.
- Ruido mecánico: las turbinas verticales tienen los componentes del tren de transmisión a nivel del suelo, por lo que dicho ruido no se propagará tan fácilmente a las zonas aledañas.

Con el objetivo de dilucidar una magnitud representativa del ruido emitido por una turbina HAWT, un estudio de nivel de ruido realizado a una turbina Enercon E-40 (250kW, HAWT), considerando una velocidad del viento de 12 m/s, concluyó que se emiten aproximadamente 104 dB(A). Si la velocidad del viento disminuye (según los puntos anteriores), los niveles generados tanto por la turbina y el ruido de fondo del viento se reducen a 96 dB(A) y 36 dB(A), respectivamente. Debido entonces a que el ruido ambiente y el generador dependen de la velocidad del viento, es posible estimar una distancia donde un oyente en relación a la torre eólica logre percibir que el ruido emitido por el aerogenerador sea imperceptible en relación al ambiente. Según el ejemplo anterior, considerando una velocidad de viento de 12 (m/s), la distancia que cumple dicha condición debe ser superior a 100 (m) [29].

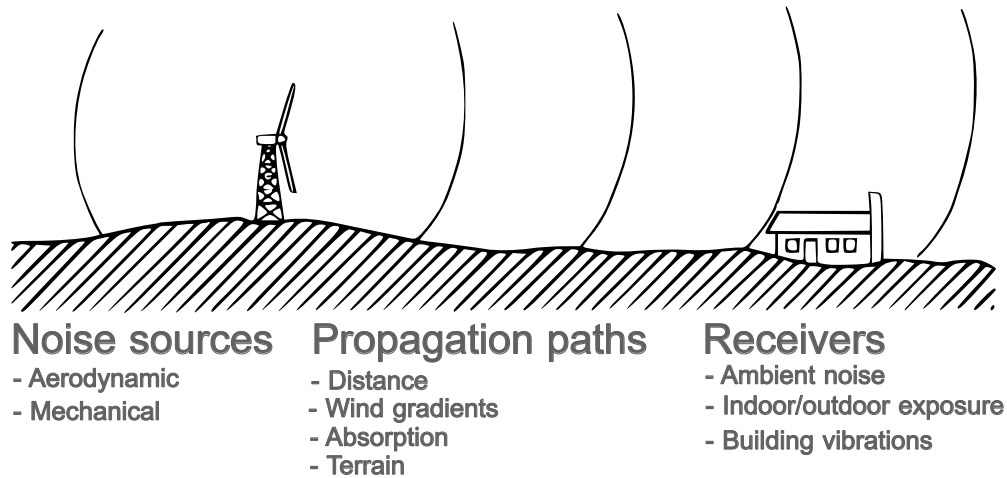


Figura 3.15: Factores que afectan la propagación del ruido [16]

Los espacios en las urbes son reducidos si se comparan a los rurales. VAWT posee la característica de requerir un menor terreno para su instalación, ya que puede aumentar su área de barrido (swept area) simplemente aumentando su altura, pero principalmente se destaca por no verse afectado por el “wake interference”, lo que conlleva una menor distancia de instalación entre cada turbina [15]. Un ejemplo de lo anterior es la Figura 3.16.b, la cual describe una serie de turbinas eólicas de 5 (kW) sobre un edificio.



(a)



(b)

Figura 3.16: (a) HAWT de pequeña escala, Bergey Wind Co. (b) VAWT de pequeña escala, Lincoln Financial Field [22]

La elección del tipo de turbina, por lo tanto, no solo depende si presenta un coeficiente de

potencia máximo ($C_{P_{max}}$) superior a su competencia, sino es indispensable analizar el espacio de instalación disponible, como también el comportamiento del flujo de aire urbano para lograr una mayor captación de energía. Debido a esto, se destacan las principales diferencias entre tecnologías en un contexto de pequeña escala según la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Resumen de las diferencias relevantes entre turbinas de baja escala [15]

Característica	H-rotor	Darrieus	HAWT
Perfil de aspa	Simple	Complicado	Complicado
Yaw mechanism	No	No	Si
Pitch mechanism	Si	No	Si
Torre	Si	No	Si
Ruido	Bajo	Moderado	Alto
Blade area	Moderado	Alto	Pequeño
Posición del generador	En el suelo	En el suelo	En altura
Blade load	Moderado	Bajo	Alto
Arranque autonomo	No	No	Si
Tower intereference	Pequeño	Pequeño	Alto
Estructura general	Simple	Simple	Complicado

El efecto de la turbulencia en la operación en la tecnología VAWT, actualmente presentan conclusiones contradictorias. En base a estudios experimentales, se destaca:

- Turbulencia como agente negativo: el estudio llevado a cabo por Luisa C. Pagnini, Massimiliano Burlando y Maria Repetto [30], se destaca de forma transversal por autores relacionados con aerogeneradores urbanos, ya que fueron capaces de evaluar el desempeño de potencia generada para 2 turbinas comerciales de pequeño tamaño (HAWT y VAWT) con potencia nominal de 20 (kW) en un área urbana (puerto de Savona, Genova), como se observa en la Figura 3.17. Dentro de sus resultados destacan que HAWT tuvo una mayor producción de energía durante el periodo de estudio, pero considerables pérdidas y problemas de operación por la dirección y fluctuación del flujo de aire urbano.



Figura 3.17: Aerogeneradores HAWT (derecha) y VAWT (izquierda) [30]

Con respecto a la incidencia de la turbulencia en la operación, concluyeron que no es positivo instalar aerogeneradores en áreas donde existe un alto índice de turbulencia del aire, ya que las curvas de potencia obtenidas distan del rendimiento esperable por diseño de dicha tecnología, pero no se concluye como el principal factor de pérdidas.

- Turbulencia como agente positivo: la investigación desarrollada por Erik Möllerström, Fredric Ottermo y Anders Goude [31], se considera representativa ya que realizaron una medición durante 14 meses de la potencia generada por un aerogenerador VAWT H-rotor de 200 (kW) en una zona rural, como se aprecia en la Figura 3.18.



Figura 3.18: Turbina H-rotor T1. Throsholm, Suecia [31]

La influencia de la intensidad turbulenta en el rendimiento no es predominante si se compara al tip speed ratio (TSR ó λ), pero de todas formas se observa un aumento ligero de la potencia

generada a medida que aumenta la turbulencia (cuantificada como intensidad turbulenta, I_u). Dentro de las explicaciones teóricas de la relación entre la potencia y velocidad, se resume en que existe una variación cúbica de la potencia con la velocidad del viento, Ecuación (3.9), que se traduce en términos del coeficiente de potencia (C_p) como lo indican los resultados en la Figura 3.19. Entendiendo que existen diversos factores que afectan la potencia capturada por el convertidor eólico, los resultados indican de forma homologa al caso anterior, una ventaja en la extracción de energía en sitios turbulentos para VAWT en comparación con los HAWT.

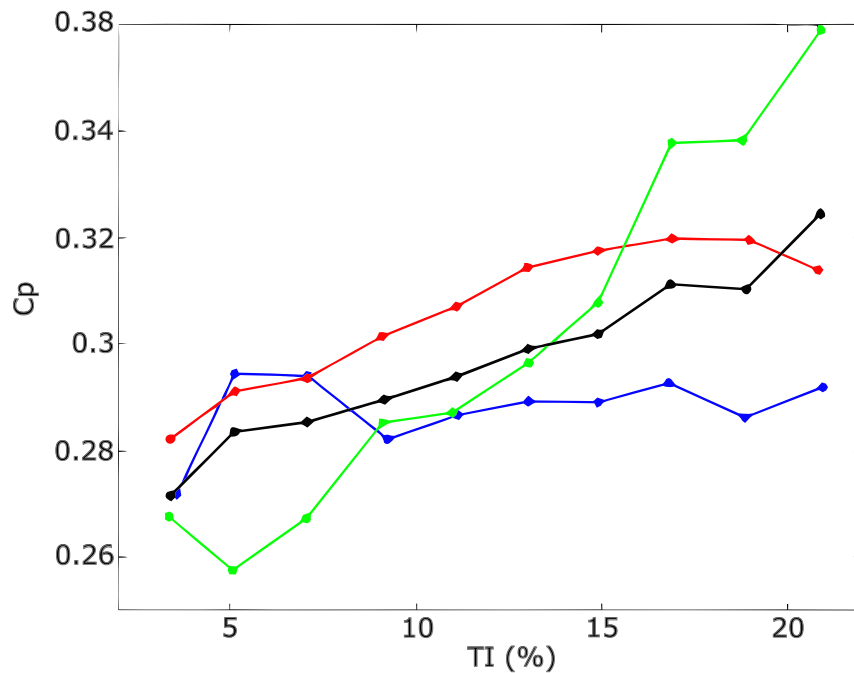


Figura 3.19: Influencia de I_u en coeficiente de potencia para diversos valores de tip speed ratio (λ) [31]

3.1.4 Principios físicos de la energía eólica

El estudio de la conversión de energía mecánica desde el viento al rotor eólico, fue descrita por primera vez en 1920 por el científico Albert Betz, mediante los postulados de la “Betz momentum theory”. Actualmente es conocida por ser una aproximación (modelo ideal de convertidor de energía), ya que no presenta pérdidas de fricción con el aire, como tampoco modela la relación entre la rotación de las aspas de la turbina eólica y el comportamiento del flujo de aire aguas abajo del rotor en cuestión. A pesar de sus limitaciones en la práctica, dicha ley establece los límites teóricos de extracción de potencia mecánica de un rotor con respecto al aire de ingreso (límite de Betz), otorgando un parámetro crucial en el estudio de la potencia mecánica para un convertidor

de energía, sea cual sea su configuración geométrica (HAWT o VAWT).

Ley de Betz

Se describe en primer lugar la energía cinética neta del flujo de aire de ingreso (E), que tiene una velocidad media (v) y una masa (m), mediante la Ecuación (3.6).

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.6)$$

Considerando un área seccional (A) mediante la cual se desplaza el aire, es posible expresar su caudal volumétrico (\dot{V}) según la Ecuación (3.7).

$$\dot{V} = vA \quad (3.7)$$

De igual manera, el flujo másico (\dot{m}) se determina considerando la densidad (ρ) del aire, calculado finalmente gracias a la Ecuación (3.8).

$$\dot{m} = \rho vA \quad (3.8)$$

Expresando la energía cinética del flujo de aire en términos de flujo másico, quien fluye a través del área transversal (A), la potencia inherente al flujo se calcula según la Ecuación (3.9).

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (3.9)$$

Conociendo la potencia inherente al flujo de aire, Betz mediante un convertidor de energía mecánica (turbina eólica) geoméricamente descrito como un disco perpendicular al flujo de aire, además de asumir una densidad constante para el fluido, describe gráficamente el comportamiento del flujo de aire en términos de velocidad, como se representa en la Figura 3.20.

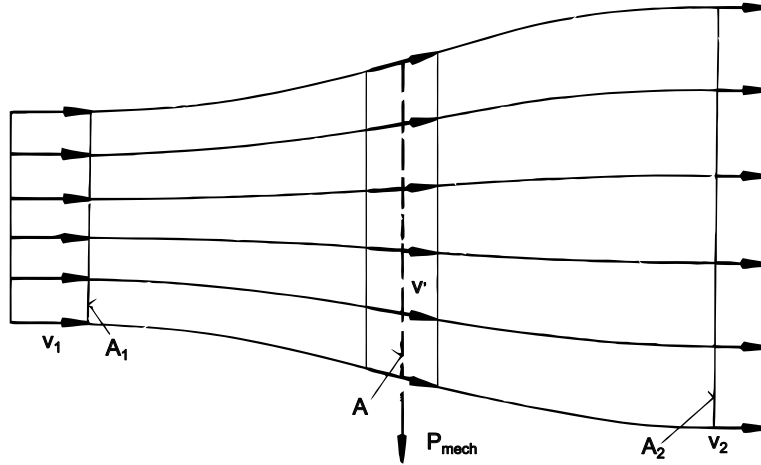


Figura 3.20: Comportamiento de flujo de aire según ley de Betz [14]

Del esquema anterior, se interpreta la sección de entrada con la nomenclatura de su velocidad y área correspondiente como v_1 y A_1 , el convertidor de energía v' y A , y finalmente, la salida del sistema con v_2 y A_2 .

La energía mecánica que la turbina eólica extrae del flujo (P_{mech}), se obtiene mediante la diferencia entre la potencia del flujo de entrada y la salida, tal como la Ecuación (3.10).

$$P_{mech} = \frac{1}{2}\rho(A_1v_1^3 - A_2v_2^3) \quad (3.10)$$

Es posible, utilizando la ecuación de continuidad, expresar dicha potencia en términos de flujo másico, resultando la Ecuación (3.11).

$$P_{mech} = \frac{1}{2}\dot{m}(v_1^2 - v_2^2) \quad (3.11)$$

Al analizar la Ecuación (3.11), se buscaría obtener la mayor magnitud de potencia extraída (P_{mech}), concluyéndose que la velocidad de salida (v_2) debiese ser nula. Si se cumple lo anterior, significa que no existe flujo de aire, y por continuidad, no existe flujo de entrada lo que es imposible físicamente. Queda como consecuencia una posible relación del cociente entre v_1 y v_2 para obtener la potencia extraída máxima. Utilizando la “conservación de momento” para expresar la energía extraída por el convertidor, para posteriormente aplicar la tercera ley de Newton “acción y reacción”, es posible obtener la relación entre variables de entrada y salida con respecto a la velocidad del convertidor de energía (v) y la fuerza aplicada por el aire sobre el convertidor (F), expresándose en la Ecuación (3.12).

$$P_{mech} = Fv' = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \quad (3.12)$$

Igualando las ecuaciones (3.11) y (3.12), es posible obtener la velocidad del plano del convertidor (v'), resultando la Ecuación (3.13).

$$v' = \frac{1}{2}(v_1 - v_2) \quad (3.13)$$

Lo anterior permite expresar el flujo másico de aire en términos de (v'), obteniéndose una expresión para la potencia de extracción (P_{mech}), como lo indica la Ecuación (3.14).

$$P_{mech} = \frac{1}{4}(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)\rho A \quad (3.14)$$

Considerando la potencia del aire de entrada (P_0), mediante la Ecuación (3.15).

$$P_0 = \frac{1}{2}\rho Av_1^3 \quad (3.15)$$

Es posible establecer un cociente entre la potencia extraída por el rotor (P_{mech}) y la de ingreso (P_0), conocido ampliamente como el “coeficiente de potencia” (C_p), expresado por la Ecuación (3.16).

$$C_P = \frac{P_{mech}}{P_0} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \right] \quad (3.16)$$

Dicho cociente brinda la cantidad de potencia que es posible extraer según el flujo de ingreso y el convertidor que se está utilizando. Debido a que Betz describe un modelo teórico, si se considera un estudio de diferentes valores de velocidad de ingreso y salida en dicha ecuación, se logra evidenciar un valor máximo llamado “límite de Betz”.

Dicho límite se logra numéricamente si se tiene un cociente entre v_2/v_1 de 1/3. Si se reemplaza dicho valor en la Ecuación (3.16), se obtiene el valor exacto de 0.593. El comportamiento de la curva de C_p de la Ecuación (3.16), se representa según la Figura 3.21.

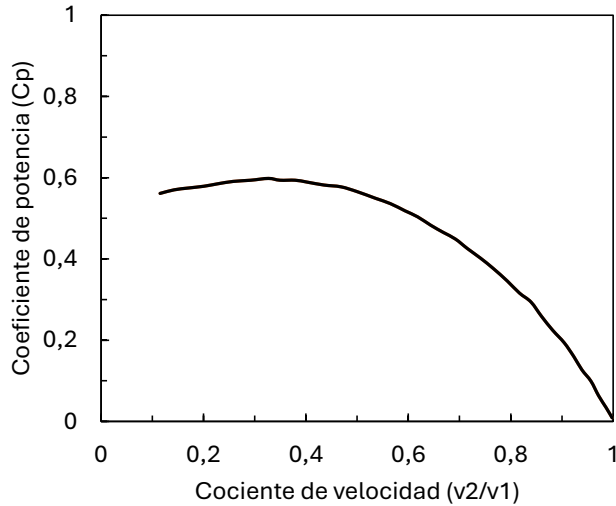


Figura 3.21: Valores de coeficiente de potencia según cociente de velocidad [14]

La relevancia del límite de Betz se evidencia en que no es posible diseñar un modelo de rotor capaz de superar el 60% de extracción de potencia del flujo de aire, ya que el modelo de Betz, además de no presentar pérdidas, geoméricamente su convertidor de energía es un disco, lo que no contempla la interacción de las palas con el flujo colindante a sus puntas, que si se consideraron para modelos más avanzados como el “Blade element theory”.

Fuerzas aerodinámicas

El estudio mediante la ley de Betz permite obtener un límite teórico en torno a la extracción de potencia mecánica del flujos de aire de ingreso con respecto a la turbina eólica. En la práctica, la extracción de energía que lleva a cabo el convertidor de energía depende de las características del rotor, que en términos físicos se relaciona con las “fuerzas aerodinámicas” (Figura 3.22). Todo cuerpo que está expuesto a un flujo de aire experimenta las fuerzas aerodinámicas, que se conforman por [14]:

- Fuerza de arrastre (drag): Componente de la fuerza aerodinámica que tiene la misma dirección que el flujo incidente al cuerpo.
- Fuerza de sustentación (lift): Fuerza perpendicular a la dirección del flujo.

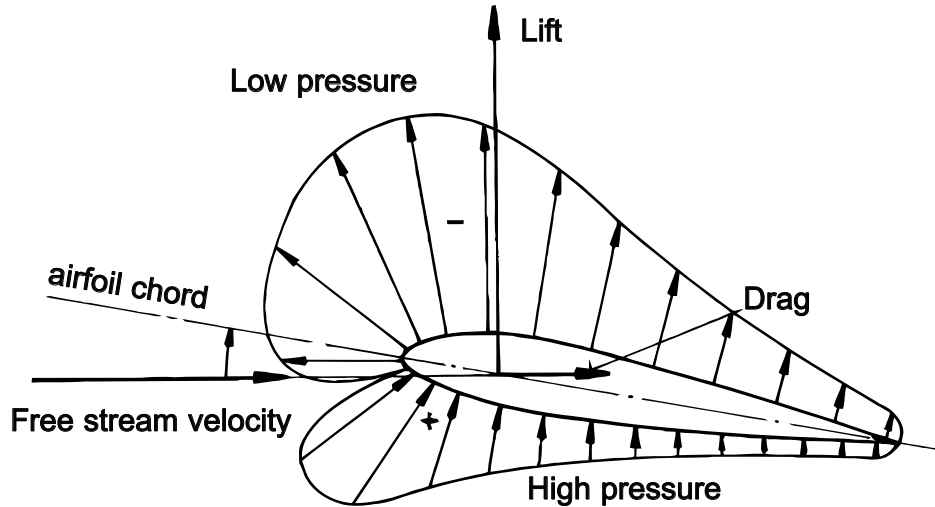


Figura 3.22: Fuerzas aerodinámicas incidentes en un cuerpo expuesto a un flujo [14]

Fuerza de arrastre (drag)

Las fuerzas aerodinámicas se definen como agentes impulsores de movimiento para todos los cuerpos, donde su geometría específicamente favorece que sean trasladados (o rotados) por una componente (drag o lift) de dicha fuerza que se manifiesta frente a la exposición de un flujo de aire sobre su superficie.

Al analizar un barco a vela o un velero, la fuerza de arrastre (drag) que experimenta sobre su superficie ocasionará una velocidad de traslación o desplazamiento del cuerpo. El drag (D), resulta desde la diferencia de velocidad entre el viento incidente (U) y el movimiento (v) del cuerpo de dimensión transversal (c), como se observa en la Figura 3.23 [14].

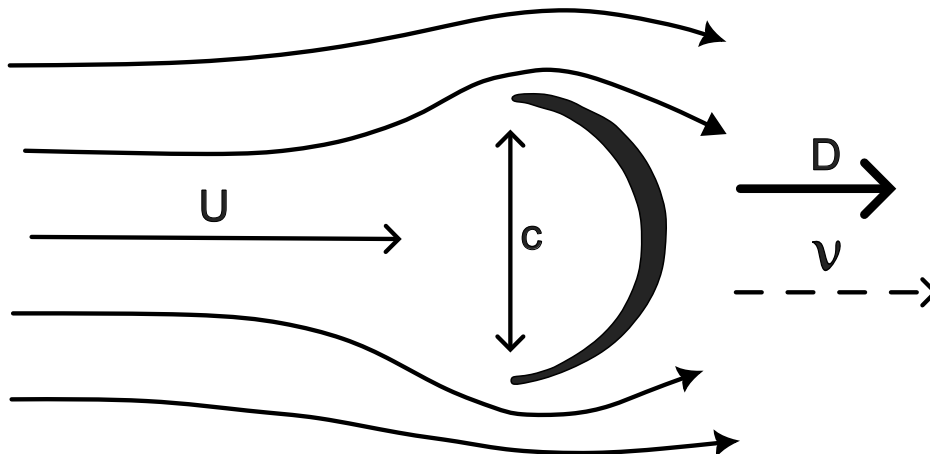


Figura 3.23: Cuerpo trasladado por arrastre (drag) [16]

Sea un cuerpo con superficie (A) que es expuesto a un flujo de aire de velocidad (U), la potencia que captura (P) del flujo de aire dicho sólido se puede determinar mediante la fuerza de arrastre y

la velocidad de traslación resultante (ν), como se aprecia en la Ecuación (3.17).

$$P = D\nu \quad (3.17)$$

Para calcular la fuerza de arrastre, se debe conocer la velocidad que realmente incide sobre el área expuesta al flujo, que resulta ser la diferencia entre U y ν . Definiendo un coeficiente de arrastre (C_D), la fuerza de arrastre se determina según la Ecuación (3.18).

$$D = C_D \frac{\rho}{2} (U - \nu)^2 A \quad (3.18)$$

Reemplazando la Ecuación (3.18) en (3.17), se expresa la potencia obtenida del flujo de aire incidente cómo la Ecuación (3.19).

$$P = C_D \frac{\rho}{2} (U - \nu)^2 A \nu \quad (3.19)$$

Fuerza de sustentación (lift)

Para analizar las fuerzas aerodinámicas que experimenta un rotor eólico, ya sea VAWT o HAWT representados en una sección transversal de su aspa en la Figura 3.24, se estudia primero el caso en que es un cuerpo que presenta un movimiento de traslación, donde el vector de velocidad relativo a la traslación (v_r) del cuerpo, es el resultado de la suma de la velocidad del aire de entrada (U) con la velocidad del viento debido a la traslación del cuerpo (ν). Al realizar la suma vectorial, se originará el ángulo de ataque (α), que se comprende como el ángulo que tiene la velocidad relativa con respecto al chord (cuerda) del airfoil.

Al presentar dicha inclinación del cuerpo con respecto a la velocidad relativa, es posible observar la componente de lift (L) y drag (D), que es perpendicular y paralela a la velocidad del viento relativo (v_r), respectivamente.

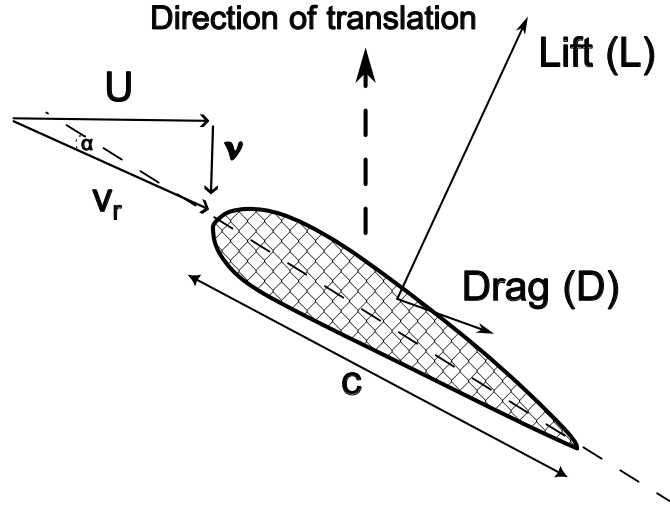


Figura 3.24: Airfoil expuesto a fuerzas aerodinámicas de arrastre y sustentación [16]

Es posible calcular dichas fuerzas aerodinámicas en término de su velocidad relativa (v_r) y el chord del airfoil (c), según las ecuaciones (3.20) y (3.21).

$$L = 0.5\rho v_r^2 C_L c \quad (3.20)$$

$$D = 0.5\rho v_r^2 C_D c \quad (3.21)$$

La potencia que extrae del flujo principal (P), considerando al airfoil como un cuerpo libre con un área proyectada (A_p), se concluye con la Ecuación (3.22) [16].

$$P = 0.5\rho U^3 A_p \frac{v}{U} \left(C_L - C_D \frac{v}{U} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{v}{U} \right)^2} \quad (3.22)$$

Si se sitúa en el caso de un rotor VAWT, en vez de producir un movimiento por traslación se debe analizar su rotación (ω). En el análisis se considera la perspectiva del flujo de aire incidente a la pala, donde la velocidad resultante del aire (v_r), es la suma vectorial de la velocidad del flujo de viento (v_w) con la velocidad del viento producto de la rotación del aspa ($U = -r \cdot \omega$), como se aprecia en la Figura 3.25.

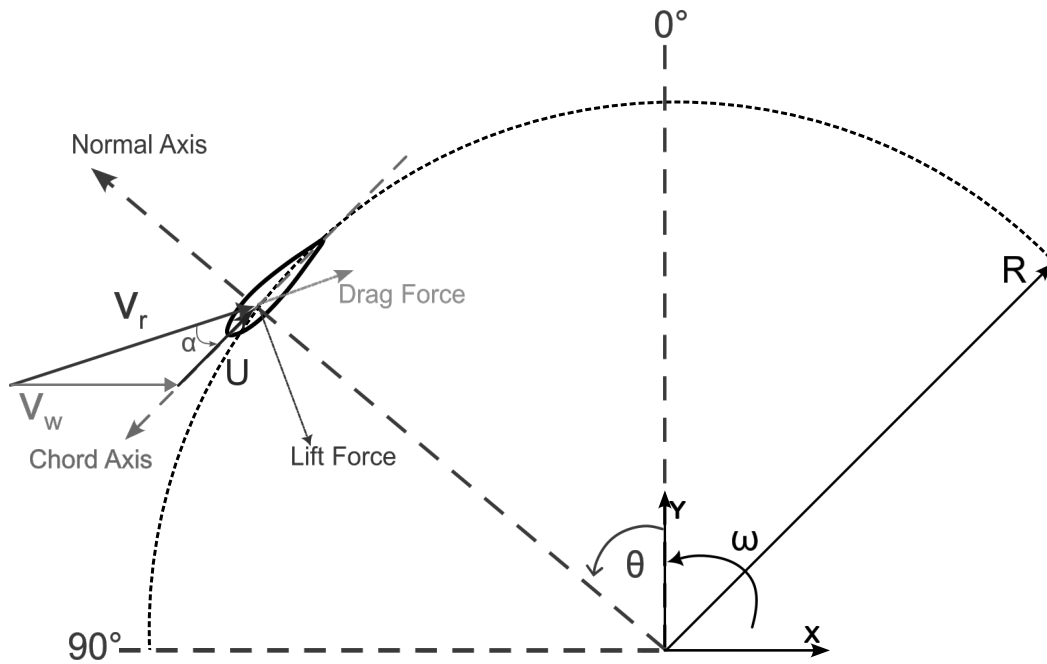


Figura 3.25: Esquema vectorial de fuerzas aerodinámicas sobre airfoil de rotor VAWT

Dentro de las fuerzas relevantes para comprender la rotación del aspa, se debe analizar la fuerza de sustentación (que es la principal para este tipo de turbinas), que a su vez, se descompone en la fuerza de lift que está en el plano de rotación del rotor (L_{torque}), responsable de la rotación del eje de la turbina, como también la componente de lift (L_{thrust}) que es paralela a la dirección de la velocidad del viento (v_w) que desarrolla el thrust (empuje) experimentado por la estructura del rotor.

De forma cualitativa, los diseños de los airfoils aplicables para rotores de sustentación alcanzan cocientes de L/D cercano a 200:1, ya que se ha demostrado experimentalmente que desarrollan un mayor desempeño si se disminuye el drag neto, pero se requiere un análisis cuantitativo del coeficiente de potencia (C_P) alcanzable para este tipo de rotores en un contexto de rotación (no traslación, como es el caso de la Ecuación (3.22)), no es posible determinarlo sólo con ayuda de relaciones físicas elementales, por lo que se necesitan modelos que consideren la geometría del convertidor como factor relevante al momento de evaluar un desempeño en la captura de potencia del viento [14].

Blade element theory

Del modelo de Betz, que presenta relaciones de potencia ideales y límites de C_P , hasta modelos teóricos avanzados conocidos como “vortex theory”, existe un modelo intermedio llamado “Blade element theory”. Esta teoría estima de forma general una aproximación del comportamiento del rotor en función de su geometría.

Si se modela un rotor, este generará un movimiento de rotación en el aire colindante a sus palas, por lo que el aire aguas abajo de su eje, conocido como estela (wake), se debe considerar para el cálculo de la potencia disponible. Al momento de analizar el momento angular, este al ser conservativo, debe resultar que la estela rote en sentido contrario al giro del rotor, como se observa en la Figura 3.26. La energía empleada en dicho giro reduce la cantidad de energía disponible del flujo de aire (descomposición vectorial de la velocidad), lo que se traduce en una menor capacidad de extracción de potencia mecánica por el convertidor que finalmente explica un menor coeficiente de potencia en comparación al calculado por Betz (límite de Betz) [14].

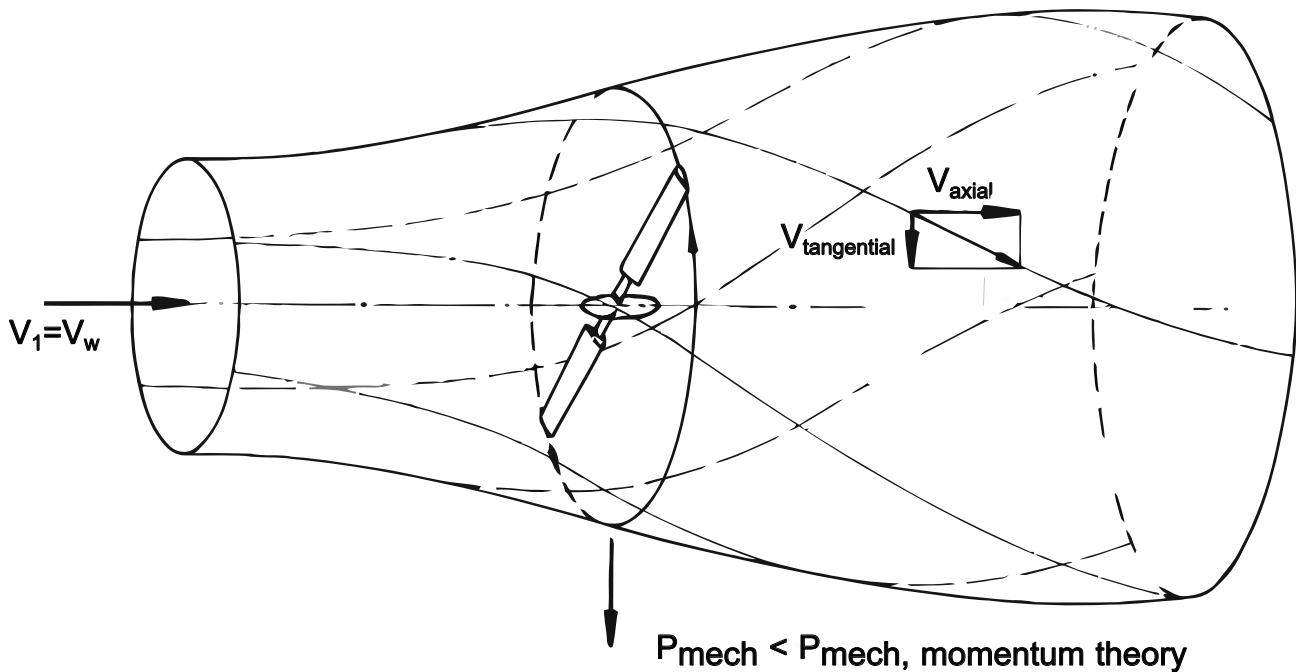


Figura 3.26: Esquema de teoría de momento considerando la rotación de estela [14]

El coeficiente de potencia (C_P), resulta entonces dependiente de la geometría, que se considera mediante el cociente de la velocidad tangencial del rotor (que contiene su radio y velocidad angular) con respecto a la velocidad del aire que incide en el dominio de estudio (v), expresado en la Ecuación (3.2).

El hecho que el coeficiente de potencia $C_P(\lambda)$ esté en función de la geometría, conlleva a que existan

estudios en torno al diseño del rotor (Betz no lo permite), obteniéndose curvas como la Figura 3.27, que puede considerar diversos tipos de turbinas eólicas y TSR (λ).

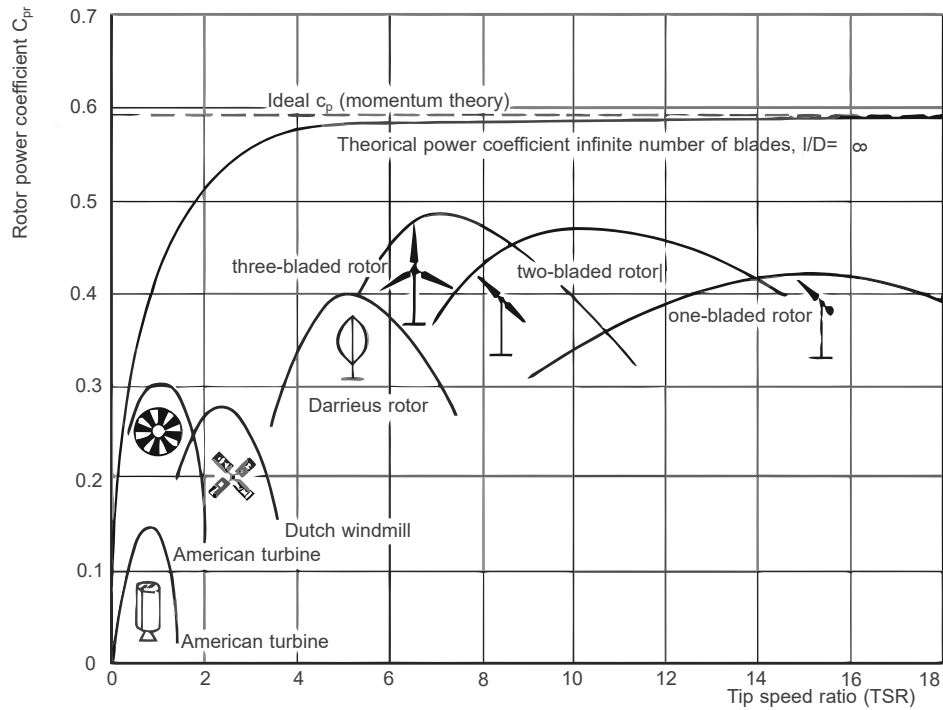


Figura 3.27: Coeficiente de potencia para diferentes diseños de rotor [14]

De forma general, el modelo para calcular las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el airfoil discretiza en franjas (tiras o strips) una sección del fluido con respecto a una distancia r del centro del rotor, como se observa en el esquema de la Figura 3.28.

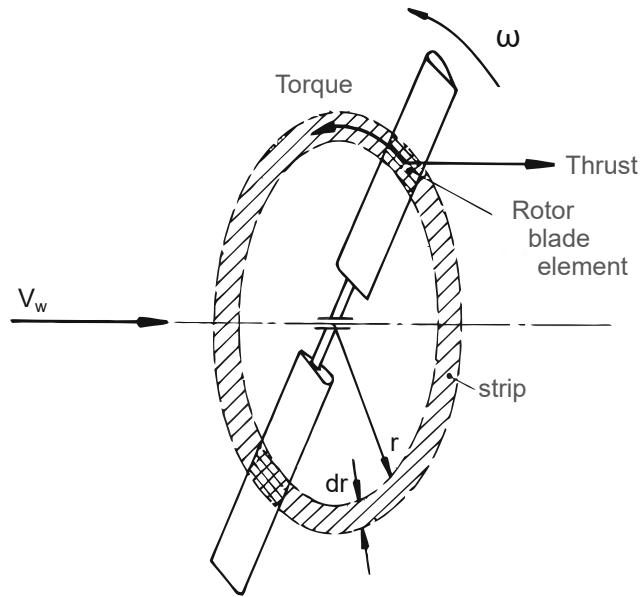


Figura 3.28: Modelo de tiras o blade element theory [14]

Realizando un análisis local del airfoil según la Figura 3.29, en primer lugar se debe comprender los ángulos que se forman con la geometría. El chord del airfoil para un radio r (en referencia al centro del rotor), establece el valor local del “pitch angle” (ϑ) con respecto al plano del rotor, que es un componente geométrico, al contrario de el ángulo de ataque (α).

La velocidad relativa (v_r), formada por la suma vectorial de la velocidad tangencial del viento en el plano de rotación ($r\omega$) y la velocidad axial (v_{axial}), genera con respecto al eje del chord el ángulo de ataque (α), que se entiende entonces como factor aerodinámico al depender de la dirección de v_r .

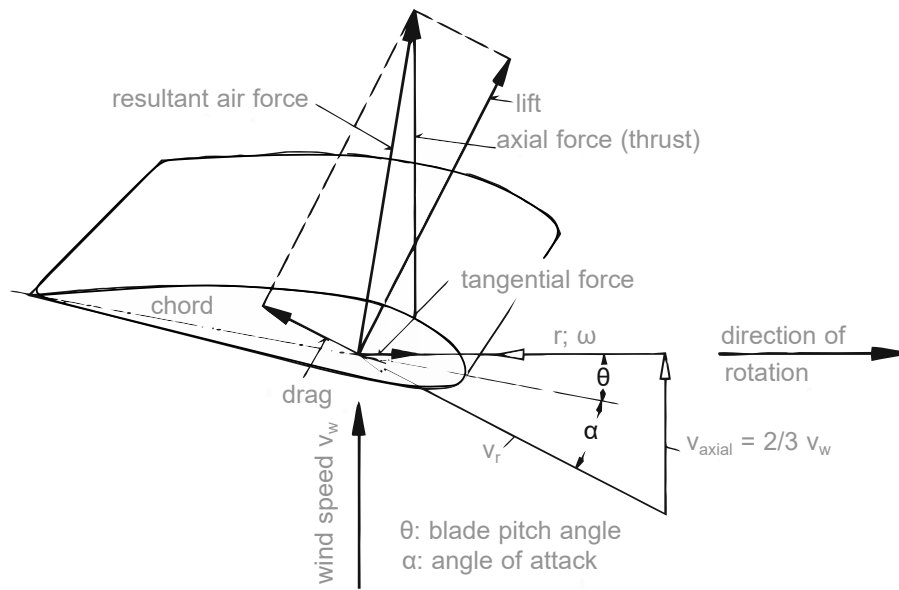


Figura 3.29: Fuerzas dinámicas sobre una sección transversal de un airfoil según modelo de blade element [14]

El cálculo de fuerzas aerodinámicas se lleva a cabo mediante un balance de fuerzas del perfil transversal, permitiendo además conocer componentes del drag adicional que provienen de la interacción con la punta de las palas y el flujo colindante, conocidos en la práctica como “free tip vortices”. Estimando los valores de los coeficientes de lift y drag (que están en función del ángulo de ataque), el modelo puede cuantificar la distribución de las fuerzas aerodinámicas sobre el largo de la pala. Por lo general, el estudio de distribuciones de fuerza se realiza mediante dos componentes [14]:

- Distribución tangencial de fuerzas: la integración de la distribución de dichas fuerzas sobre el radio del rotor, proporciona el momento del rotor. Considerando la velocidad de rotación del rotor, es posible estimar la potencia del rotor y/o el coeficiente de potencia.
- Distribución de empuje (thrust): su integración produce el empuje total del rotor (en dirección a la estructura o torre).

Dentro de los supuestos que posee el modelo intermedio, se destaca [16]:

- Cada sección de flujo (tiras o strips) se pueden analizar de forma independiente al resto del flujo.
- El modelo es de dos dimensiones, ya que no predice flujos inducidos en el eje del largo de las aspas.

- No tiene un buen desempeño para flujos no estacionarios que presentan cambios bruscos de ángulos de ataque (es un modelo estacionario).

El modelo de blade element theory como supuesto relevante presenta un desarrollo en estado estacionario del flujo, como también que las secciones de aire colindante a la pala (tiras o strips), son independientes de las condiciones de las demás. Esto conlleva a que si es necesario evaluar los efectos de la turbulencia que presenta el aire de entrada o la estela turbulenta que se genera posterior al giro del rotor, se deba recurrir a métodos que contemplen ecuaciones de conservación (CFD).

Dentro de los avances en el diseño de aspas, se destaca la implementación de esquemas CFD (computational fluid dynamics). En dichos modelos, de forma general, se formulan las ecuaciones de movimiento de forma Euleriana (volúmenes de control), donde la ecuación de Navier Stokes da las bases para el estudio de la capa límite que está presente en las paredes en que incide el flujo de aire. El método de CFD no solo permite calcular los parámetros de flujo, ya que es posible mediante métodos de integración obtener la distribución de fuerza que está presenta sobre el sólido. Finalmente, los flujos no estacionarios pueden ser incluidos en el esquema, teniendo una diversidad de modelos que pueden modelar ó calcular la turbulencia (URANS, LES, DNS, etc).

Estudio de perfil aerodinámico (airfoil)

El estudio del flujo incidente sobre la pala de rotor se lleva a cabo en relación a la vista o sección denominada airfoil. Como se aprecia en la Figura 3.30, el aspa de la turbina se extiende en el eje y , resultando la sección de estudio o airfoil los diversos cortes paralelos al eje xz .

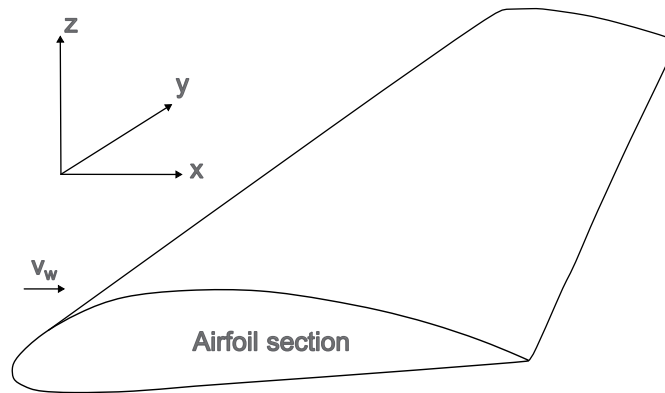


Figura 3.30: Definición de airfoil [32]

El comportamiento del flujo adyacente a las paredes del airfoil, como también las fuerzas aerodinámicas resultantes están en función de las dimensiones del airfoil. La nomenclatura de forma general es la expuesta por la Figura 3.31, donde se destacan los parámetros:

- Chord (c): Distancia desde el borde de ataque (leading edge) con el borde de salida (trailing edge).
- Mean camber line: conjunto de puntos que representan la distancia media entre la superficie superior e inferior.
- Thickness: longitud entre la superficie superior e inferior.
- Camber: Distancia máxima entre “mean camber line” y el “chord line”.

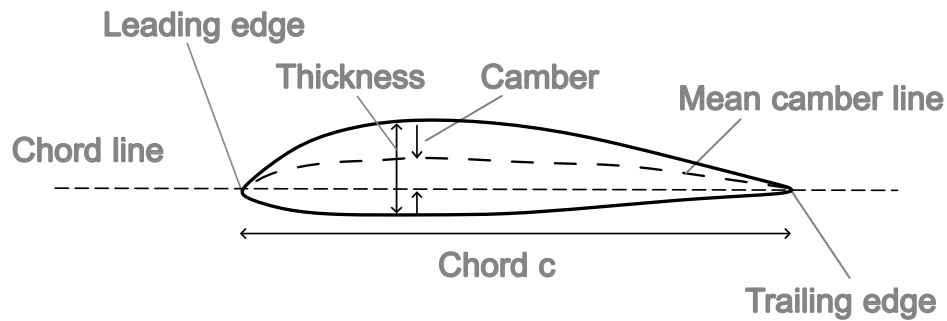


Figura 3.31: Nomenclatura general de airfoil [32]

La forma de los airfoils fue establecida por NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), donde las diferencias de su forma radican en el “mean camber line” y la distribución simétrica del “thickness”. Dichos estudios y prototipos desarrollados, tenían como fin aumentar o disminuir las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el airfoil, logrando formas, dimensiones, proporciones y finalmente aplicaciones ingenieriles múltiples (aeronáutica, turbina eólica, etc). La Figura 3.32 expresa lo anterior en la diversidad de modelos y series que desarrolló durante el siglo XX el Comité Asesor nacional para la aeronáutica (NACA).

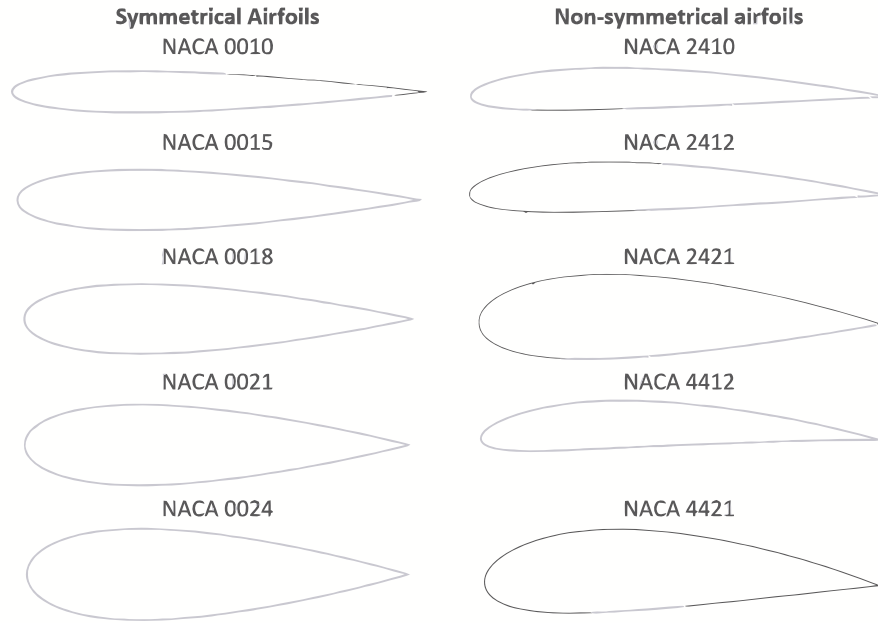


Figura 3.32: Selección de airfoils de 4 dígitos [33]

NACA diferenció los diseños con un sistema de identificación basado en dígitos. Los prototipos pioneros fueron desarrollados en 1930, conocidos como la serie de “4 dígitos”. Como ejemplo, en dicho caso el primer dígito es el valor máximo de camber en centésimas de la magnitud del chord, el segundo dígito es la ubicación del camber a lo largo del chord desde el borde de ataque expresado en décimas del chord, y los dos últimos dígitos expresan el thickness en centésimas de chord.

Si se da el caso en que el airfoil no presente camber (chord y camber line es idéntico), se le puede identificar como airfoil simétrico. Para el caso de la serie de 4 dígitos resultan con una nomenclatura del tipo NACA 0012, 0017, 0018, etc [32].

El avance e implementación de los airfoils no solo repercutió en la aeronáutica, ya que las turbinas eólicas (tanto HAWT y VAWT) fueron utilizando dichos prototipos para aumentar su capacidad de convertir energía mecánica del viento aumentando el lift y disminuyendo el drag. La Tabla 3.3 expone ejemplos de aplicaciones de airfoils en la aeronáutica, destacándose que se implementan en mayor medida series posteriores a la expuesta anteriormente (5 y 6 dígitos).

Tabla 3.3: Modelos de airfoil utilizados en aeronáutica [32]

Avión	Airfoil
Beechcraft Sundowner	NACA 63A415
Beechcraft Bonanza	NACA 23016.5 (at root) NACA 23012 (at tip)
Cessna 150	NACA 2412
Fairchild A-10	NACA 6716 (at root) NACA 6713 (at tip)
Gates Learjet 24D	NACA 64A109
General Dynamics F-16	NACA 64A204
Lockheed C-5 Galaxy	NACA 0012 (modified)

Coefficientes aerodinámicos

Tanto para el coeficiente de lift (C_l) y drag (C_D), si se posee información de la fuerzas aerodinámicas, son calculados mediante el despeje de las ecuaciones (3.20) y (3.21), respectivamente.

De forma similar al lift, su coeficiente dependerá principalmente de los parámetros de ángulo de ataque (α) y la velocidad del viento incidente (v_w). La Figura 3.33 presenta el comportamiento de C_l en función del ángulo de ataque, pero se concluye que hasta cierta magnitud de α (stalled region), este deja de comportarse proporcionalmente. La región de estancamiento se entiende a la situación donde el ángulo de ataque supera el valor crítico (entre 10° o 16° , depende del número de Reynolds), que conlleva a la separación de la capa límite sobre la superficie superior del airfoil, generando una estela aguas abajo del aspa y aerodinámicamente repercutiendo en una reducción del lift y aumento del drag [34].

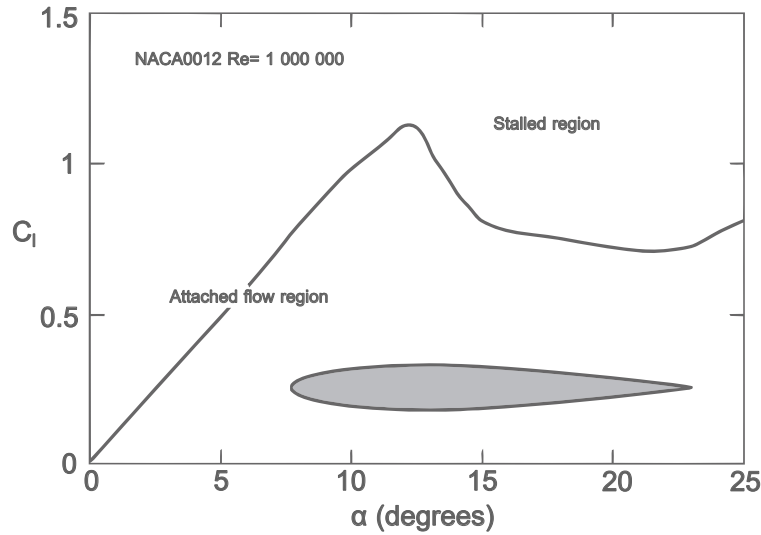


Figura 3.33: Variación de C_l de un airfoil NACA0012 [34]

Como el drag es parte de la descomposición vectorial de la fuerza aerodinámica total que sufre el cuerpo o airfoil, el coeficiente de arrastre (drag) también variará con el ángulo de ataque (α). Para comprender el comportamiento del C_d , se debe tener en cuenta el estudio del gradiente de presión de un airfoil, esquematizado por la Figura 3.34.

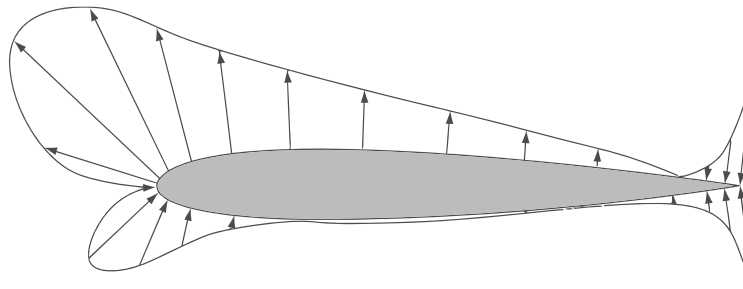


Figura 3.34: Distribución de presión para un airfoil NACA0012, $\alpha = 5^\circ$ [34]

La superficie superior presenta un aumento de presión a medida que el flujo se mueve hacia el borde de salida, lo que se traduce como un gradiente de presión adverso (realentizando la velocidad del aire). Si el aire se desacelera hasta detenerse, se producirán pérdidas de rendimiento y el drag aumentará. La influencia negativa en el flujo colindante debido al gradiente de presión adverso aumenta con el ángulo de ataque, por lo que se puede esperar que el drag (o C_d) se incremente en función de α [34], como se ejemplifica en la Figura 3.35.

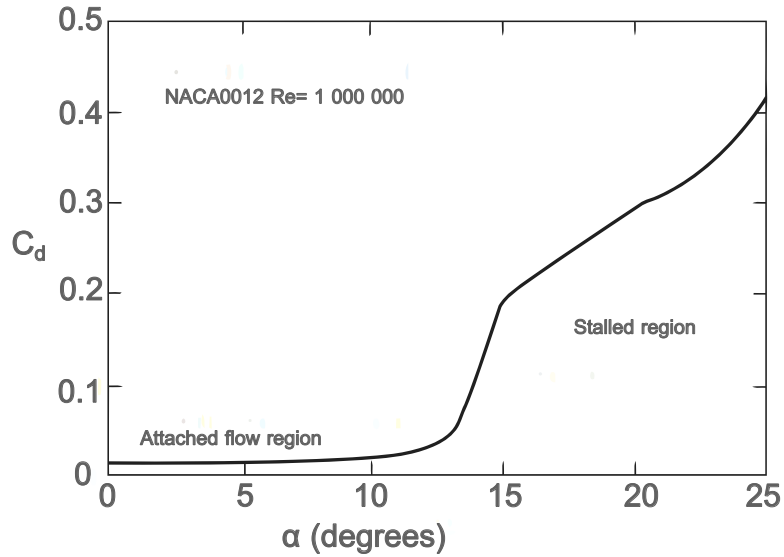


Figura 3.35: Variación de C_d de un airfoil NACA0012 [34]

Finalmente, es posible relacionar el rendimiento de una turbina eólica mediante el cociente C_l/C_d , ya que como se aprecia en la Figura 3.36, al operar en valor máximo de dicho cociente, se logran los valores mínimos en pérdidas por arrastre (wake) considerando como único parámetro de estudio el ángulo de ataque (α).

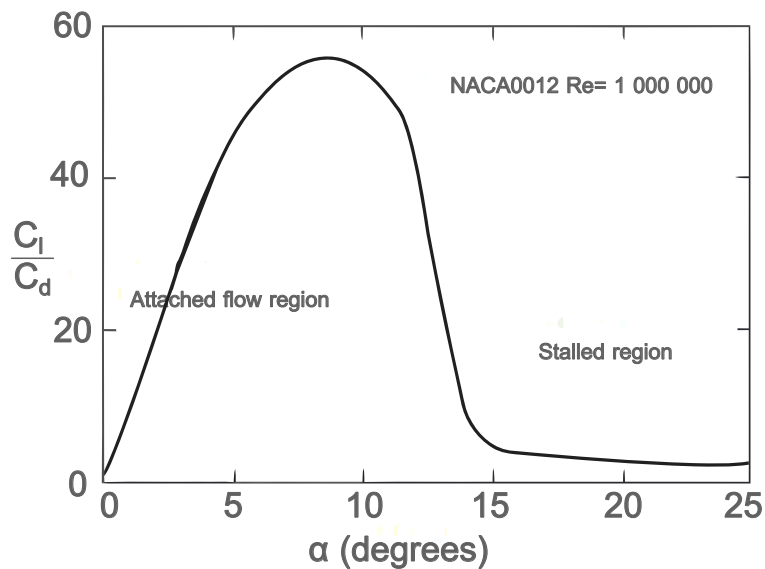


Figura 3.36: Variación de C_l/C_d de un airfoil NACA0012 [34]

Realizando el estudio de capa límite de un airfoil 2D, el gradiente de presión dP/ds (siendo s el arco del airfoil) se puede comprender como el factor principal de estudio (se evidencia en

los comportamientos del C_d). Un valor positivo de la tasa de cambio de la velocidad en torno a la superficie del airfoil dv/ds , conlleva un valor negativo de dP/ds , que se interpreta como un gradiente de presión favorable, ejemplificado en la Figura 3.37.

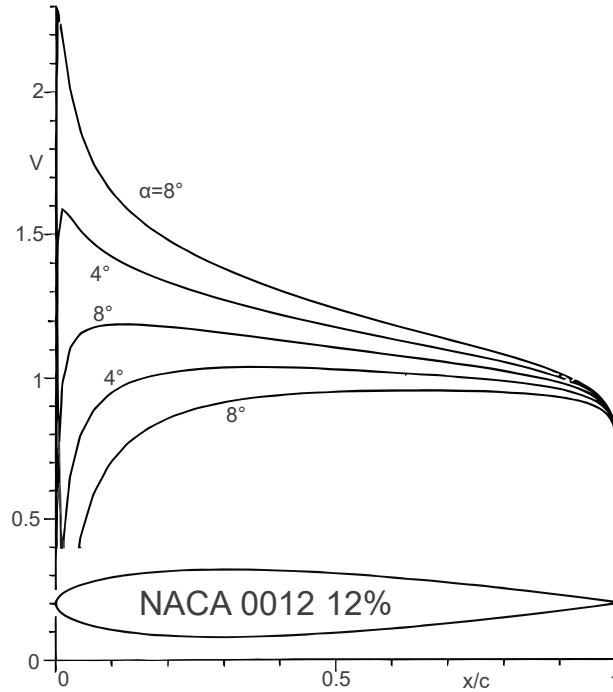


Figura 3.37: Distribución de velocidad en airfoil NACA 0012 [35]

Siendo NACA 0012 un airfoil simétrico, la Figura 3.37 demuestra empíricamente que la velocidad tangencial $v(x, \alpha)$ depende del ángulo de ataque (α) y su posición (x). Definiendo la velocidad de la superficie superior v_u y la inferior v_l , la Ecuación (3.23) estima la diferencia entre dichas velocidades ($\Delta v(x, \alpha)$).

$$\Delta v(x, \alpha) = v_u(x, \alpha) - v_l(x, \alpha) \quad (3.23)$$

Considerando la diferencia de velocidad, se concluye que aumenta su magnitud exponiendo el airfoil a mayores ángulos de ataque (α), siendo la posición cercana al borde de ataque la que presenta la mayor diferencia de velocidad (x/c cercanos a 0) [35].

Al analizar la diferencia de velocidad en las caras superiores e inferiores, el coeficiente de lift (C_l) es aproximadamente proporcional al área entre las curvas de la velocidad superior (v_u) e inferior (v_l). Esto se expresa integralmente en la Ecuación (3.24).

$$C_l(\alpha) \approx \int_0^1 \Delta v(x, \alpha) dx \quad (3.24)$$

Uno de los parámetros que caracterizan el comportamiento del rotor desde un punto de vista de potencia mecánica es el coeficiente de momento (C_m). De forma homologa al caso del coeficiente de potencia (c_p), este parámetro se obtiene mediante la Ecuación (3.25).

$$M = C_m \frac{\rho}{2} v_w^2 AR \quad (3.25)$$

Siendo el momento o torque del rotor (M), la velocidad del viento (v_w) y el radio del rotor (R). El coeficiente de momento (C_m) es posible relacionarlo directamente al coeficiente de potencia, ya que mediante el reemplazo de la Ecuación (3.25) en la definición del C_p , se obtiene la Ecuación (3.26).

$$C_p = \lambda C_m \quad (3.26)$$

Los principales parámetros que determinan el valor del coeficiente de potencia del rotor (C_P), se resumen en [14]:

- Número de palas del rotor.
- Características aerodinámicas del airfoil.

Si se estudian las curvas de los coeficientes de torque y potencia experimentales, estas considerarán principalmente la variación del ángulo de ataque que son expuestos (variable de diseño), como lo ejemplifican las figuras 3.38 y 3.39, respectivamente.

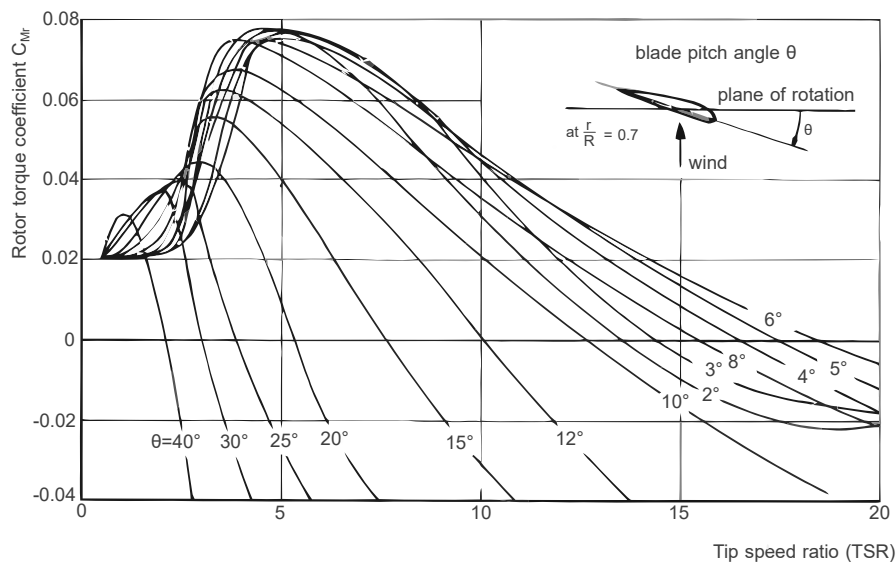


Figura 3.38: Coeficiente de momento para un rotor WKA-60 [14]

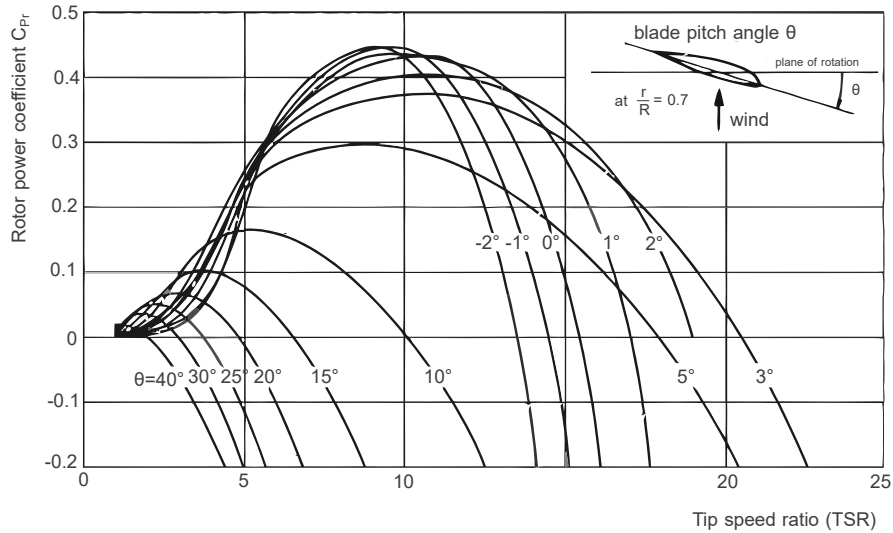


Figura 3.39: Coeficiente de potencia para un rotor WKA-60 [14]

3.2 Modelación computacional

3.2.1 Software: ANSYS Fluent [36]

ANSYS Fluent proporciona capacidades de modelado completas para una amplia gama de problemas de flujo de fluidos incomprensibles ó comprensibles, como también regímenes de flujo laminares y turbulentos. Se pueden realizar análisis en estado estacionario o transitorio, siendo este último un enfoque imprescindible para llevar a cabo estudios de aerogeneradores. El software contempla una amplia gama de modelos matemáticos para fenómenos de transporte (como transferencia de momento, calor y reacciones químicas), con la capacidad de modelar geometrías complejas (airfoils) que deben ser diseñados en primer lugar por el programa “Design modeller”, y posteriormente, discretizados en su dominio mediante “ANSYS Meshing”. La metodología general en que se fundamenta el programa computacional, es resolver las ecuaciones de conservación de masa y momento (Navier Stokes) mediante el método de volúmenes finitos, destacando su versatilidad si se requiere contemplar de forma simultanea transferencia de calor, compresibilidad, mezcla de especies o reacciones químicas.

De forma general, las ecuaciones de conservación requeridas para modelos de flujo incidente de aire en la superficie del aerogenerador son:

Conservación de la materia

La ecuación de continuidad, de forma general, se expresa según la Ecuación 3.27.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (3.27)$$

Resulta válida tanto para flujos compresibles e incompresibles. El término S_m es el término fuente (source) de masa, densidad del fluido (ρ) y vector velocidad (\vec{v}).

Conservación de momento

La conservación de momento para un caso inercial (no acelerado), se describe en ANSYS Fluent según la Ecuación (3.28).

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.28)$$

Siendo p el campo de presión, $\bar{\tau}$ el tensor de esfuerzo, $\rho \vec{g}$ y \vec{F} son la fuerza de gravedad que actúa sobre el cuerpo y fuerzas externas, respectivamente. Finalmente, \vec{F} es el término fuente (source). De forma general, se define el tensor de esfuerzo ($\bar{\tau}$) como la Ecuación (3.29).

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3.29)$$

3.3 Mallado (ANSYS Meshing)

La generación de malla como tal, es un componente de gran relevancia para obtener soluciones numéricas de las ecuaciones diferenciales parciales gobernantes del problema de dinámica de fluidos computacional (CFD). Por definición, una malla es una discretización de un dominio geométrico en formas simples y pequeñas, como triángulos o cuadriláteros en dos dimensiones, y tetraedros o hexaedros para tres dimensiones. A través de la subdivisión del dominio, dicha discretización debe ser capaz de resolver adecuadamente la física relevante del problema, como también capturar la mayor cantidad de detalles geométricos del dominio dentro de la región de flujo [37]. Diseñar una malla adecuadamente no es trivial, ya que el trabajo que conlleva generar una grilla que cumpla con los objetivos anteriormente mencionados, merece tanta atención como prescribir la física necesaria para el problema de flujo. Debido a esto, la discretización del dominio se ha convertido en un área de estudio por sí misma.

3.3.1 Clasificación de mallas

Existe una clasificación en torno a si estas son estructuradas y no estructuradas. La diferencia radica en torno a la forma de los elementos; las mallas estructuradas bidimensionales suelen utilizar cuadriláteros, mientras que las mallas no estructuradas utilizan triángulos. En tres dimensiones, las formas de elemento análogas son hexaedros, que significan cubos topológicos, y tetraedros.

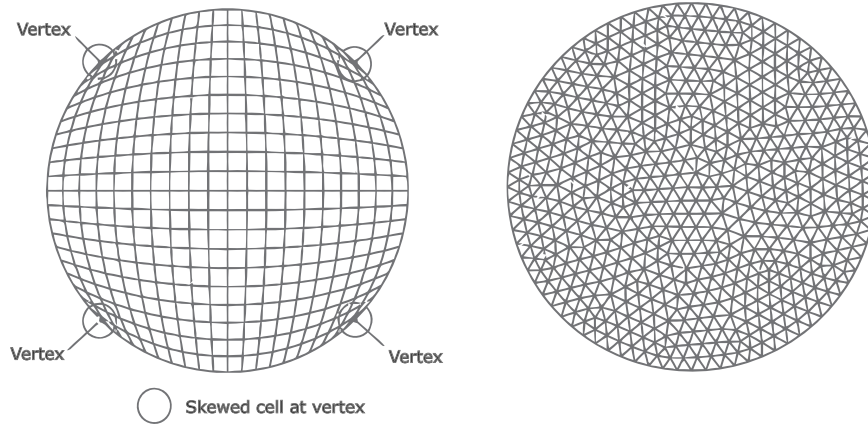


Figura 3.40: Ejemplo malla estructurada, no estructurada [37]

Las mallas estructuradas ofrecen simplicidad y fácil acceso a los datos, mientras que las mallas no estructuradas ofrecen una adaptabilidad de la malla más conveniente (refinamiento/desrefinamiento basado en una solución inicial), como también un mejor ajuste a dominios complicados [38].

Al comparar la calidad de las celdas de cada tipo de mallado, si se debe resolver un problema relacionado a capa límite en una pared, las celdas triangulares (bidimensionales) o tetraédricas (tridimensionales) en contraposición con las celdas cuadriláteras (bidimensionales) o hexaédricas (tridimensionales), suelen ser ineficaces para tratar la fenomenología en cuestión. Lo anterior se relaciona en la mayoría de los casos en que la malla produce celdas triangulares o tetraédricas muy largas y delgadas adyacentes a las fronteras de las paredes, lo que crea problemas importantes en la aproximación de los flujos difusivos [37]. Debido a que el dominio por lo general se puede subdividir, es posible utilizar los mecanismos de forma simultanea (según sean las características de cada geometría o flujo), denominándose malla mixta o híbrida.

La motivación detrás del uso de mallas mixtas o híbridas es emplear los elementos más adecuados en cada región de flujo. Los objetivos son aumentar la precisión de la simulación y reducir los costos computacionales, ya que se restringe el uso de cierto tipo de grilla para un determinado segmento de dominio. Con respecto a la aplicación de mallas híbridas, es común observar una discretización en regiones cercanas a las paredes utilizando mallas estructuradas (hexaédricas o posiblemente mallas prismáticas semiestructuradas), lo que permite una implementación más efectiva de esquemas

espaciales de orden superior, métodos implícitos o multigríd. En secciones donde no es requerido lo anterior, se propone una malla no estructurada, que ofrece principalmente ventajas de adaptabilidad en áreas geoméricamente complejas [39], como se ejemplifica en la Figura 3.41.

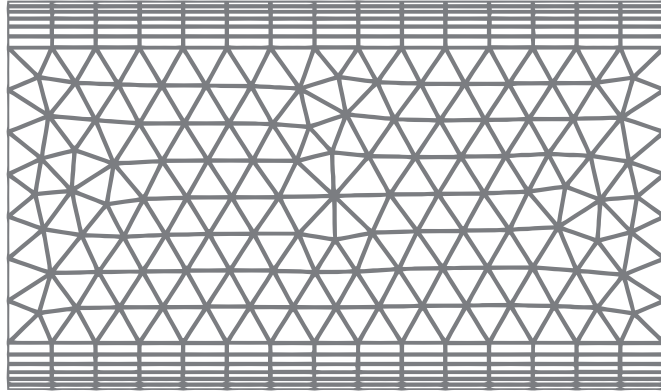


Figura 3.41: Malla con elementos cuadriláteros estructurados cerca de las paredes y elementos triangulares no estructurados en sección de flujo [37]

3.3.2 Calidad de malla

La calidad de la malla influye fuertemente en la precisión de la simulación, según describen diversos autores [37, 39], especialmente si se utilizan mallas no estructuradas. Dentro de los aspectos fundamentales para que una malla generada resulte aplicable, debe presentar elementos lo más regulares posible, como también una transición suave en torno al cambio de tamaño de sus elementos. Como último, se destaca que la malla también debe ser lo suficientemente fina como para resolver las características geométricas y de flujo relevantes, ya que dependen de los esquemas que se utilizan para describir el problema. Un ejemplo es generar una malla que se aplicará en modelos de turbulencia con Large eddy simulation (LES), que exige un menor tamaño de primer elemento colindante a un sólido si se compara a esquemas Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS), además que debe aplicar un filtro espacial entre la escala de cálculo y de subgrilla, el cual está en función del tamaño de elemento (Sección 4.3).

Para determinar la calidad de la malla resultante, las métricas comúnmente utilizadas se dividen en las siguientes categorías generales [40]:

Métricas de ortogonalidad

- Desviación estándar de ángulos.
- Ángulo promedio.
- Máxima desviación de 90 grados.

Métricas de calidad de celda

- Relación de aspecto promedio de todas las celdas.
- Desviación estándar de todas las relaciones de aspecto.

Métricas de mallado en ANSYS [41]

Se describirán ciertas métricas que son de utilidad transversal para conocer de forma cuantitativa la calidad de malla, que posteriormente es importada a Fluent.

1. Calidad de elemento (Element quality): Se define como un factor de calidad para cada elemento del modelo (excluyendo elementos de línea y puntos), donde la magnitud varía entre 0 y 1. Esta métrica se basa en la relación del volumen con la longitud del borde para un elemento dado.

Un valor de 1 indica un cubo o cuadrado perfecto, mientras que un valor de 0 indica que el elemento tiene un volumen cero o negativo.

2. Relación de aspecto para triángulos (aspect ratio for a triangle): Se calcula utilizando los nodos de las esquinas del elemento, donde el valor óptimo para un elemento es de 1. El procedimiento para obtener el indicador se resume a continuación, considerando la Figura 3.42:

- Se construye una línea desde un nodo del elemento hasta el punto medio del borde opuesto, y otra a través de los puntos medios de los 2 bordes restantes.
- Se trazan rectángulos centrados alrededor de cada una de estas 2 líneas, con los extremos pasando por los puntos medios de los bordes del elemento y el vértice del triángulo.
- Estas construcciones se repiten utilizando cada una de las otras 2 esquinas como vértice.
- Finalmente, la relación de aspecto del triángulo es la proporción entre el lado más largo y el más corto de cualquiera de los 6 rectángulos que esté más estirado, dividido por la raíz cuadrada de 3.

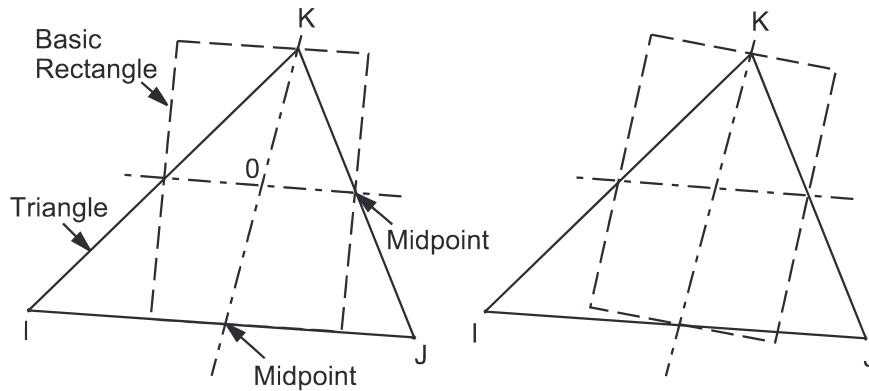


Figura 3.42: Trazos de elemento triangular para cálculo de relación de aspecto [41]

3. Relación de aspecto para cuadriláteros (aspect ratio for quadrilaterals): Se calcula de manera similar al caso anterior, donde el valor óptimo también es de 1. El proceso de estimación se basa según la Figura 3.43:

- Para un elemento que no sea plano, los nodos se proyectan en un plano que pasa por el promedio de las ubicaciones de las esquinas y perpendicular al promedio de las normales de las esquinas. Posteriormente se utiliza dicho plano como referencia.
- Se construyen dos mediatrices (dividen el segmento en partes iguales) de los pares opuestos, que se deben intersectar en el centro del elemento.
- Finalmente, se construyen rectángulos centrados alrededor de cada una de las 2 líneas, con sus bordes pasando por los puntos medios de los bordes del elemento. La relación de aspecto del cuadrilátero es la proporción entre un lado más largo y un lado más corto del rectángulo que esté más estirado.

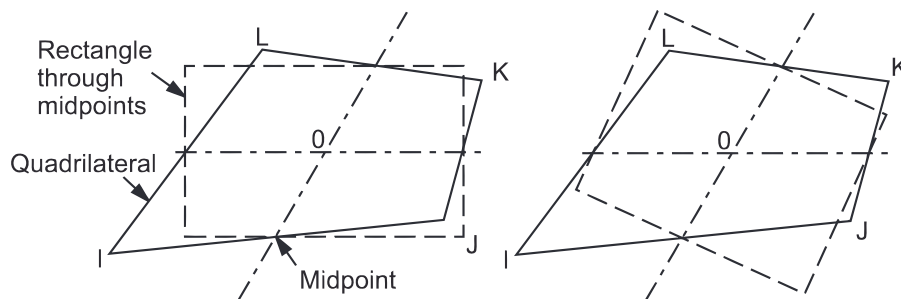


Figura 3.43: Trazos de elemento cuadrilátero para cálculo de relación de aspecto [41]

4. Sesgo (skewness): está dentro de las métricas de calidad principales para una malla. El sesgo determina qué tan cerca del ideal (equilátero) está una cara o celda, como se observa en la Figura 3.44.

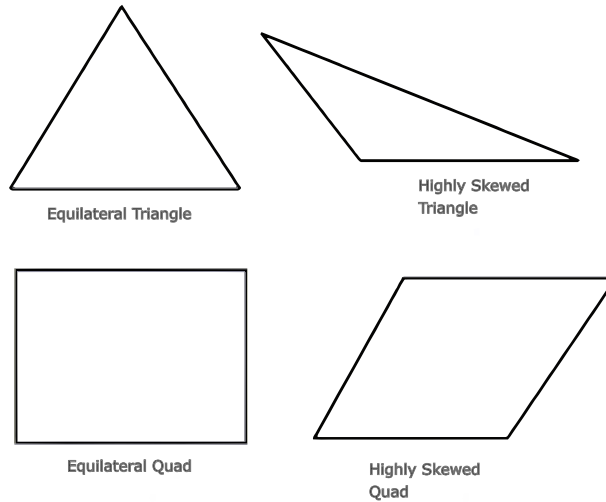


Figura 3.44: Comparación gráfica para elementos con sesgo (skewness) ideal o bajo [41]

Con respecto a los valores que puede tomar el sesgo, el valor nulo indica una celda equilátera (esperable) y un valor de 1 indica una celda completamente degenerada, las cuales se caracterizan por nodos que están casi coplanares (colineales en 2D), lo que se traduce como una celda que puede presentar problemas para describir el problema a resolver. Los rangos de sesgo según la calidad de celda se describen en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Rango de valores de skewness [41].

Valor de skewness	Calidad de celda
1	Degenerada
0.9 - <1	Malo
0.75 - 0.9	Pobre
0.5 - 0.75	Justo
0.25 - 0.5	Bueno
>0 - 0.25	Excelente
0	Equilátero

Con respecto a la forma de estimación del parámetro, se encuentran:

- Relacionado con el volumen equilátero (triángulos y tetraedros)
- Descrito en la desviación de un ángulo equilátero normalizado (para toda celda)

Finalmente, el sesgo relacionado con el volumen equilátero es posible de calcular mediante la Ecuación (3.30).

$$Skewness = \frac{\text{Tamaño óptimo de celda} - \text{Tamaño de celda}}{\text{Tamaño óptimo de celda}} \quad (3.30)$$

5. Calidad ortogonal (Orthogonal quality): El valor de esta métrica se encuentra de 0 a 1, donde un valor de 1 es el óptimo para cada elemento. La calidad ortogonal para las celdas se calcula utilizando el vector normal de la cara, el vector desde el centroide de la celda hasta el centroide de cada una de las celdas adyacentes y el vector desde el centroide de la celda hasta cada una de las caras, como es posible identificar en la Figura 3.45.

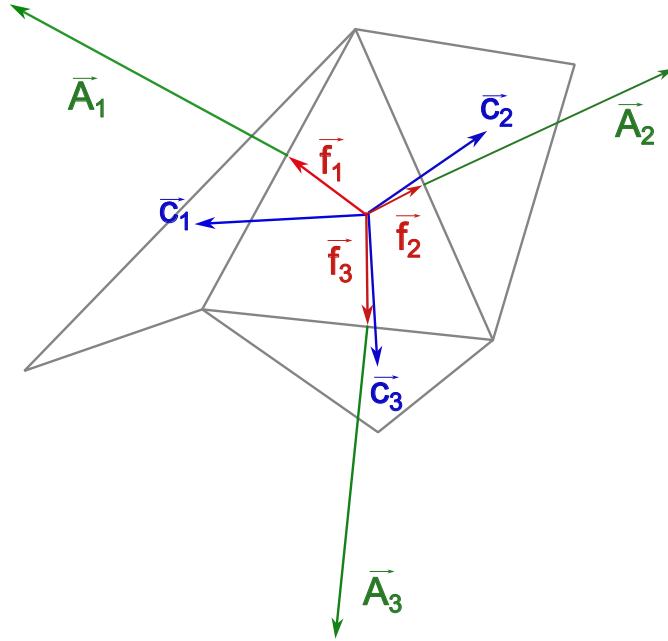


Figura 3.45: Vectores necesarios para estimar calidad ortogonal de una celda [41]

3.3.3 Malla dinámica (Moving Mesh)

El modelo de malla dinámica que presenta ANSYS Fluent permite modelar flujos donde el dominio o partes de este, se encuentran variando su posición o forma con el tiempo. Con respecto a su aplicación, es posible utilizarlo bajo flujos monofásicos o multifásicos, ya que la Ecuación (3.31) de transporte (de un escalar ϕ) se cumple para esquemas de turbulencia, energía, especies, fases, etc.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \frac{d}{dt} \int_{\partial V} \rho \phi (\vec{u} - \vec{u}_g) \cdot d\vec{A} = \int_{\partial V} \Gamma \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (3.31)$$

Donde cada término se entiende como:

ρ	Densidad del fluido
\vec{u}	Vector de velocidad de flujo
\vec{u}_g	Velocidad de malla
Γ	Coefficiente de difusión
S_ϕ	Término fuente de ϕ

El movimiento de malla puede ser prescrito (fijar una velocidad de giro de un cuerpo o velocidad lineal), como también un movimiento no prescrito donde el movimiento subsiguiente se determina en función de la solución en el tiempo actual (por ejemplo, las velocidades lineales y angulares se calculan a partir del equilibrio de fuerzas en un cuerpo sólido, como se hace con el modelo de seis grados de libertad) [36]. La actualización de la malla de volumen se maneja automáticamente por el software en cada paso de tiempo en función de las nuevas posiciones de los límites. Con respecto a la implementación para el usuario, basta proporcionar una malla inicial con el movimiento que se le desea aplicar al dominio móvil, o zona específica en que se ejercerá un movimiento. Dentro de las funciones definidas por usuario (UDFs) se encuentra el modelo de seis grados de libertad (6DOF), que permite calcular un movimiento rotacional y/o de traslación (movimiento lineal).

Si es utilizado un esquema de seis grados de libertad, donde se calculan fuerzas y momentos externos, como también fuerzas aerodinámicas sobre un cuerpo rígido, se debe tomar en cuenta que estas fuerzas se calculan mediante la integración numérica de la presión y esfuerzo de corte sobre la superficie del objeto que se encuentra dentro de un flujo de fluido. Si el movimiento de malla depende entonces del flujo del fluido, es recomendable habilitar la opción de actualización implícita de malla (implicit mesh updating).

Actualización implícita de malla (implicit mesh updating)

La actualización implícita de malla para un problema no estacionario, se basa en que la malla dinámica se calcula por cada paso de tiempo. Por lo tanto, contar con que el movimiento de la malla dentro del paso de tiempo basado en la solución del flujo convergente, resulta en un acoplamiento más fuerte entre la solución del flujo y el movimiento de malla (solución más robusta). En otras palabras, el método implícito de malla permite ejecutar simulaciones que de otra manera no podrían resolverse o requerirían un paso de tiempo irrazonablemente pequeño [42]. Dentro de las variables que se deben tomar en cuanto al momento de utilizar el método implícito, se destaca:

- Relajación del movimiento (motion relaxation): se define como el desplazamiento de los nodos,

mientras la malla se está actualizando, donde su valor está entre 0 a 1. La Ecuación (3.32) determina el desplazamiento de estos al utilizar el método implícito.

$$x_k = \omega(x_{computed,k}) + (1 - \omega)x_{k-1} \quad (3.32)$$

Donde x_k es la posición del nodo en la iteración k , $x_{computed,k}$ es la posición del nodo calculado (en referencia al flujo) y ω es la relajación del movimiento (motion relaxation)

- Criterio de residuo (residual criteria): establece un valor objetivo para el residuo relativo que se utiliza para verificar convergencia del movimiento de malla. Si la diferencia de movimiento relativo es menor al criterio de residuo, se logra convergencia de variación de malla.

Tipos de movimiento en zonas dinámicas

Resulta útil diferenciar que tipo de zona dinámica se establece en un modelo. Por un lado existen zonas en que mantienen su forma a pesar de tener un movimiento rotacional y/o de traslación llamadas “cuerpo rígido” (requieren definir un eje de referencia rotacional, además de la posición inicial del centro de masas), como también las que presentan una deformación asociada a su movimiento. Para las últimas, el software permite definir el movimiento mediante una función definida por usuario, además de métodos de malla (smoothing, layering y remeshing) para actualizar la grilla en las regiones deformables sujetas al movimiento, ya que la zona varía morfológicamente en el tiempo (problema no estacionario), como se observa en la Figura 3.46.

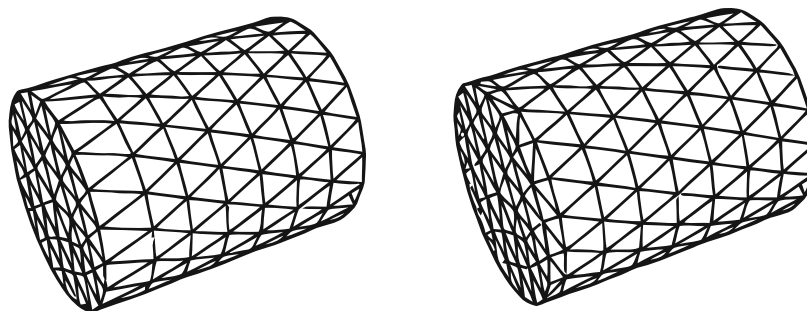


Figura 3.46: Expansión de cilindro mediante método remeshing [42]

En modelos donde exista un sólido que tenga un movimiento de cuerpo rígido, es posible que su dominio colindante no presente un desplazamiento de sus elementos, por lo tanto, en una simulación es posible acoplar subdominios tanto estacionarios, como móviles desde un punto de vista de la grilla.

Malla deslizante (Sliding Mesh)

El modelo de malla deslizante es un caso especial de movimiento de malla dinámica, donde los nodos se mueven rígidamente, como se observa en la Figura 3.47. Estos modelos están formados por múltiples zonas de celdas, las cuales están conectadas entre sí a través de interfaces no conformes (nodos adyacentes no coincidentes). A medida que se actualiza el movimiento de la malla en el tiempo, las interfaces no conformes también se actualizan para reflejar las nuevas posiciones de cada zona (una estacionaria y otra móvil). Es importante tener en cuenta que el movimiento de la malla debe ser prescrito, de tal manera que las zonas conectadas a través de dichas interfaces permanezcan en contacto entre sí, logrando que el fluido pueda transmitirse de una zona a otra. Cualquier porción de la interfaz donde no haya contacto se trata como una pared [42]. La formulación general de la ecuación de conservación para mallas dinámicas, expresada en la Ecuación (3.31), también se cumple para mallas deslizantes. La clasificación de tipo de malla que se encuentran en un modelo de grilla deslizante, se describen a continuación:

1. Movimiento rotacional de cuerpo rígido: el principio en que se basa la simulación del movimiento rotacional de un cuerpo rígido, es la ley de rotación, expresada en la Ecuación (3.33).

$$\sum M = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.33)$$

Donde M es el torque externo neto, J el momento de inercia y ω la velocidad angular del cuerpo. La ley indica que un torque externo neto sobre un cuerpo rígido, causará una aceleración angular, donde esta aumentará hasta que el torque neto se sea cero o fluctúe periódicamente en dicho valor [43]. Finalmente, la velocidad angular expresada en la Ecuación (3.33) es actualizada por el software para cada paso de tiempo, según la Ecuación (3.34).

$$\omega_{i+1} = \omega_i + \frac{d\omega}{dt} \cdot \Delta t \quad (3.34)$$

Siendo Δt el incremento de tiempo entre dos pasos de tiempo.

Con respecto a la configuración de rotación para un cuerpo rígido en Fluent, se debe tener en cuenta [42]:

- Especificar la ubicación inicial del centro de gravedad del cuerpo rígido.
- Ingresar la orientación del objeto con respecto al centro de gravedad (sistema de coordenadas de inercia)

- Definir la velocidad inicial del centro de gravedad con respecto al sistema de coordenadas de inercia.
- Magnitud de momento de inercia.
- Masa del sólido a simular.

Finalmente, si existe un dominio que es colindante con el cuerpo rígido, que no es resultado o que influye en las fuerzas y momentos del movimiento de cuerpo rígido descrito por una rotación, se debe explícitamente utilizar la opción “Passive”. Por ejemplo, si es necesario mantener la calidad de malla alrededor del objeto en rotación, se define que dicha zona se mueva rígidamente con el objeto (para evitar que se deforme), que dicho de otra manera, la capa debe heredar el mismo movimiento de cuerpo rígido del sólido, pero excluyéndose del cálculo de fuerzas del fluido.

2. Zona estacionaria: existe la posibilidad de definir de forma explícita en Fluent la característica de inmovilidad de nodos para un subdominio del modelo, quien consecuentemente no debe presentar un movimiento (rígido o deformación). Como se puede apreciar en la Figura 3.47, si a una zona se le asigna un movimiento de cuerpo rígido, las posiciones de todos los nodos pertenecientes a la zona de celda se actualizarán aunque algunos de los nodos también puedan formar parte de una zona de borde no móvil. Una declaración explícita de una zona estacionaria colindante a la anterior, permite excluir los nodos en estas zonas al actualizar la malla en el siguiente paso de tiempo.

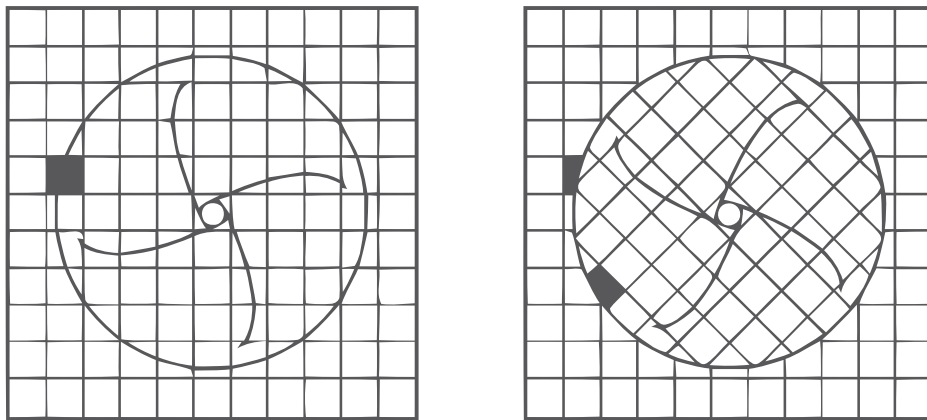


Figura 3.47: a) Malla en estado inicial; b) Dominio interno presenta movimiento de sus nodos [44].

3.3.4 Modelo de seis grados de libertad (6DOF)

Un cuerpo rígido se define como un sistema de puntos de masa donde mediante restricciones, se logra que la distancia entre estos pares de puntos independiente del movimiento, ya sea, rotacional y/o

traslacional, sea constante [45]. Para describir el movimiento de un cuerpo de estas características, se requieren de 6 grados de libertad (6DOF), como se observa en la Figura 3.48. Estos sistemas de referencia se entienden, como:

- 3 coordenadas externas para especificar la posición desde un punto de referencia externo del cuerpo (x,y,z) .
- 3 coordenadas para especificar la orientación del cuerpo rígido (x',y',z') .

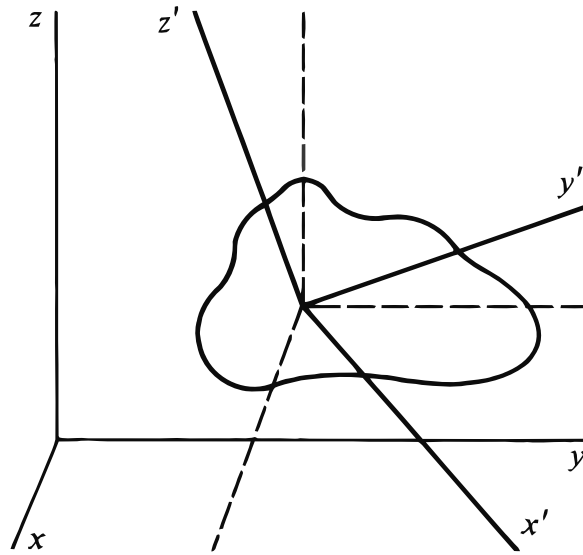


Figura 3.48: Sistema de referencia para movimiento de cuerpo rígido [45]

Si el movimiento presenta ciertas restricciones, como lo es moverse en una superficie o en un punto fijo, se logrará disminuir sus grados de libertad. Ahora bien, con respecto a la descripción del sistema de referencias de la orientación del cuerpo (x',y',z') , son ampliamente utilizados los Ángulos de Euler para describir dicho arreglo. Se definen como 3 ángulos sucesivos de rotación, como se observa en la Figura 3.49, donde se fundamentan en la base de que es posible transformar un sistema de referencias cartesianas, a cualquier otro mediante 3 rotaciones sucesivas. La elección de ángulos de rotación es arbitraria, pero existen diversas convenciones que se aplican según sea el área de estudio (mecánica, física, aeronáutica, etc).

$$\text{Ángulos de Euler} = (\phi, \theta, \psi) \tag{3.35}$$

La convención de ángulos sucesivos utilizado ampliamente en ingeniería es la llamada “xyz” ó “Tait-Bryan”. Esta se basa en el siguiente patrón [45]:

- La primera rotación es alrededor del eje vertical y da como resultado el ángulo de rumbo o guiñada (yaw)
- La segunda es alrededor de un eje perpendicular fijo en el sólido y normal al eje de la figura. Se mide mediante el ángulo de cabeceo (pitch).
- El tercer ángulo es una rotación alrededor del eje de la figura del sólido y es el ángulo de alabeo o inclinación (roll).

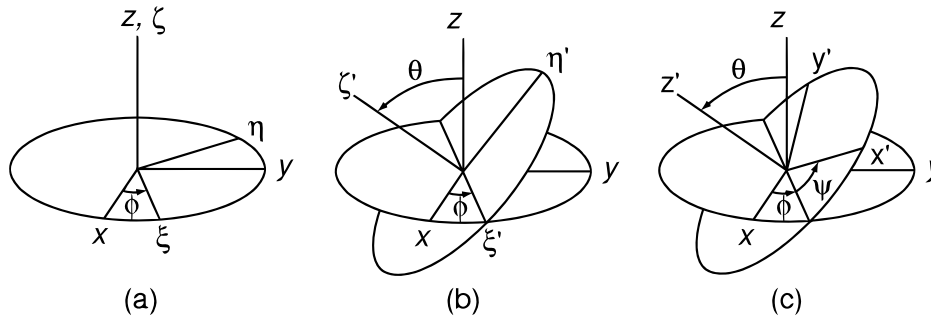


Figura 3.49: Rotaciones que definen los Ángulos de Euler[45]

Considerando entonces que es posible transformar un sistema cartesiano a uno que pueda representar la orientación del cuerpo rígido gracias a los ángulos de Euler, estos ángulos en la práctica pasarán a componer los coeficientes de una matriz llamada “matriz de transformación” (\mathbf{A}). Esta se aplica como un producto al sistema de referencias inicial \mathbf{x} , según la Ecuación (3.36).

$$\mathbf{x}' = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (3.36)$$

Dentro de las características relevantes que debe contemplar \mathbf{A} , es ser ortogonal y que su determinante estrictamente 1. Es posible representar según la Ecuación (3.37) a la matriz \mathbf{A} mediante un triple producto de las matrices de rotaciones sucesivas ($\mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$), anteriormente descritas por la Figura 3.35.

$$\mathbf{x}' = \mathbf{BCD}\mathbf{x} \quad (3.37)$$

Demás está decir que los elementos de cada matriz son funciones trigonométricas con los ángulos de Euler como índices, ya que estos son los que pueden describir las rotaciones sucesivas. Teniendo entonces los sistemas de posición y orientación del cuerpo rígido, queda definir la manera en que se ingresa a un software las ecuaciones de movimiento rotacional y/o traslacional (Sección 4.4).

3.4 Modelo de flujo

El régimen de flujo que gobierna en un determinado instante a un fluido en movimiento, se clasifica como laminar o turbulento. El flujo turbulento es uno de los fenómenos naturales que han despertado un interés de forma transversal en diversas áreas del conocimiento, posicionandolo incluso para algunos como una inquietud inmanente de la humanidad. Sin embargo, por necesidades prácticas, los investigadores e ingenieros han desarrollado e implementado modelos y análisis de diversa complejidad para considerar sus efectos en la ingeniería. Para discriminar la existencia de turbulencia en el flujo, por lo general, se intenta cuantificar su número de Reynolds, debido a que es posible relacionar su origen como una inestabilidad del flujo laminar al verse aumentado dicho número adimensional. Las inestabilidades se relacionan con dicho número debido a la interacción de los efectos viscosos con respecto a los términos de inercia no lineales en las ecuaciones de movimiento que gobiernan el flujo, como se define en la Ecuación (3.38) [46].

$$Re = \frac{UL_c}{\nu} \quad (3.38)$$

Donde U es la velocidad promedio de flujo, L_c el largo característico y ν la viscosidad cinemática. La transición de un flujo laminar a turbulento en tuberías fue descrita experimentalmente por Osborne Reynolds en 1883. El valor de $Re < 2000$ para flujo confinado en tubería circular indica un flujo laminar, pero si supera el valor de $Re > 2300$, se considera turbulento (condición súper-crítica). De forma homologa para flujos no confinados que interactúan sobre superficies planas o sólidos en general, estos presentan características similares al caso anterior, ya que la transición ocurre a lo largo de una longitud finita en la que el comportamiento del flujo también resulta ser intermitente, como se ejemplifica en la Figura 3.50.

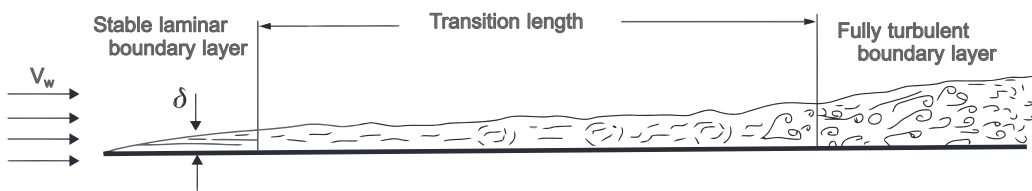


Figura 3.50: Representación de capa límite para un flujo paralelo a una placa plana [47]

Las etapas descritas en la transición de forma longitudinal, se interpretan cómo [47]:

1. Existe capa límite laminar estable cerca del borde de ataque.
2. Se observan ondas inestables en 2D aguas abajo, quienes dan lugar a vórtices con forma de pelo en sentido transversal.

3. En ubicaciones de alto cizallamiento, la descomposición del vórtice da lugar a fluctuaciones en 3D. Se observan las llamadas manchas turbulentas.
4. Finalmente, las manchas turbulentas se fusionan, dando lugar a un flujo completamente turbulento.

Para el flujo paralelo a una placa plana, la transición de laminar a turbulento depende de varios parámetros, incluyendo la rugosidad de la superficie, el nivel de turbulencia en el flujo ambiente y la naturaleza de otras perturbaciones en el flujo. Existe un rango en que ocurre dicha transición de forma general, el cual es para $Re_x = 2 \times 10^5 - 1 \times 10^6$, donde el límite superior representa una superficie lisa con baja intensidad de turbulencia del flujo principal [47].

Von Karman en 1937 definió la turbulencia como un movimiento irregular de un flujo que, en general, aparecía en fluidos que fluyen junto a superficies sólidas. Dentro de los avances que se desarrollaron en torno a la definición que dio Von Karman, se trabajó principalmente en la característica de ser un fenómeno “irregular”, ya que resultaba impreciso. Para la década de 1970, Hinze define la turbulencia como una condición irregular del flujo en la que las diversas cantidades muestran una variación aleatoria con las coordenadas de tiempo y espacio, de modo que se pueden distinguir valores promedio estadísticamente distintos [48].

Los avances en la definición de turbulencia, destacando la característica de aleatoriedad a la inestabilidad, permitieron expresar una variable como la velocidad de un flujo turbulento $u(t)$ mediante la “descomposición de Reynolds”, que se indica en la Ecuación (3.39).

$$u(t) = u'(t) + U \tag{3.39}$$

Es posible a través de valores promedio U y valores estadísticos que representan las fluctuaciones inherentes al régimen $u'(t)$, describir el comportamiento temporal del flujo como se observa en la Figura 3.51.

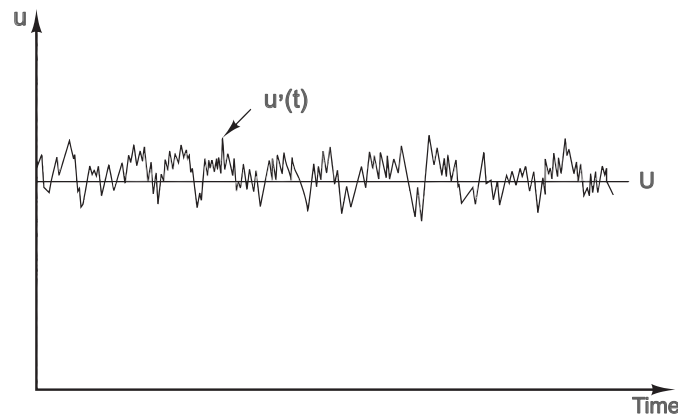


Figura 3.51: Descomposición de Reynolds para la velocidad de flujo [49]

El concepto de media o valores promedio, se puede clasificar en tres secciones, de los cuales los modelos de turbulencia se basan según sea su alcance [48]:

- Promedio temporal (turbulencia estacionaria): Se aplica para flujos donde su promedio no varía en el tiempo. Un ejemplo es un flujo que ingresa a una velocidad constante a una tubería. Dicho promedio se expresa en la Ecuación (3.40), donde $f(\vec{x}, t)$ es una variable de flujo instantáneo y $F_T(\vec{x})$ su promedio en el tiempo.

$$F_T(\vec{x}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(\vec{x}, t) dt \quad (3.40)$$

El promedio de Reynolds más utilizado es el temporal, ya que gran parte de los flujos de estudio en ingeniería son estacionarios.

- Promedio espacial (turbulencia homogénea): utilizado en flujos donde, en términos promedio, resulta uniforme en todas las direcciones. La Ecuación (3.41) expresa dicho promedio, donde se realiza una integración volumétrica siendo F_V el promedio espacial.

$$F_V(t) = \lim_{V \rightarrow \infty} \frac{1}{V} \iiint_V f(\vec{x}, t) dV \quad (3.41)$$

- Promedio en conjunto: se aplica para flujos que decaen en el tiempo. Requiere de mediciones con N experimentos idénticos (con condiciones iniciales y de contorno que difieren por perturbaciones infinitesimales aleatorias), resultando ser un caso ideal. La Ecuación (3.42) es dicho promedio aplicado sobre la variable $f_n(\vec{x}, t)$ del n -ésimo experimento.

$$F_E(\vec{x}, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f_n(\vec{x}, t) \quad (3.42)$$

Una gran mayoría de los flujos de importancia en ingeniería son turbulentos, por lo que el régimen de flujo turbulento no es solo de interés teórico. Dentro de las características que poseen los flujos turbulentos, se destaca [46, 48]:

1. Irregularidad: Uno de los aspectos característicos de la turbulencia es su irregularidad y comportamiento aleatorio al momento de su análisis, lo que requiere de la implementación métodos estadísticos para estudiar las variables de interés.
2. Existencia de vórtices: la turbulencia se define como un fenómeno aleatorio, irregular y tridimensional, donde gran parte de estos aspectos se manifiestan de forma visible mediante estructuras rotacionales llamadas vórtices (eddies). Dichas estructuras presentan escalas,

donde los de mayor tamaño son justamente los de mayor escala, y los de menor escala de menor tamaño. Las estructuras rotacionales coexisten con las líneas de flujo principal, las que interactúan extrayendo energía cinética de las líneas de flujo principales, como también generando un aumento en la transferencia de momentum, energía y materia.

3. Escala de turbulencia: Como se mencionó, la turbulencia tiene escalas manifestadas en el tamaño de sus vórtices o eddies. Si se realiza un análisis de Fourier de cada propiedad fluctuante de interés, se observaría un proceso de “cascada de la turbulencia”, donde a medida que decae la turbulencia la energía cinética se transfiere de los vórtices más grandes a los más pequeños, que en última instancia los de menor tamaño se disipan en forma de calor (viscosidad molecular). Esto conlleva a tildar a los flujos turbulentos como disipativos.
4. Difusividad turbulenta: Debido a que la incidencia de los vórtices de mayor tamaño determinan el comportamiento del flujo turbulento, estos son los responsables de aumentar la difusividad en este tipo de regímenes. Desde un punto de vista de ingeniería, el flujo turbulento posee una difusión adicional, lo que aumenta la transferencia de masa, momentum y energía.

Físicamente es posible comprender el aumento de las tasas de transferencia de momentum si se contempla la incidencia que tiene los eddies de mayor tamaño (que su escala son comparables al flujo principal), ya que pueden arrastrar partículas que se encuentran lejanas entre sí, aumentando así el mezclamiento dentro del flujo. Ahora bien, para comprender la existencia de las escalas de vórtices en un flujo, se debe mencionar el fenómeno de “vortex stretching”. Recordando que los vórtices están superpuestos a las líneas de flujo principal, los gradientes de velocidad de este flujo interactúan distorsionando a los eddies de mayor tamaño, estirándolos (stretching) a medida que transcurre el tiempo y generando eddies de menor tamaño. Si se toma en cuenta que el momento angular se conserva durante el estiramiento, la velocidad de giro aumentará a medida que el radio de los eddies disminuya durante el proceso. Si embargo, se debe destacar que el estiramiento de los eddies de menor tamaño es ejercido principalmente por los vórtices de mayor tamaño y en menor medida por el flujo principal.

De esta manera, se concluye que la energía cinética se transfiere de los vórtices de mayor escala a los de menor tamaño, generando lo que se denomina “Cascada de energía” [49]. Es posible observar una amplia gama de energía descrita mediante análisis de frecuencia o número de onda para un flujo turbulento. Esto comúnmente se visualiza gracias al análisis de energía espectral $E(\kappa)$, como se observa en la Figura 3.52.

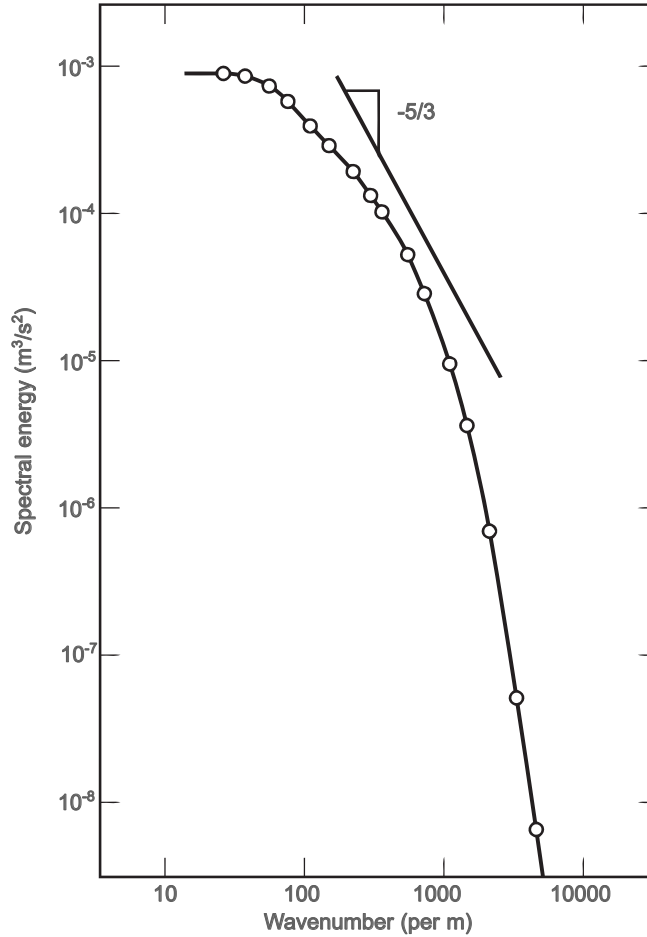


Figura 3.52: Energía espectral de la turbulencia [49]

Se define $E(\kappa)$ como la energía cinética por unidad de masa y por unidad de número de onda de las fluctuaciones en función de un número de onda κ . Siendo el número de onda $\kappa = 2\pi/\lambda$, donde λ es la longitud de onda de los eddies.

La Figura 3.52 demuestra que el contenido de energía tiene un máximo para números de onda bajos, lo que se interpreta en que los vórtices de mayor tamaño presenten una mayor cantidad de energía. Posteriormente, la magnitud de la energía disminuye rápidamente a medida que aumenta el número de onda, por lo que los eddies más pequeños tienen un contenido de energía más bajo (como ya se había mencionado bajo el fenómeno de cascada energética). Finalmente, para longitudes del orden de 0.1 a 0.01 mm (frecuencias alrededor de 10 kHz), están dominadas por efectos viscosos (escala de Kolmogorov) [49]. El comportamiento de los eddies de mayor tamaño resulta ser independiente de su viscosidad, pero si está más relacionado a la escala de velocidad ϑ y de largo ℓ . Esto lo clasifica como estructuras anisotrópicas, que son fuertemente afectadas por las condiciones de borde que impone el dominio y/o fenómeno de estudio. El caso contrario son los eddies de la escala de Kolmogorov, ya que su relación en torno a la energía espectral es netamente la tasa de disipación

de energía turbulenta ϵ (m2/s3) y su viscosidad cinemática ν .

3.4.1 Turbulencia y sus modelos

Considerando la complejidad de la turbulencia y la falta de comprensión física suficiente de sus mecanismos, se han desarrollado modelos y correlaciones empíricas para su análisis. En términos generales, los modelos de turbulencia se pueden dividir en tres grupos [49]:

1. RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes): Los modelos RANS no buscan resolver al detalle las fluctuaciones turbulentas, ya que se basan en el flujo promedio estimando los efectos de la turbulencia sobre dicha media. Lo anterior posiciona a los modelos RANS con los costos computacionales más moderados, lo que permite que tanto el área académica e ingenieril puedan implementar modelos de turbulencia en sus investigaciones. Para abordar los efectos turbulentos en la práctica, se promedia en el tiempo la ecuación de Navier Stokes como se expresa en la Ecuación (3.43) en relación a una componente de la ecuación de momentum.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div}(U\vec{U}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \text{div}(\text{grad}(U)) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial(-\overline{\rho u'^2})}{\partial x} + \frac{\partial(-\overline{\rho u'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{\rho u'w'})}{\partial z} \right) \quad (3.43)$$

Los últimos términos del lado derecho de la Ecuación (3.43) se les conoce como “Reynolds stresses”, que representan la incidencia de la turbulencia en el flujo medio. Estos términos son estimados mediante ecuaciones de transporte adicionales, donde cada modelo RANS se basa en la cantidad y elección de ecuaciones de transporte adicionales requeridas para resolver la ecuación de flujo general planteada, como se resume en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Clasificación de modelos RANS [49]

N° de ecuaciones adicionales	Modelo
0	Mixing length
1	Spalart- Allmaras
2	$k-\epsilon$
	$k-\omega$
	Algebraic stress
7	Reynolds stress

Diametralmente en ingeniería, los modelos RANS más utilizados son “Mixing length” y “ $k-\epsilon$ ”. Estos presentan una analogía en torno a la acción de los “viscous stresses” y “Reynolds stresses” sobre el flujo medio. Boussinesq propuso en 1877 que los “Reynolds stresses” podrían ser proporcionales a las tasas promedio de deformación, como se expresa en la Ecuación (3.44).

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3.44)$$

Siendo, k la “energía cinética turbulenta”, μ_t la viscosidad de la turbulencia y δ_{ij} el “delta de Kronecker”. Con respecto a la interpretación de la “energía cinética turbulenta”, es posible de estimar según la Ecuación (3.45).

$$k = (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (3.45)$$

Finalmente, el planteamiento de Boussinesq implica asumir que los “Reynolds stresses” son isotrópicos.

2. Large eddy simulation (LES): De manera general, el método LES genera una diferenciación según la escala de los vórtices, donde los de mayor tamaño son calculados, y los de menor escala, modelados. La influencia de los eddies de mayor tamaño en el flujo general sugiere la búsqueda de modelos que consideren una diferenciación, ya que estos son los que presentan una extracción energética directa del flujo principal, además de ser anisotrópicos. Por otro lado, los vórtices pequeños, debido al efecto de la cascada de energía, presentan una menor magnitud de energía cinética turbulenta, además de no presentar gran influencia sobre el flujo principal (la extracción de energía ejercida es sobre los vórtices de mayor tamaño, según los descrito por el fenómeno de “vortex stretching”), permitiendo considerarlos isotrópicos. LES para llevar a cabo la diferenciación entre vórtices, en primer lugar realiza una operación de filtrado espacial para separar los eddies por escalas de tamaño. Esto se lleva a cabo mediante una selección con una función de filtrado y un ancho de corte determinado para finalmente, resolver en un cálculo de flujo inestable todos los vórtices de mayor tamaño que el ancho de corte. De forma paralela, se desarrolla un modelo de sub-grilla para determinar el efecto de los eddies que quedan fuera de dicho filtrado, que se entienden como los vórtices de menor tamaño (isotrópicos).
3. Direct numerical simulation (DNS): El enfoque más preciso para la simulación de la turbulencia, es resolver las ecuaciones de Navier-Stokes sin promediarlas previamente. DNS resuelve todos los movimientos contenidos en el flujo, donde el flujo calculado es equivalente a un experimento de laboratorio de corta duración. Dentro de las consideraciones, se debe asegurar que el dominio sobre el cual se realiza la computación debe ser al menos tan grande como el dominio físico a considerar o la escala del eddie de mayor tamaño que se podría generar [50]. Con respecto a la malla requerida, se exige de una calidad y tamaño suficientemente fino para resolver las escalas de Kolmogorov, ya que no utiliza modelos de sub-grilla como LES [49].

La implementación de cada modelo (RANS, LES, DNS), no solo depende del detalle que se espera obtener como se observa en la Figura 3.53 (la velocidad es diferente para cada caso, siendo DNS el que presenta una mayor cercanía a la inestabilidad inherente de un flujo turbulento), sino también

de los recursos computacionales que se presentan a la hora de realizar un estudio CFD. Si se compara con los métodos RANS, LES proporciona detalles sobre el flujo, permitiendo modelar fenómenos de flujo y transporte causados por fluctuaciones turbulentas locales, ya que RANS promedia de forma transversal dichas fluctuaciones. DNS conlleva el costo computacional más alto de todos, además de un compromiso irrestricto con la calidad de malla, por lo que analizar previamente si es fundamental o no el cálculo de los eddies de menor tamaño para el fenómeno de estudio, resultaría útil considerar un esquema que solo contemple en detalle la interacción de los eddies de gran escala (LES), o si es un caso en que solo se requiere estimar la incidencia de la turbulencia en el flujo medio que gobierna el problema (RANS).

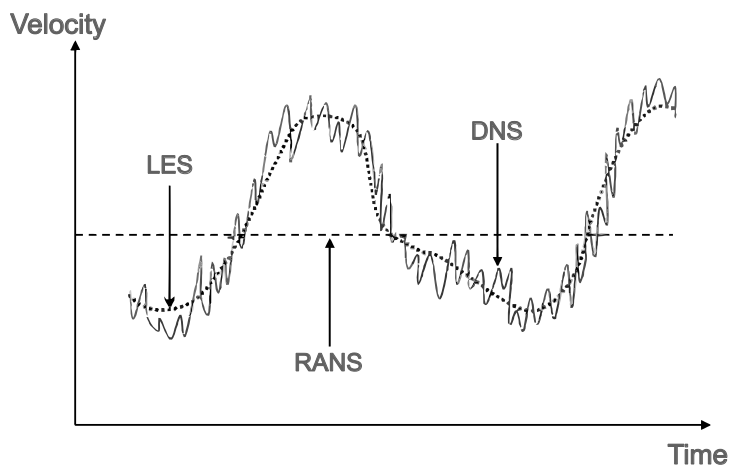


Figura 3.53: Comparación de velocidad en un punto para un flujo turbulento según modelo de turbulencia [50]

3.5 Análisis espectral

El comportamiento del perfil de velocidad, tanto en el dominio como el del rotor de un aerogenerador, resulta un tanto complejo de analizar de forma temporal, ya que además de poseer una variación en su magnitud, el comportamiento oscilatorio dificulta una conclusión numérica que justifique si se está en presencias de un régimen laminar o turbulento. En el estudio de señales, existe la alternativa de generar un espectro (en términos de frecuencias) de una señal temporal, que si es aplicado en este contexto, es posible identificar los componentes en frecuencias (FFT) que conforman a la señal temporal, como también reconocer el régimen del flujo exactamente en el instante en que se realiza la extracción de datos temporales, ya que mediante la densidad de potencia del espectro (PSD), es posible observar la existencia de la cascada de energía, descrita por la Figura 3.52.

Para procesar y analizar respuestas de un sistema donde no se conoce de forma analítica, pero si se tiene una secuencia finita de valores numéricos, la descripción de dicha señal en el dominio de

frecuencia (espectro) puede ser obtenida a través de una serie de Fourier de tiempo discreto. Un algoritmo utilizado de forma transversal para obtener el espectro de frecuencias, es la “transformada rápida de Fourier”(FFT). Esta metodología permite reducir drásticamente el costo computacional y tiempo requerido para obtener una transformada de Fourier discreta para una secuencia finita de datos. Al ser un algoritmo que requiere de un conjunto de datos, de forma análoga a la transformada discreta de Fourier, mientras mayor sea la cantidad de datos disponibles, más preciso resultará el análisis en frecuencias de las señales a tratar.

3.5.1 Transformada de Fourier discreta [51]

Sea un conjunto de datos $y[t]$ que tiene un largo N , es posible estimar una serie de Fourier según la Ecuación (3.46).

$$y[t] = \sum_{n=0}^{N-1} C_n e^{j\theta_0 nt}; \quad \theta_0 = \frac{2\pi}{N} \quad (3.46)$$

Los coeficientes de la serie anterior se estiman gracias a la Ecuación (3.47).

$$C_n = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} y[t] e^{-j\theta_0 nt} \quad (3.47)$$

Es posible reescribir la Ecuación (3.46), de tal forma que sus coeficientes sean definidos como elementos de un vector, que es resultado de un producto matricial.

Se reescribe en primer lugar la constante W_N según la Ecuación (3.48).

$$W_N = e^{j\theta_0} = e^{j\frac{2\pi}{N}} \quad (3.48)$$

Los coeficientes de igual forma se reescriben como la Ecuación (3.49).

$$H_N = N C_n = \sum_{t=0}^{N-1} y[t] W_N^{-nt} \quad (3.49)$$

Finalmente, reemplazando las ecuaciones (3.48),(3.49) en la serie de Fourier desarrollada en la Ecuación (3.46), se obtiene la Ecuación (3.50).

$$y[t] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} H_n W_N^{nt} \quad (3.50)$$

Se debe recalcar que el calculo de la transformada de Fourier discreta de largo N requiere de un

orden de N^2 operaciones.

3.5.2 Transformada rápida de Fourier (FFT) [51]

Para disminuir el número de cálculos de la transformada de Fourier discreta, se debe utilizar un conjunto de $y[t]$ que tenga un largo en potencia de 2, como se expresa de forma elocuente en la Ecuación (3.51).

$$N = 2^v; \quad v \in \mathbb{Z}^+ \quad (3.51)$$

Analizando la Ecuación (3.49), es posible separar la secuencia en dos subsecuencias. Una está compuesta por $y[t]$ para t par, y otra para t impar, como lo indica la Ecuación (3.52).

$$H_n = \sum_{t=0}^{N-1} y[t] W_N^{-nt} = \sum_{r=0}^{N/2-1} y[2r] W_N^{-n(2r)} + \sum_{r=0}^{N/2-1} y[2r+1] W_N^{-n(2r+1)} \quad (3.52)$$

Considerando las subsecuencias, los términos W_N se entienden según la Ecuación (3.53).

$$W_N^{-n(2r)} = e^{-j \frac{2\pi}{N} n(2r)} = e^{-j \frac{2\pi}{N/2} n(r)} = W_{N/2}^{-nr} \quad (3.53)$$

Los coeficientes de las series de Fourier de las subsecuencias par e impar se plantean finalmente en la Ecuación (3.54).

$$H_n = \sum_{r=0}^{N/2-1} y[2r] W_{N/2}^{-nr} + W_N^{-n} \sum_{r=0}^{N/2-1} y[2r+1] W_{N/2}^{-nr} = H_n^{par} + W_N^{-n} H_n^{impar} \quad (3.54)$$

Este algoritmo requiere un orden de $N \log_2 N = Nv$ operaciones para calcular la transformada de Fourier discreta con un largo $N = 2^v$.

3.5.3 Densidad de potencia espectral (PSD)

Afirmar la existencia de turbulencia en un flujo que se tiene información de su perfil de velocidad en el tiempo, sugiere de forma intuitiva analizar el tamaño de sus vórtices (eddies), pero resulta un tanto abstracto si no se puede acoplar el concepto de largo de eddies con la cascada de energía $E(\kappa)$, descrita a grandes rasgos en la Sección (3.4), que es la metodología y herramienta que permite afirmar la presencia de dicho régimen de flujo. Es posible vincular la energía cinética contenida $E(\kappa)$ con κ , que se define como el número de onda de la señal a estudiar, que este a su vez está en función de la longitud de onda (λ) expresada por la Ecuación (3.55).

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.55)$$

La longitud de onda (λ), es la variable que se puede asociar a un tamaño de vórtice, por lo que si un flujo turbulento posee una diversidad en torno a la distribución de sus tamaños, la energía cinética de la turbulencia contenida entre los números de onda κ y $\kappa + d\kappa$ (que es el recíproco de λ), se puede estimar gracias a la Ecuación (3.56).

$$k \equiv \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \int_0^\infty E(\kappa) d\kappa \quad (3.56)$$

Evidenciar un κ pequeño (una longitud de onda grande λ), se traduce en que su tamaño de vórtice es considerable, que expresado en términos de $E(\kappa)$, contextualizado en su distribución o cascada de energía, sugiere una mayor magnitud. La distribución de $E(\kappa)$ se representa en la Figura 3.54.

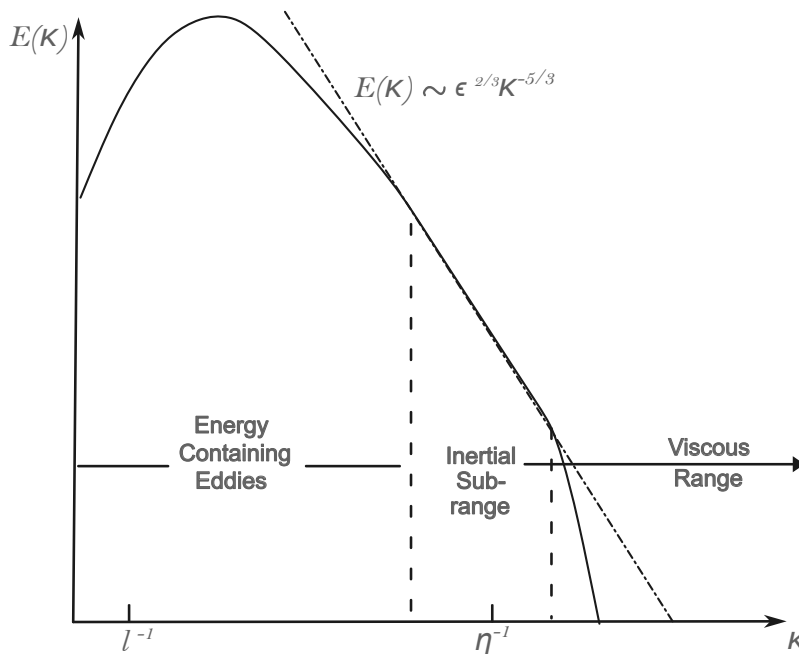


Figura 3.54: Espectro de energía de un flujo turbulento [48]

Siendo ℓ el largo en escala integral y η el largo en la escala de kolmogorov de los eddies. Con respecto a las subdivisiones expuestas en la Figura 3.54, se pueden describir a grandes rasgos según:

- Energético (energy containing eddies): la energía cinética turbulenta es obtenida desde los gradientes de velocidad del flujo principal hacia los vórtices de mayor tamaño, que se encuentran en la escala integral (mayor tamaño).
- Inercial (inertial sub-range): teniendo en cuenta que los vórtices de mayor tamaño poseen energía cinética desde el flujo principal, ahora dicha energía a partir del estiramiento de los vórtices debido al flujo principal se transmite a eddies de menor tamaño, que entran en la escala de Taylor.

- Disipativo (viscous range): acá la transferencia de energía turbulenta es la conmutación de cinética a calor, debido a los términos viscosos. La escala de estos eddies de menor tamaño, que a su vez son considerados isotrópicos, es la de Kolmogorov.

Resulta de interés analizar el rango inercial, ya que si existe una transmisión de energía cinética a eddies de menor tamaño, existiría la cascada de energía, que a su vez confirmaría la presencia de un régimen turbulento. En esta escala, los valores de κ son lo suficientemente bajos para que la viscosidad afecte, pero muy grandes como para que el grosor de capa límite no sea relevante. En dicho sector del espectro energético, es posible estimar su comportamiento según la Ecuación (3.57).

$$E(\kappa) = C_\kappa \epsilon^{2/3} \kappa^{-5/3}, \quad \frac{1}{\ell} \ll \kappa \ll \frac{1}{\eta} \quad (3.57)$$

Donde C_κ es la constante de Kolmogorov. Es importante destacar el valor de $-5/3$, ya que si se obtiene una pendiente de dicho valor en estudio de PSD de flujo turbulento, se puede afirmar que el régimen es tal [48].

Capítulo 4

Modelo Computacional

En el presente capítulo se detalla el modelo computacional utilizado para estudiar la operación de un aerogenerador VAWT (H-rotor) expuesto a diversos flujos de aire incidente. Se describe la geometría y sus secciones, discretización del dominio (malla), métodos numéricos para desarrollar los esquemas de rotación de la turbina (6DOF), como también las ecuaciones de transporte gobernantes y su modelo de turbulencia a implementar (LES).

4.1 Dominio

Se considera una dominio 2D con una sección móvil que describa al aerogenerador vertical (rotor) y otra estacionaria que modele el flujo libre (Figura 4.1).

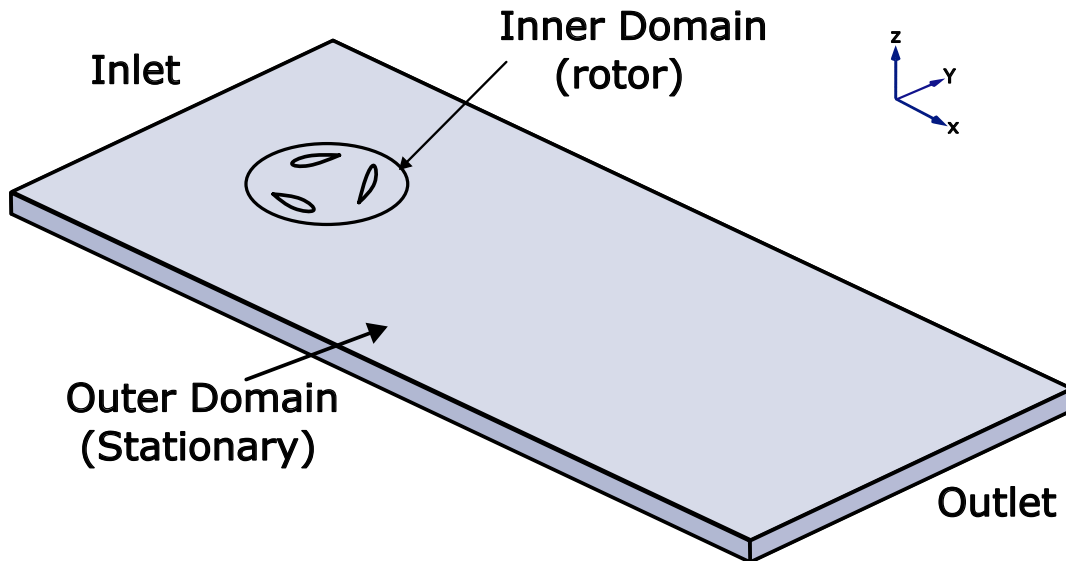


Figura 4.1: Diagrama 2D del dominio del problema

Las proporciones se establecieron en base a estudios CFD de turbinas VAWT utilizando esquema de turbulencia LES [52]. De forma general, la Figura 4.2 evidencia una simetría en torno a la altura neta del dominio en términos del diámetro de rotor (D), logrando ser de $5D$. El largo del sector aguas arriba y abajo del aerogenerador es de $5D$ y $10D$, respectivamente.

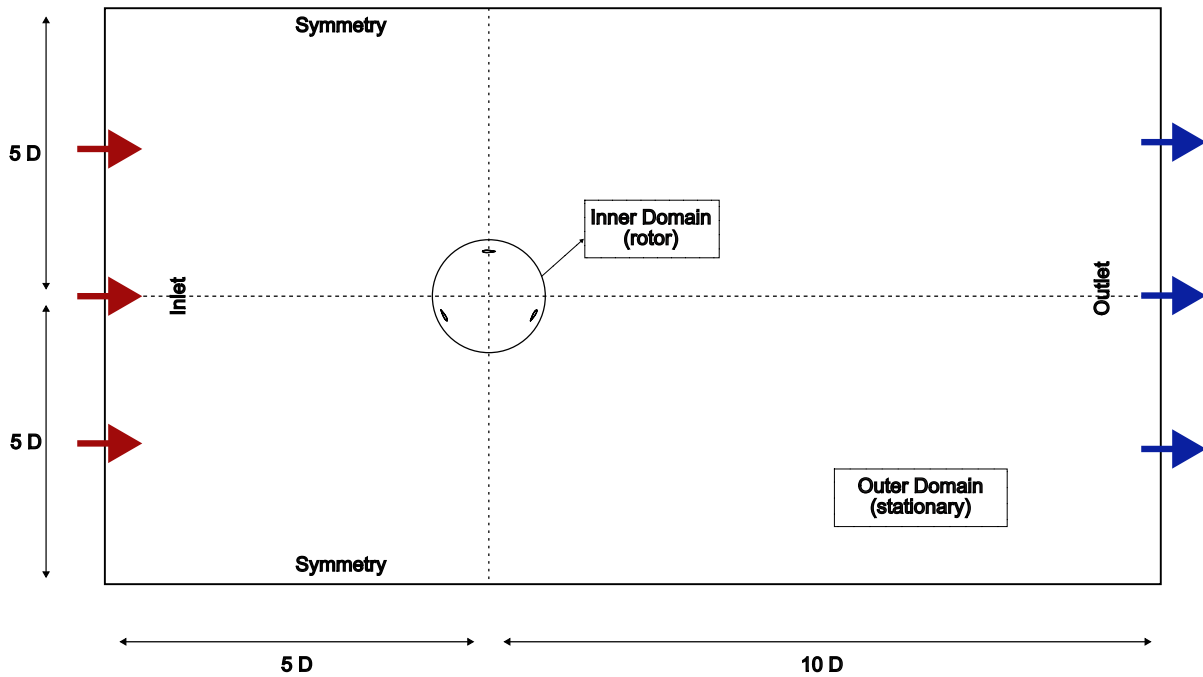


Figura 4.2: Dimensiones de dominio 2D

El dominio interno consta de 3 secciones de aspa (airfoil), dispuestas en referencia al plano angular azimutal (θ) con un desplazamiento de 120° entre si, como se aprecia en la Figura 4.3(a). La unidad de referencia utilizada para el esquema global (D) está en relación al valor del chord (C) de los airfoils, resultando ser $1D = 6C$. El chord de cada airfoil NACA0018 es de 0.3 (m), siendo un diámetro de rotor (D) de 1.8 (m) como se observa la Figura 4.3(b).

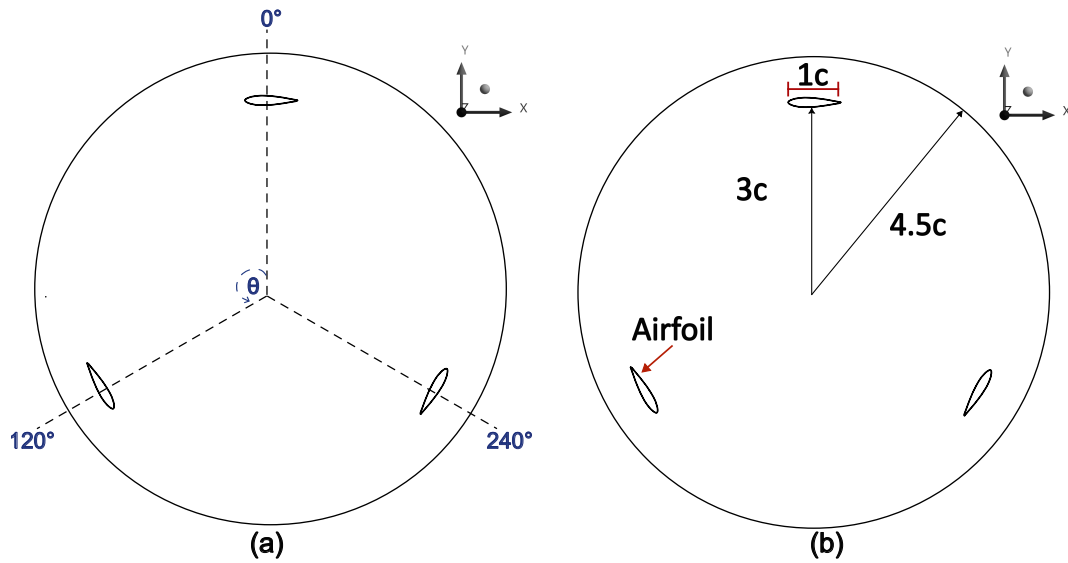


Figura 4.3: (a) Configuración angular azimutal de airfoils, dominio interno. (b) Valores paramétricos del dominio interno

4.2 Discretización del dominio

La discretización del dominio fue llevada a cabo mediante el software ANSYS Mesher. Con la finalidad de disminuir el tiempo de cálculo para un modelo 3D que exige un esquema de turbulencia LES, se propone una sección del dominio discretizada mediante una malla híbrida (estructurada y no estructurada) con 1 elemento de 30 (mm) de grosor (2D). La determinación en generar un mallado mixto o híbrido, es debido a la necesidad de disminuir el error numérico asociado al cambio de posición del sub-dominio móvil (rotor), ya que requiere de transiciones suaves independiente de su posición (sliding mesh).

Las métricas generales del esquema se resumen en una calidad mínima ortogonal de 0.954, razón de aspecto de 14.6 y un skewness crítico de 0.67.

La Figura 4.4(c) representa la discretización del sub-dominio móvil (rotor), donde se destaca la construcción de elementos exclusivamente cuadriláteros para aquellos que son colindantes o cercanos a cada airfoil (aspa), además de cumplir con valores de altura de 0.13 (mm) para el primer elemento que está en contacto con dichos sólidos. Debido a la geometría rectangular del sub-dominio externo, añadiendo la cualidad de no poseer sólidos que requieran de un detalle riguroso en torno a sus elementos adyacentes, es posible lograr una malla 100% cuadrilátera como lo demuestra la Figura 4.4(a). Se debe destacar que en el caso del contorno al sub-dominio móvil, existe una disminución en tamaño de elemento para lograr transiciones suaves entre cada dominio, concluyendo un tamaño de malla de 143,000 volúmenes finitos.

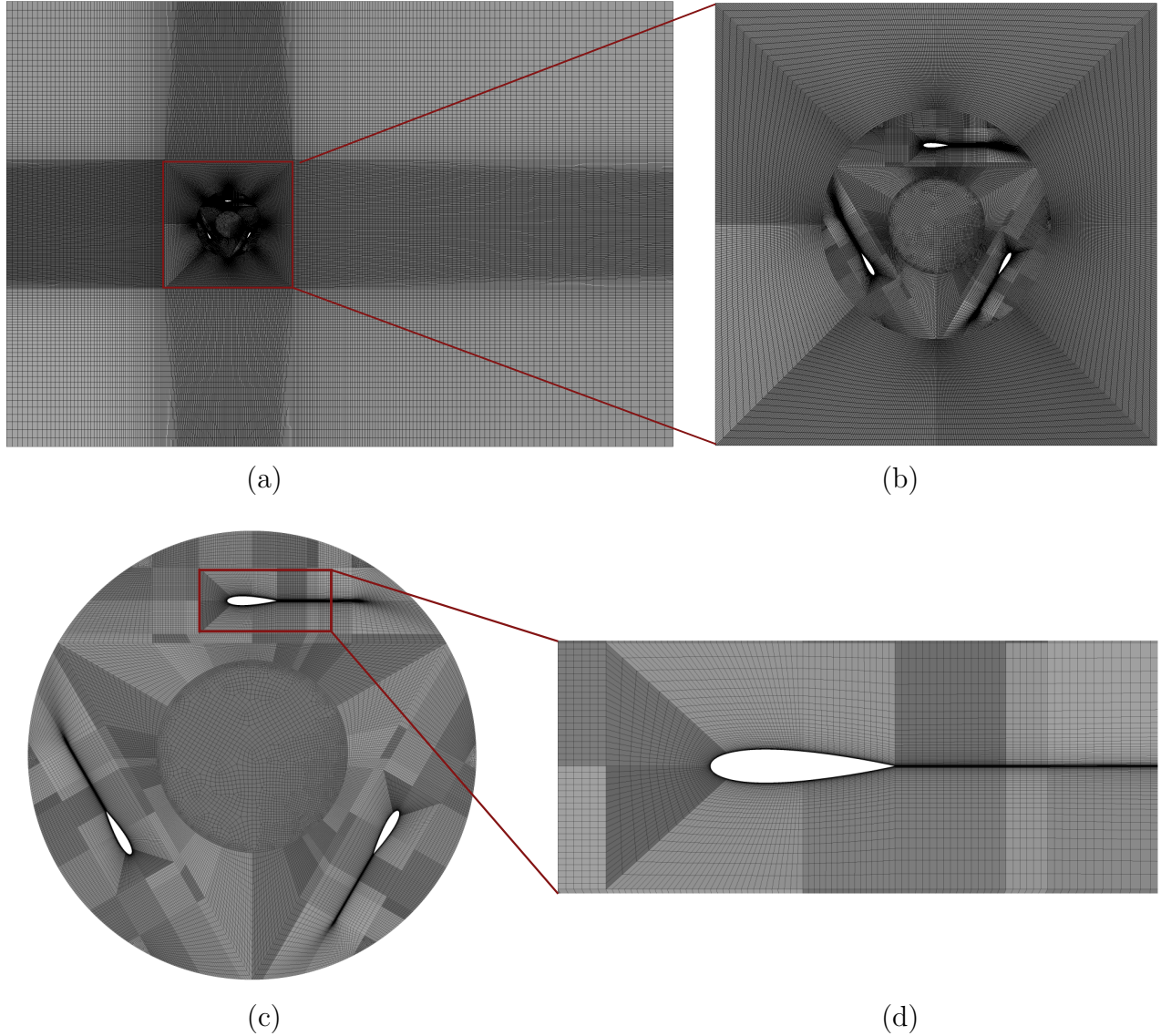


Figura 4.4: Vista superior: (a) dominio global; (b) detalle contorno del rotor; (c) sub-dominio móvil; (d) detalle airfoil.

El fluido utilizado es aire, que presenta una densidad y viscosidad constante a lo largo del dominio (1.225 kgm^{-3} y $1.789 \times 10^{-5} \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$, respectivamente). Mecanismos de transferencia de calor no se consideran en el modelo de forma general.

4.3 Modelo de flujo LES

LES resuelve sólo el rango de eddies de escala grande a media, ya que son los dinámicamente influyentes para el flujo principal (interactúan directamente extrayendo energía del flujo medio). Los efectos de los vórtices de menor escala los modela mediante un esquema de sub-grilla, ya que

estos son los responsables de la disipación de energía turbulenta mediante los efectos viscosos, resultando necesario una estimación de su participación en el transporte de momento para el fenómeno de estudio [53].

En lugar del promedio en el tiempo (RANS), LES utiliza una operación de filtrado espacial con el fin de seleccionar los eddies de mayor tamaño, para posteriormente calcularlos. El planteamiento integral para obtener una variable filtrada, se expresa según la Ecuación (4.1).

$$\bar{\phi}(\vec{x}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\vec{x}, \vec{x}', \Delta) \phi(\vec{x}', \Delta) dx'_1 dx'_2 dx'_3 \quad (4.1)$$

Siendo $\bar{\phi}(\vec{x}, t)$ la función filtrada, $\phi(\vec{x}', \Delta)$ la función sin filtrar y Δ el ancho del filtro.

El ancho del filtro (Δ), se comprende como la medida en que se clasifican los eddies según su tamaño, ya que si son menor a dicho valor proceden a ser modelados por el esquema de sub-malla, y si es caso contrario, calculados por el esquema LES. En el área de CFD, por lo general se considera del mismo orden de magnitud que el tamaño de un volumen de control, como lo indica la Ecuación (4.2).

$$\Delta = \sqrt[3]{\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3} \quad (4.2)$$

Con respecto a la función de filtrado ($G(\vec{x}, \vec{x}', \Delta)$), depende de su planteamiento finalmente los resultados, o en este caso, los eddies que se consideran en el cálculo LES. En aplicaciones de volúmenes finitos, el filtro “Top-Hat” es transversalmente utilizado [49], planteado en la Ecuación (4.3).

$$G(\vec{x}, \vec{x}', t) = \begin{cases} 1/\Delta^3 & \left| \vec{x} - \vec{x}' \right| \leq \Delta/2 \\ 0 & \left| \vec{x} - \vec{x}' \right| > \Delta/2 \end{cases} \quad (4.3)$$

Teniendo en cuenta que el filtrado es una operación lineal, se puede aplicar de forma homologa al caso RANS, tanto para la conservación de materia y momentum (Navier Stokes). Con respecto a la ecuación de continuidad, el filtrado espacial resulta para un caso incompresible ($\text{div}(\bar{\vec{u}}) = 0$) la Ecuación (4.4).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{\vec{u}}) = 0 \quad (4.4)$$

Recalcando que ($\bar{\vec{u}}$) es el filtrado espacial del vector velocidad en este caso, y no su promedio temporal. Realizando el filtrado para el caso de la ecuación de momentum, se comienza de forma general con la Ecuación (4.5).

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \text{div}(\overline{\rho u_i \vec{u}}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \text{div}(\text{grad}(\bar{u}_i)) \quad (4.5)$$

El término convectivo no resulta ser una simple evaluación posterior, por lo que se procede a utilizar la expresión indicada por la Ecuación (4.8).

$$\text{div}(\overline{u_i \bar{u}}) = \text{div}(\bar{u}_i \bar{u}) + (\text{div}(\overline{u_i \bar{u}}) - \text{div}(\bar{u}_i \bar{u})) \quad (4.6)$$

Reemplazando lo anterior, se obtiene la Ecuación (4.7).

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \text{div}(\bar{u}_i \bar{u}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \text{div}(\text{grad}(\bar{u}_i)) - (\text{div}(\overline{u_i \bar{u}}) - \text{div}(\bar{u}_i \bar{u})) \quad (4.7)$$

De todas formas existe la disyuntiva en torno a la expresión convectiva ($\text{div}(\overline{u_i \bar{u}})$), que es causada por el hecho de ejercer el filtrado espacial a la ecuación de Navier Stokes (similar al caso de tensiones de Reynolds para los modelos RANS), pero físicamente se interpretan como la interacción de los eddies no resueltos por el esquema LES con el flujo. Dichos términos se pueden expresar según la Ecuación (4.8), donde se les conoce como “sub-grid scale stresses”.

$$\tau_{ij}^s = \rho(\overline{u_i \bar{u}} - \bar{u}_i \bar{u}) = \rho(\overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j) \quad (4.8)$$

Para poder modelar dicho esfuerzo, se propone la descomposición de la Ecuación (4.9).

$$\phi(\vec{x}, t) = \bar{\phi}(\vec{x}, t) + \phi'(\vec{x}, t) \quad (4.9)$$

Donde $\bar{\phi}(\vec{x}, t)$ es la función filtrada (considerada por LES) y $\phi'(\vec{x}, t)$ son las variaciones espaciales no resultas por ser una escala de longitud menor al filtro (Δ). Aplicando lo anterior a la Ecuación (4.8), se obtiene la Ecuación (4.10).

$$\tau_{ij}^s = \rho(\overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j) = \rho((\overline{u_i \bar{u}_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j) + (\overline{u_i u'_j} + \overline{u'_j u_i}) + (\overline{u'_i u'_j})) \quad (4.10)$$

Clasificando cada término del esfuerzo de sub-malla, respectivamente se conoce [49]:

- Leonard stresses (L_{ij})
- Cross stresses (C_{ij})
- LES Reynolds stresses (R_{ij})

Dichos términos, en la práctica para modelos de CFD, se modelan todos de forma simultanea en los esquemas de sub-grilla, o ampliamente denominados “SGS”. Considerando el filtrado espacial, con los términos de esfuerzo adicionales de sub-malla, se obtiene finalmente la Ecuación (4.11), que es la ecuación de momentum para modelos LES [50].

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}_i\bar{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial\tau_{ij}^s}{\partial x_j} - \frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (4.11)$$

Modelos de sub-malla (SGS)

1. Smagorinsky -Lilly [49]: modelo de sub-malla basado en la hipótesis de Boussinesq (τ_{ij}^s es proporcional a la tasa de deformación local del flujo resuelto), proporcionando una aproximación o descripción de los efectos de eddies de menor tamaño sobre el flujo resuelto. Para aplicaciones de CFD, se toma en cuenta dicha aproximación tanto para Leonard stresses (L_{ij}), Cross stresses (C_{ij}) y LES Reynolds stresses (R_{ij}) de forma acoplada. El esfuerzo de sub malla (τ_{ij}^s), se describe en la Ecuación (4.12).

$$\tau_{ij}^s = -2\mu_{SGS}\overline{S_{ij}} + \frac{1}{3}\tau_{ii}\delta_{ij} = -\mu_{SGS} \left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{3}\tau_{ii}\delta_{ij} \quad (4.12)$$

Donde μ_{SGS} es la viscosidad SGS y δ_{ij} es el delta de kronecker.

Para determinar μ_{SGS} se utiliza el modelo de Prandtl (Mixing length), donde la escala de longitud (ℓ) es el ancho del filtro (Δ), y la escala de velocidad (ϑ), se determina mediante la Ecuación (4.13), teniendo en cuenta que la tasa de deformación ($|\overline{S}|$) se obtiene según la Ecuación (4.14).

$$\vartheta = \Delta |\overline{S}| \quad (4.13)$$

$$|\overline{S}| = \sqrt{2\overline{S_{ij}} \cdot \overline{S_{ij}}} \quad (4.14)$$

Finalmente, μ_{SGS} tomando en cuenta el modelo de Prandtl, se obtiene mediante la Ecuación (4.15).

$$\mu_{SGS} = \rho(C_{SGS}\Delta)^2 |\overline{S}| = \rho(C_{SGS}\Delta)^2 \sqrt{2\overline{S_{ij}} \cdot \overline{S_{ij}}} \quad (4.15)$$

2. Dynamic kinetic energy (DKE): Para los modelos SGS que se basan en el modelo de Prandtl, tienen como supuesto intrínseco la existencia de un equilibrio entre la energía transferida a través del escala LES y la disipación de energía cinética en pequeñas escalas de sub-grilla. La turbulencia a escala de eddies de menor tamaño puede ser representado más fielmente por la estimación del transporte de la energía cinética turbulenta SGS (k_{sgs}), que se plantea según su ecuación de transporte [54].

Es posible expresar el esfuerzo de sub-malla en términos de k_{sgs} , según la Ecuación (4.16).

$$\tau_{ij}^s = \frac{2}{3}\rho k_{SGS}\delta_{ij} - 2C_k\rho k_{SGS}^{0.5}\Delta\overline{S_{ij}} \quad (4.16)$$

La energía cinética de sub-malla (k_{sgs}) se obtiene resolviendo la Ecuación (4.17).

$$\frac{\partial(\rho\overline{k_{sgs}})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\overline{u_i k_{sgs}})}{\partial x_j} = -\tau_{ij}^s \frac{\partial\overline{u_i}}{\partial x_j} - C_\epsilon \rho \frac{k_{sgs}^{3/2}}{\Delta} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{sgs}}{\sigma_k} \frac{\partial k_{sgs}}{\partial x_j} \right) \quad (4.17)$$

Es posible expresar μ_{sgs} en términos de k_{sgs} , según la Ecuación 4.18.

$$\mu_{sgs} = C_k \rho k_{sgs}^{1/2} \Delta \quad (4.18)$$

Siendo las constantes C_k y C_ϵ determinadas dinámicamente por cada calculo del modelo, pero la constante σ_k tiene un valor de 1.

Para llevar a cabo el procedimiento dinámico, se plantea la hipótesis sobre la existencia de una correlación significativa entre la escala de sub-malla τ_{ij} y la tensión de Leonard en la escala de sub-prueba L_{ij} [54]. Con dicho planteamiento es posible obtener las constantes (C_k y C_ϵ) en términos de (k_{test}), que es la energía cinética asociada a la Ecuación (4.19), entendida como la parametrización del “Leonard stress” posterior a la aplicación de un filtro de prueba ($\widehat{\Delta}$) [54].

$$L_{ij} = (\widehat{u_i u_j} - \widehat{u_i} \widehat{u_j}) = -2C_\tau \widehat{\Delta} k_{test}^{1/2} \widehat{S_{ij}} + \frac{1}{3} L_{kk} \delta_{ij} \quad (4.19)$$

4.3.1 Condiciones de frontera

Las condiciones de borde se diferencian tanto para el flujo libre como para los sólidos en movimiento, que en este caso resultan ser los airfoils o aspas del aerogenerador.

1. Airfoils: se considera la condición de no deslizamiento (no-slip condition) para cada sólido previamente definido, que se expresa según la Ecuación (4.20).

$$(v_x, v_y, v_z) = (0, 0, 0) \quad (\text{Pared de cada airfoil}) \quad (4.20)$$

2. Flujo libre: tomando en cuenta las paredes laterales (izquierda y derecha) y superiores e inferiores del dominio global como planos con esfuerzo cortante tangencial nulo, resultando

las ecuaciones (4.21), (4.22), (4.23), y (4.24):

$$\frac{\partial v_z}{\partial y} = 0 \quad (\text{Paredes laterales}) \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial y} = 0 \quad (\text{Paredes laterales}) \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial z} = 0 \quad (\text{Paredes superior e inferior}) \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial z} = 0 \quad (\text{Paredes superior e inferior}) \quad (4.24)$$

3. Entrada (inlet): la entrada de flujo se configura según sea el experimento, ya que la finalidad es evaluar la incidencia de diversos regímenes de flujo (laminar o turbulento) en el rendimiento del aerogenerador. De forma transversal, la magnitud de la velocidad es de 9 m/s para cada caso, donde los regímenes se modelaron cómo:

- Turbulento: se utiliza el método “Spectral synthesizer” de Fluent para describir el comportamiento de un inlet turbulento. La intensidad turbulenta (I_t) es de 10%, ya que es un valor representativo de flujos urbanos, “turbulent viscosity” ratio de 10% y un “subgrid turbulent intensity” de 10%.
- Laminar estacionario: al tratarse de un caso con un comportamiento invariante de velocidad, se selecciona la opción de “sin perturbaciones” con una intensidad turbulenta nula (I_t) y un “subgrid kinetic energy” de 0 (m^2/s^2).
- Laminar no estacionario (pulsante): el perfil sinusoidal se describe mediante una función definida por usuario (UDF), pero se selecciona “sin perturbaciones” y una intensidad turbulenta nula. Para obtener un perfil de magnitud media de 9 (m/s) y una intensidad turbulenta de 10%, se utilizó la Ecuación (4.25).

$$v(t) = V_0 + G \cdot \sin(\omega \cdot t) = 9 + 1.27 \sin(2\pi t \cdot 5) \quad (4.25)$$

Los parámetros de la función anterior están sujetos a una frecuencia de 5 (Hz), ya que dicho valor representa la frecuencia máxima que reacciona la turbina a modelar según su estudio dimensional [11] desarrollado por la Ecuación (4.26).

$$\frac{\overline{V_w}}{F_z} > D_T \rightarrow F_z \leq 5(\text{Hz}) \quad (4.26)$$

Siendo $\overline{V_w}$ el valor medio de velocidad del viento y D_T el diámetro de la turbina modelada.

4. Salida (outlet): se configura como salida de presión con magnitud 0 (Pa) manométrica.

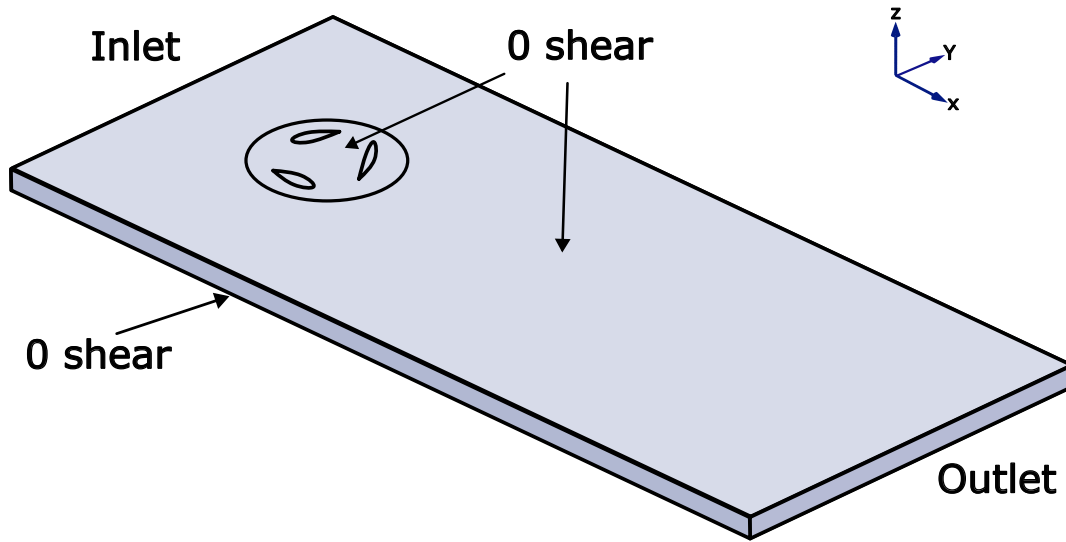


Figura 4.5: Diagrama 2D del dominio, condiciones de borde

4.3.2 Métodos de resolución numérica del modelo

Los problemas que contemplen de forma simultanea la resolución del campo de presión y de velocidad (no lineales, convectivos), se deben abordar con métodos iterativos que acoplen dichos parametros de la ecuación de momento. El esquema “Semi - implicit method for pressure linked equation” (SIMPLE), es un algoritmo desarrollado por el profesor Patankar en 1972. En primera instancia, los flujos a determinar son calculados a partir de una “supuesta presión” (p^*), para proceder según [49]:

- Resolver ecuación de momento para obtener el campo de velocidad intermedio (u^*)
- Evaluar la ecuación de continuidad en la forma de una ecuación para la corrección de presión (p')
- La corrección de los campos de presión y velocidad, se formulan según las ecuaciones (4.27),(4.28) (que tienen su nomenclatura en términos de nodos (I, \mathcal{J}) y caras (i, j)), respectivamente.

$$p_{I, \mathcal{J}} = p_{I, \mathcal{J}}^* + p'_{I, \mathcal{J}} \quad (4.27)$$

$$u_{i, \mathcal{J}} = u_{i, \mathcal{J}}^* + d_{i, \mathcal{J}}(p'_{I-1, \mathcal{J}} - p'_{I+1, \mathcal{J}}) \quad (4.28)$$

Se repiten los pasos anteriores hasta lograr convergencia de los campos de velocidad y presión que describen la fenomenología.

Las discretizaciones para el modelo, se resumen en:

- Gradiente: Mínimos cuadrados.
- Presión: Segundo orden.
- Momentum: Diferenciación central acotada.
- Energía cinética de sub-grilla: Segundo orden Upwind.

4.4 Modelo 6DOF

El método de seis grados de libertad permite describir la posición y orientación de un sólido que puede estar sujeto a un movimiento de rotación y/o de traslación, pero para llevarse a cabo, el software utiliza las fuerzas y momentos del objeto para calcular la traslación y movimiento angular del centro de gravedad del objeto en estudio [36].

El planteamiento general del movimiento rotacional de un sólido presente en el dominio, se plantea según la Ecuación (4.29).

$$\dot{\vec{\omega}}_B = L^{-1}(\sum \vec{M}_B - \vec{\omega}_B \times L\vec{\omega}_B) \quad (4.29)$$

Donde L es el tensor de inercia, \vec{M}_B es el vector de momento del cuerpo y $\vec{\omega}_B$ es el vector de velocidad angular del cuerpo rígido [36]. Para entender la referencia del momento, se debe tomar en cuenta que es posible transformar el momento desde un punto de vista inercial a coordenadas del cuerpo, mediante la matriz de transformación ortogonal R , como indica la Ecuación (4.30).

$$\vec{M}_B = R\vec{M}_G \quad (4.30)$$

Finalmente, la matriz de transformación R , tiene la forma:

$$\begin{bmatrix} C_\theta C_\psi & C_\theta S_\psi & -S_\theta \\ S_\phi S_\theta C_\psi - C_\phi S_\psi & S_\phi S_\theta S_\psi + C_\phi C_\psi & S_\phi C_\theta \\ C_\phi S_\theta C_\psi + S_\phi S_\psi & C_\phi S_\theta S_\psi - S_\phi C_\psi & C_\phi C_\theta \end{bmatrix}$$

Los términos empleados en la matriz de transformación se entienden como $C_p = \cos(p)$ y $S_p = \sin(p)$. Con respecto a la referencia de los ángulos de Euler ϕ , θ y ψ , corresponden a la siguiente convención de rotación:

- Rotación alrededor del eje Z (yaw)
- Rotación alrededor del eje Y (pitch)
- Rotación alrededor del eje X (roll)

Considerando que el momento externo de la Ecuación (4.29) no ha sido planteado, el software estima el momento rotacional (M) mediante el producto escalar del vector unitario en dirección del eje de rotación, con respecto a los aportes de presión y viscosidad. Resulta útil expresar de forma integral dicho cálculo, ya que se modela en términos de la superficie o pared que presenta un movimiento rotacional (S), resultando la Ecuación (4.31).

$$M = \left(\iint_S (\vec{r} \times (\bar{\tau} \cdot \hat{n}) dS) \right) \cdot \hat{a} \quad (4.31)$$

Siendo el tensor de esfuerzo total ($\bar{\tau}$) que contempla esfuerzos de presión y viscosos, vector normal a la superficie (\hat{n}), vector unitario en torno al eje de rotación (\hat{a}) y vector de posición (\vec{r}) [42].

4.4.1 Configuración general

Los parámetros necesarios para llevar a cabo una simulación de rotación de un cuerpo rígido en torno a un eje de rotación, se resume en:

- Momento de inercia (I): se considera como el producto entre la masa del cuerpo (m) y la distancia radial (r) al cuadrado con respecto al eje de referencia, como lo indica la Ecuación (4.32).

$$I = m \cdot r^2 \quad (4.32)$$

- Masa de aerogenerador: de forma transversal, los modelos realizados mediante CFD consideran la masa puntual de cada airfoil en relación al eje de rotación, por lo que para cada cuerpo rígido (aspa) ingresado al modelo 6DOF debe contemplar su masa de forma particular.
- Centroide: al presentar un aerogenerador de 3 aspas como modelo, el centroide del aerogenerador se sitúa en el centro del dominio interno (rotor), que en este caso coincide con el origen del sistema de coordenadas previamente descrito.

Con el fin de obtener resultados representativos de un aerogenerador comercial, se debe considerar que el presente modelo CFD es una sección del aerogenerador, por lo tanto se debe realizar un escalamiento de dichos parámetros de cuerpo rígido.

Los parámetros de referencia para llevar a cabo el modelo se detallan en la Tabla 3.2, los cuales son los utilizados en modelos CFD 2.5D (sección de dominio) de aerogeneradores verticales (H-rotor) [55]. Tanto la magnitud de masa e inercia fueron validados por los autores de dicha investigación con los de una turbina VAWT disponible en el mercado.

El procedimiento para obtener los valores, tanto para el momento de inercia y la masa, se describen según la Ecuación (4.33). Lo anterior es posible de plantear en torno a la sección de profundidad del aspa, ya que tanto el chord length y el diámetro de rotor son comparables.

$$I_b = \frac{I_a \cdot L_b}{L_a} \quad (4.33)$$

Siendo I_b la inercia del modelo y L_b la profundidad del dominio del modelo.

Tabla 4.1: Configuración general 6DOF [55]

	Chord, m	Diámetro, m	Ancho, m	M.inercia, kgm ²	Masa, kg	Airfoil
Literatura	0.3	1.7	1	3.66	5.01	NACA0017
Modelo	0.3	1.8	0.03	0.123	0.152	NACA0018

Capítulo 5

Diseño experimental

En el presente capítulo se describe de forma general el diseño de experimentos tanto para el estudio paramétrico de dominio 2.5D, como también del análisis sobre la incidencia de régimen de flujo de entrada en el rendimiento de una turbina VAWT.

5.1 Simulaciones

5.1.1 Estudio paramétrico de modelo 2.5D

La variable a manipular en este arreglo de experimento es la anchura neta del dominio, como lo indica la Tabla 5.1. Los otros parámetros de diseño y operación son constantes.

Tabla 5.1: Lista de experimentos, estudio de dominio 2.5D

Simulación	Régimen inlet	Velocidad inlet, m/s	TI, %	Anchura dominio, mm	Modelo
1	Turbulento	7	5	0	LES
2	Turbulento	7	5	75	LES
3	Turbulento	7	5	150	LES
4	Turbulento	7	5	300	LES
5	Turbulento	7	5	600	LES

5.1.2 Análisis del efecto de régimen de flujo

Se realiza una simulación de dominio 2D hasta alcanzar su velocidad de estado terminal (estadísticamente estacionario), con las condiciones de operación expuestas en la Tabla 5.2. Una vez alcanzado dicho estado, que se corresponde a un rotor acelerado, se le realizan un conjunto de simulaciones de forma independiente. Estas son resumidas por la Tabla 5.3, que se diferencian solo por su régimen de flujo de entrada.

Tabla 5.2: Lista de experimentos, aceleración de rotor

Simulación	Régimen inlet	Velocidad de entrada, m/s	TI, %	Tiempo inicial, s	Modelo
1	Laminar	9	0	0	LES

Tabla 5.3: Lista de experimentos, efecto de regímenes de flujo

Simulación	Régimen inlet	Velocidad de entrada, m/s	TI, %	Tiempo inicial, s	Modelo
1	Laminar	9	0	40	LES
2	Laminar pulsante	9	10	40	LES
3	Turbulento	9	10	40	LES

5.2 Estudio de malla computacional

Se realiza un estudio de independencia de malla para cada experimento, logrando determinar el esquema que tenga resultados con sentido físico (un bajo error numérico), y que a su vez, presente el menor costo computacional comparado a sus pares. La metodología para observar de forma global el comportamiento de una turbina eólica, es la magnitud de su velocidad tangencial (m/s). Dicho parámetro se obtiene producto de la interacción del régimen de flujo incidente y el esquema de movimiento rotacional (6DOF). Para cada estudio, se utilizó un esquema de flujo LES con el siguiente flujo incidente:

- Velocidad de entrada: 7 (m/s)
- Intensidad de turbulencia: 5% (-)
- $\nu_T/\nu = 10$ (-)

Por motivos de los altos costos computacionales que conlleva utilizar un esquema acoplado de flujo y movimiento de malla (sliding mesh), la literatura recomienda utilizar una inercia de menor magnitud para alcanzar un estado estadísticamente estacionario en un tiempo razonable de calculo (menor a 7 días por cada simulación) [55]. Los parámetros a utilizar se detallan según la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Resultados de escalamiento, independencia malla [55]

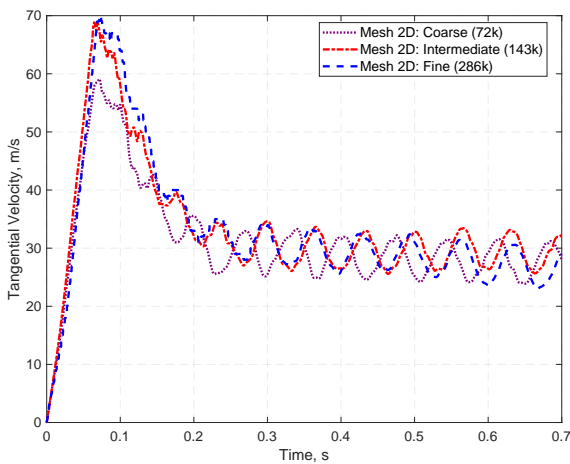
	Masa, kg	Momento de inercia, kg m ²
Literatura	0.0138	0.01
Modelo 2D	0.0004	0.0003
Modelo 2.5D	0.0010	0.0008

5.2.1 Independencia de malla horizontal

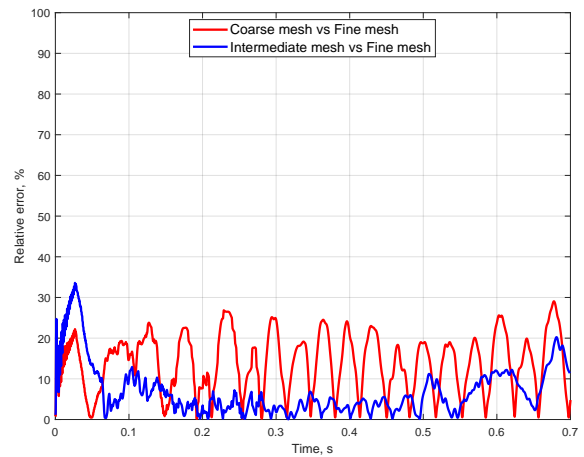
El estudio de independencia de malla para el caso de un modelo 2D que pretende estimar el efecto de la turbulencia en la operación de una turbina VAWT, debe ser exigente, ya que este esquema de discretización tiene como objetivo calcular el desprendimiento de capa límite del flujo sobre los sólidos utilizando un esquema de flujo LES. El fenómeno de desprendimiento de flujo existe, tanto por la compleja geometría del sólido en movimiento (airfoil), las magnitudes de distribución de velocidad en su superficie y por los ángulos de ataque (α) que superan de forma sistemática la condición de estancamiento (debido al giro del cuerpo). Es por ello que se realiza un estudio transversal en la construcción de la malla, considerando no solo la cantidad de elementos, sino también fijando un parámetro objetivo de calidad de forma en sus volúmenes finitos (skewness), y sobretodo, variando el tamaño de sus volúmenes colindantes a las paredes del sólido (first layer thicknes), que son los responsables de la fenomenología descrita. Con el afán de realizar un estudio exhaustivo en torno a los valores necesarios de tamaño de elemento cercano a la sección alar (relevante para lograr un $y^+ < 3$), como también en definir el esquema que presente el menor costo computacional, se diseñaron 3 discretizaciones espaciales del dominio expuestos por la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Métricas y características de discretización espacial: horizontal

Malla	Número de elementos	First layer thickness, mm	Skewness
Fina	286,369	0.07	0.67
Intermedia	143,350	0.13	0.67
Gruesa	72,399	0.3	0.67



(a)



(b)

Figura 5.1: (a) Velocidad tangencial v/s tiempo; (b) Diferencia relativa de velocidad tangencial respecto a malla fina

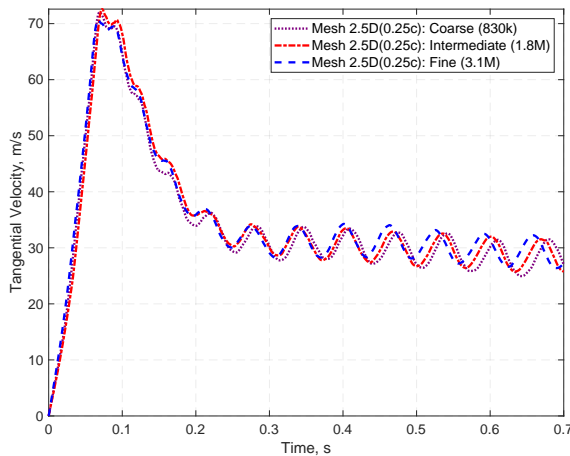
Los resultados expuestos en la Figura 5.1 permiten posicionar al esquema “Intermedio” como independiente, ya que representa una diferencia sostenida menor al 10% con respecto a su par de 286,000 elementos. Se describe un desfase posterior a los 0.4 segundos, pero la magnitud tanto en sus valores máximos (estado no estacionario) y valores medios acumulados (menores a un 3.5% de diferencia), son comparables.

5.2.2 Independencia de malla vertical

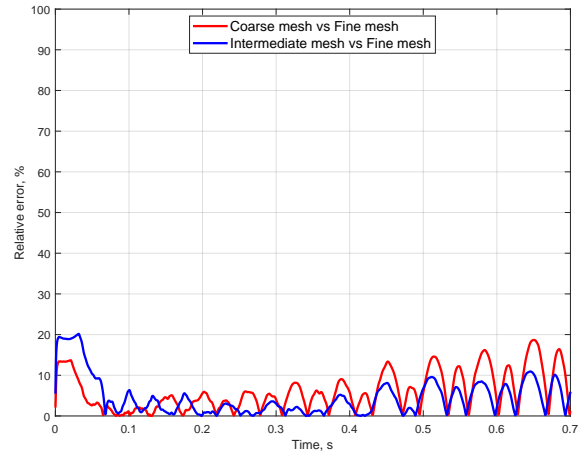
Considerando la malla 2D independiente, se le realiza una extrusión para diversos grosores de dominio 2.5D que serán utilizados en el estudio paramétrico. En este estudio de discretización espacial, se consideró el dominio de menor grosor de los 2.5D (0.25c), para así determinar el ancho de volumen finito (dz) independiente. Las estadísticas generales de cada malla se expresan en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Métricas y características de discretización espacial: vertical

Malla	Número de elementos	Grosor de elemento dz , mm	Skewness
Fina	3,061,875	3	0.68
Intermedia	1,797,660	6	0.68
Gruesa	829,386	12	0.68



(a)



(b)

Figura 5.2: (a) Velocidad tangencial v/s tiempo; (b) Diferencia relativa de velocidad respecto a malla fina

El comportamiento de la velocidad tangencial es comparable para todos los casos, según la Figura 5.6, destacándose que en los valores máximos de aceleración, la magnitud es similar. Posterior

a los 0.3 segundos se evidencia un claro desfase de los tres esquemas, que conlleva a tener una diferencia porcentual acrecentada, logrando valores cercanos al 20% como máximo. Debido a los altos costos computacionales que conlleva utilizar mallas 2 o 4 veces más grandes, y relacionando a su vez que la diferencia principalmente es por dicho desfase, se estima que la malla gruesa (coarse) es la independiente. Lo anterior se respalda por una diferencia porcentual de solo 2.7 % de velocidad tangencial media acumulada del estado estadísticamente estacionario, como también un comportamiento comparable hasta antes del desfase (menor al 5 % de diferencia porcentual).

5.3 Estudio de validación 6DOF

Los modelos de movimiento de cuerpos rígidos, que en este caso resulta ser de 1 grado de libertad (1 DOF), son validados mediante la tendencia de la velocidad de rotor en relación a una turbina de laboratorio. Por lo general se analiza el valor de TSR (λ) en relación al tiempo adimensional (t/T), siendo T el instante en que se logra el estado estadísticamente estacionario. Debido a que en el presente trabajo no se considera una puesta en marcha de una turbina VAWT de laboratorio, se considera para su comparación dos estudios de literatura:

- Caso 1: Modelo CFD de airfoil NACA0017 que presenta dimensiones comparables y masa idéntica al esquema 2D LES [55].
- Caso 2: el trabajo realizado por Celik [56], presenta un caso experimental y su homologo en CFD.

Se destaca que el “Caso 1” validó su modelo de movimiento 1DOF mediante la comparación de los resultados expuestos por Celik, a pesar de no poseer condiciones de operación y dimensiones comparables. Los parámetros de dimensionamiento de cada experimento se detallan en las tablas 5.7, 5.8, 5.9.

Tabla 5.7: Parámetros de diseño generales, estudio 6DOF

Modelo	Perfil	Radio, m	Chord, m	N° de aspas	Solidity	Inlet, m/s
LES (2D)	NACA 0018	0.9	0.3	3	0.5	9
SST- $k \omega$ (2D) [55]	NACA 0017	0.85	0.3	3	0.5	7
SST- $k \omega$ (2D) [56]	NACA 0018	0.375	0.083	3	0.3	6
Experimental [56]	NACA 0018	0.375	0.083	3	0.3	6

Tabla 5.8: Parámetros de movimiento rotacional, estudio 6DOF

Modelo	Altura, m	Inercia, kg m ²	Masa, kg
LES (2D)	0.03	0.12	0.15
SST- k ω (2D) [55]	1	3.66	5.07
SST- k ω (2D) [56]	1	0.03	0.21
Experimental [56]	0.6	0.02	0.13

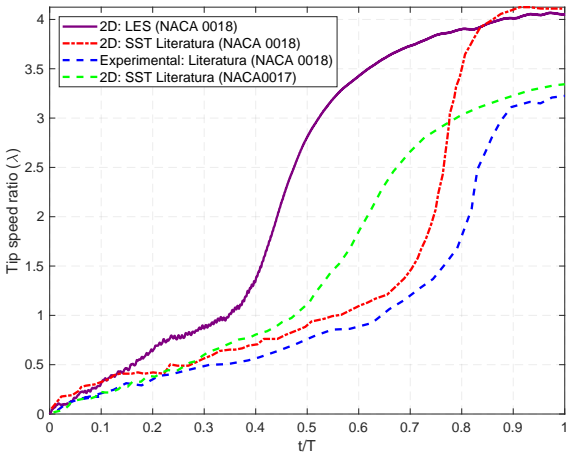
Tabla 5.9: Parámetros de rotación en relación a su área transversal, estudio 6DOF

Modelo	Masa / Área, kg/m ²	Inercia / Área, kg
LES (2D)	16,89	13,68
SST- k ω (2D) [55]	16.89	12.20
SST- k ω (2D) [56]	2.57	0.36
Experimental [56]	2.57	0.36

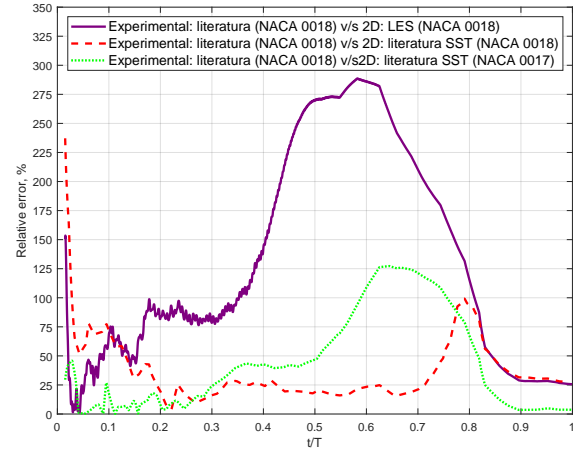
El modelo LES 2D, tanto en términos de solidity e inercia, resulta ser comparables con el “Caso 1”, pero discrepan en su condición de velocidad de viento y perfil alar. Lo anterior, como análisis preliminar, sugiere que la curva de LES 2D deba tener un startup mas abrupto, como también una mayor velocidad terminal, ya que al poseer mismas dimensiones en términos de solidity, pero un perfil alar mas grueso como también una mayor velocidad incidente, sugiere que las condiciones estacionarias sean de mayor magnitud.

Para analizar la velocidad tangencial de rotor en el tiempo, se observa el comportamiento de cada caso en la Figura 5.3(a). De dicho esquema, se destaca que el presente modelo:

- Un mayor TSR, junto con el esquema CFD del Caso 2.
- Su error relativo en relación al experimento no es representativo (sobre 300%), ya que no tienen dimensiones, inercia y perfil de viento comparable.



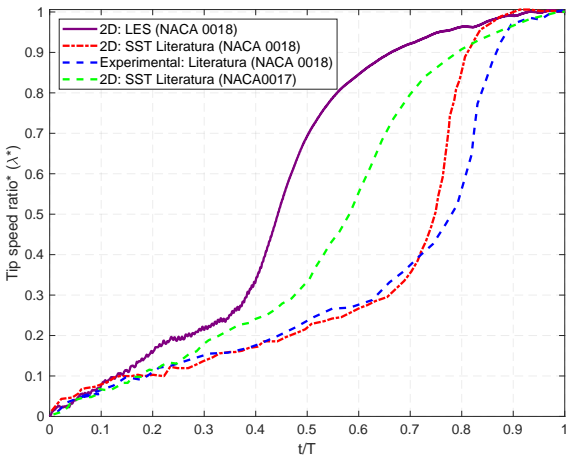
(a)



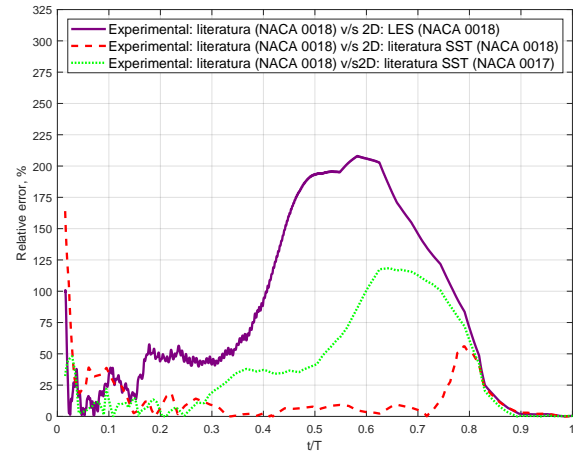
(b)

Figura 5.3: (a) Tip speed ratio (TSR) λ v/s Tiempo adimensional (t/T); (b) Diferencia relativa de TSR respecto a datos experimentales

Con el objetivo de comparar el comportamiento de la velocidad tangencial, que es lo relevante para la validación del modelo de rotación, se postula el valor de TSR^* . Es la normalización del TSR con su valor de estado estacionario (similar a t/T). Los resultados para cada caso se exponen en la Figura 5.4, destacándose una disminución notoria de la diferencia porcentual de forma transversal según la Figura 5.4.b.



(a)



(b)

Figura 5.4: (a) Tip speed ratio adimensional (TSR^*) λ^* v/s Tiempo adimensional (t/T); (b) Diferencia relativa de TSR^* adimensional respecto a datos experimentales

Del comportamiento del caso 2D LES, es notorio su similitud con el “Caso 1” en la aceleración posterior a $t/T > 0.4$, pero se evidencia un arranque más pronunciado. Por otro lado, el error

porcentual de ambos solo difiere en magnitud, por lo que se condice con turbinas de dimensiones similares, pero con un inlet diferente.

Con el afán de argumentar las afirmaciones anteriores, se expone a continuación un desglose de la incidencia de cada parámetro en la aceleración de un rotor, como también las diferencias existentes entre un modelo experimental y computacional.

Efectos de parámetros generales en 6DOF (CFD): Como se evidencia en el resumen de la tabla 5.7, cada modelo, tanto CFD como el experimental, presentan diferencias y similitudes en su diseño. Es relevante a partir del estudio paramétrico o teórico realizado hasta la fecha en la literatura, analizar la aceleración tangencial que se aprecia en términos de TSR de la Figura 5.3, ya que tanto su comportamiento y amplitudes distan entre sí. Esto se cuantifica en valores altos (sobre 100 %) de diferencia porcentual por la Figura 5.3(b), pero se destaca que existen valores menores al 60 % (como máximo) por el modelo CFD realizado por Celik [56], ya que representa una turbina de idénticas dimensiones y condiciones de operación que su par experimental.

Los parámetros a considerar de forma general en aerodinámica de VAWT, se resumen:

- Perfil de airfoil: a mayor grosor del perfil alar, mayor es el coeficiente de potencia máximo alcanzado por el sistema. Esto es correcto hasta cierto punto, ya que al analizar estudios paramétricos de perfiles alares [55] según su grosor (últimos 2 dígitos de nomenclatura NACA), al obtener un $C_{p_{max}}$ de estudio, al continuar aumentado el grosor, dichos perfiles presentan una disminución de dicho parámetro de operación.
- Efecto de ángulo de ataque: el ángulo α es determinante para las fuerzas de lift y drag, por ende en la aceleración del rotor. Un valor máximo de ángulo de ataque, donde se ha demostrado que mejora la partida del rotor (startup) [55], es 4° . Si se supera dicho valor, no se presentará cierta ventaja, hasta incluso perjudicar por alcanzar la condición de estancamiento (stall condition).
- Chord length (c): el término que evidencia de forma global la dimensión de un rotor, es el solidity. Este índice se relaciona al valor de TSR que puede alcanzar el sistema, y que tiene como principal parámetro, el chord length (c). Si se aumenta el chord, mejora el startup del rotor, pero puede decrecer la capacidad de captar energía eólica de la turbina (el C_p decrece). Si este se aumenta de forma exagerada, se produciría el efecto sombra, que se observa cuando un airfoil apantalla a otro, bloqueando el aire incidente que debiese entrar en contacto con dicha aspa, perjudicando la aceleración del rotor.
- Momento de inercia: es el parámetro en que se evidencia como un sistema acelerara angularmente (Ecuación (3.33)). A mayor inercia, más tarda en alcanzar el estado estadísticamente estacionario el sistema [56].

- Magnitud de velocidad del viento: el valor medio de la velocidad del viento es determinante para conocer la potencia que se puede extraer, como lo explica la Ecuación (3.9). Una mayor magnitud aporta una mejora en el startup, como también en el valor de velocidad terminal media del sistema (1 m/s de aumento, puede generar un crecimiento de velocidad tangencial terminal cercano al 20% en modelos CFD [55]).
- LES v/s SST k- ω : Los estudios de modelos LES son de secciones de dominio o 2.5D, que se comparan por lo general con esquemas de flujo SST 2.D y 2.5D. Los resultados de forma transversal posicionan al LES 2.5D con cálculos más cercanos a los experimentales. Para TSR bajos (arranque del rotor), la discrepancia del C_T y C_N entre el LES 2.5D y resultados experimentales, es bastante pequeña en términos de magnitud máxima y tendencia de variación [13].

Al comparar la curva TSR adimensional de LES y el k- ω NACA0017 en la Figura 5.4.a, estos evidencian un comportamiento comparable en el tiempo, ya que presentan la misma masa, solidity e inercias similares (tienen distinto radio). Las diferencias de TSR se pueden relacionar por tener un perfil alar diferente (mayor grosor del NACA0018 mejora puesta en marcha) y una velocidad del viento media mayor para LES (2 m/s por sobre su par), explicando un aumento de su TSR final y un startup más exagerado. Finalmente, no es posible realizar una comparación de modelos LES v/s SST como se evidencia en la literatura, ya que en primer lugar, no es el mismo caso de estudio para poder comparar las curvas de TSR (NACA 0017 v/s NACA 0018), como tampoco se tiene un dominio 2.5D LES para asegurar que el calculo aerodinámico resulta ser prácticamente igual al experimental.

Comparación modelos experimentales y computacional: Para realizar una comparación entre un modelo CFD y un experimento, en primer lugar deben tener criterios de diseño idénticos y condiciones de operación comparables en términos medios (velocidad del inlet). De forma general, se puede abordar las discrepancias en comportamiento y magnitud del TSR, expuestos en la Figura 5.3, según [56]:

- El modelo 2D no considera componentes verticales de velocidad, efecto de estructura de soporte de las palas, y sobretodo, la pérdida asociada a la punta de las palas (blade tip loss).
- Los experimentos presentan pérdidas por fricción de rodamientos y del generador. Esto explica una estimación exagerada de velocidad en el tiempo para modelos CFD.
- Existen limitaciones de los esquemas SST k- ω estimando los flujos alrededor de la turbina, ya que es en esa área donde el calculo del flujo es más complejo por la pérdida dinámica.

No resulta posible contrastar el modelo LES con el caso experimental, ya que se requiere cumplir con al menos condiciones de operación y de diseño idénticas. Sin embargo, es importante destacar

que un modelo CFD no presenta fricción del generador, por lo que los valores de velocidad y aceleración tenderán a ser mayores a una turbina en operación. Por otro lado, las Figura 5.4.a demuestran que el comportamiento, sin considerar dicha brecha de magnitud (al estar normalizado por su TSR máximo), es representativo a pesar de ser un modelo 2D con esquema de flujo RANS (caso 1).

5.4 Validación esquema de flujo LES

La evaluación de la calidad de los resultados para un esquema de flujo que depende de un filtro espacial (por ende de la malla), como es LES, requiere de un estudio de energía cinética turbulenta resuelta en el dominio. Considerando una malla híbrida y con diversos tamaño de elemento, se realiza un estudio de dicha energía cinética en 5 puntos del dominio interno, como lo indica la Figura 5.5.

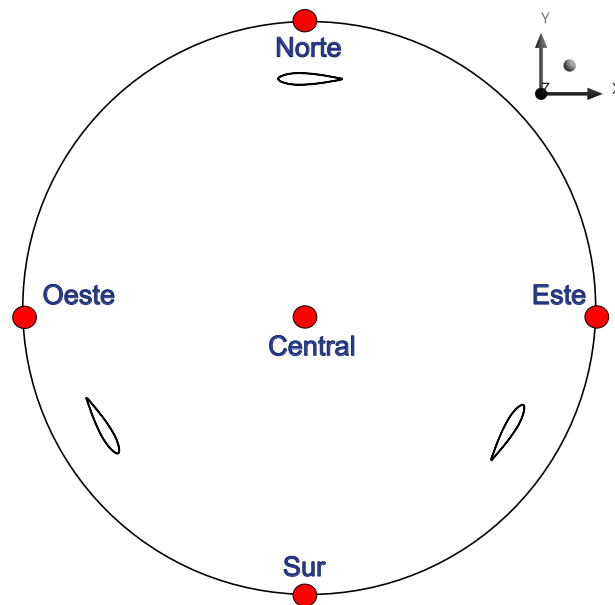


Figura 5.5: Puntos de muestreo de energía resuelta, dominio interno

Cada punto está a una distancia radial ($R = 3c$) del centro del dominio. Solo el nodo central posee una malla no estructurada. Las figuras 5.6(a), 5.6(b) indican el porcentaje de energía cinética resuelta por cada nodo de muestreo de la simulación 2D turbulenta, respecto a un tiempo de simulación de 0.2 (s).

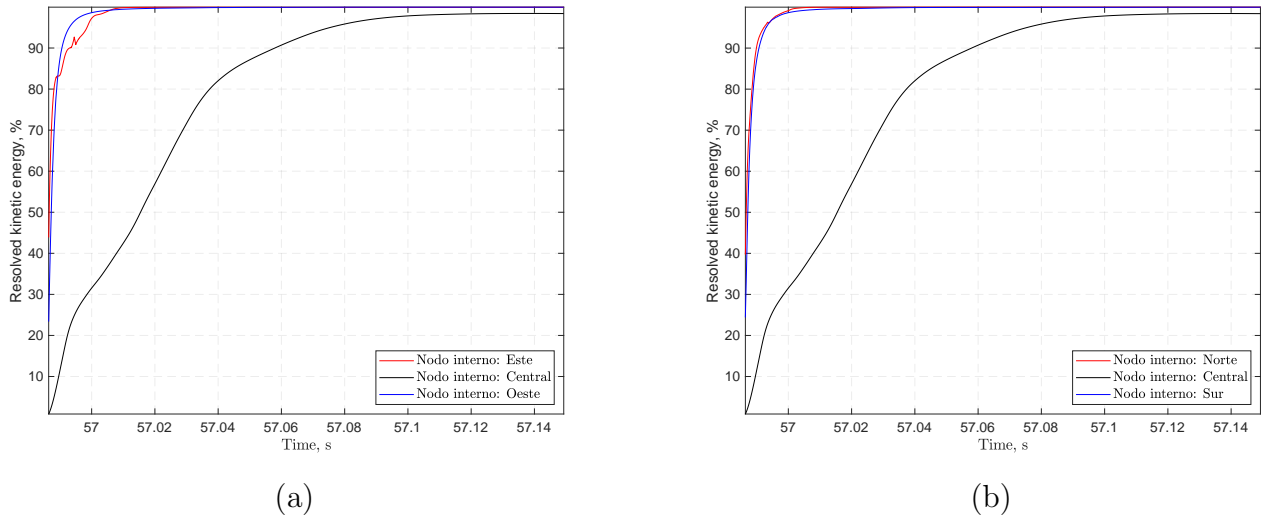


Figura 5.6: Porcentaje de energía, caso turbulento: (a)Nodos horizontales ; (b) Nodos verticales

La energía cinética total de un flujo considera tanto las fluctuaciones del perfil de velocidad, como el de sub-malla, como lo indica la Ecuación (5.1).

$$k_{tot} = k_{res} + k_{sgs} = \frac{1}{2}u_i'^2 + k_{sgs} \quad (5.1)$$

Es esperable que el aporte de la escala resuelta (k_{res}) sea mayor al 80 % para afirmar que la malla cumple con los requerimientos de un esquema LES, ya que solo se simularía un 20% de la variación de velocidad en la sub-malla.

Según los resultados expuestos, los nodos en su mayoría cumplen dicha condición, excepto el central. Su magnitud es mermada debido a estar ubicado en una sección de grilla no estructurada con elementos de mayor tamaño (free flow). Esta decisión de diseño de malla tiene como objetivo aumentar el detalle de solución exclusivamente en zonas colindantes a los airfoils (fenomenología del problema) y de esta manera disminuir el costo computacional. Se destaca que la calidad de resultados no disminuye si existe un trabajo detallado en torno a generar transiciones suaves entre sectores de diferente calidad de elementos.

La forma de evaluar el impacto de la transición entre una malla no estructurada a una de alta definición (transmutar de k_{sgs} a k_{res}), es evidenciar si en el nodo aguas abajo (nodo este) presenta un k_{res} sobre el 80%. El comportamiento del nodo este con respecto al oeste anota cierta inestabilidad, pero no es menor al 80%, lo que afirma que las transiciones de tamaño y calidad de elemento son satisfactorias para las zonas de alta complejidad de solución numérica (airfoils). Con respecto a los nodos espaciados verticalmente, no se ven afectados por la malla no estructurada, por lo que se describen con la misma proporción de energía resuelta en relación a la sub-grilla.

Capítulo 6

Estudio paramétrico de grosor 2.5D

La mayoría de los estudios computacionales utilizan el modelo de flujo SST $k-\omega$ con malla deslizante (6DOF) en dominios 2D. Los modelos más detallados para entornos urbanos, que requieren un mayor detalle en resultados relacionados a flujos turbulentos, suelen emplear esquemas LES [13],[12], [57] o SAS [58] en secciones del rotor, llamados dominios 2.5D (Figura 6.1(a)). Implementar dichos dominios resulta útil para simular efectos turbulentos en todas las direcciones, pero sin aumentar de forma exagerada el costo computacional que requiere dimensionar turbinas de 10 (m) de alto. Por otro lado, el método 2.5D plantea interrogantes sobre el grosor del dominio necesario para obtener resultados representativos, ya que un grosor demasiado grande es computacionalmente excesivo y uno demasiado pequeño es inexacto. Un criterio universal para estimar el grosor suficiente sigue sin resolverse, y las sugerencias de la literatura no son concluyentes. En este contexto, el presente capítulo se centra en analizar el grosor óptimo del dominio 2.5D que ofrezca un buen equilibrio entre el costo computacional y la precisión de los resultados.

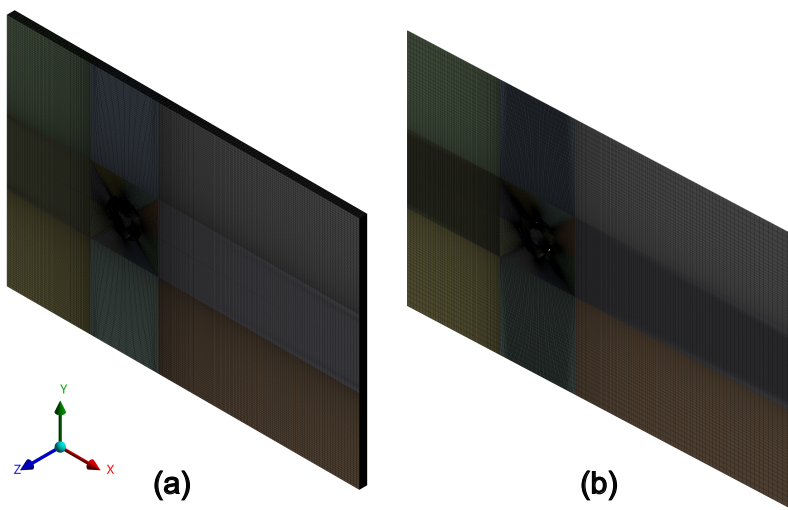


Figura 6.1: Vista isométrica: (a) Dominio 2.5D, (b) Dominio 2D

6.1 Metodología de estudio

Se realiza un estudio paramétrico aumentando progresivamente el grosor del dominio “H” en relación con la longitud del chord “c” para evaluar la aceleración del rotor, como se aprecia en la Figura 6.2. Los esquemas de flujo y de cuerpo rígido son LES y 6DOF, respectivamente. Tanto la inercia y masa están sujetas a la altura de dominio a simular, utilizando un valor de inercia similar al implementado en la Subsección (5.2.2). El estudio paramétrico se detalla en la Tabla 6.1, donde los valores de H van desde 0 (2D) hasta 2C (2.5D), correspondiéndose a mallas que van desde unos pocos cientos de miles hasta varios millones de volúmenes de control.

Tabla 6.1: Lista de simulaciones y sus parámetros, estudio dominio 2.5D

Caso	Grosor, mm	N° elementos	Inercia, kg m ²
0	30	143,000	0.0003
c/4	75	893,750	0.00075
c/2	150	1,787,500	0.0015
1c	300	3,575,000	0.003
2c	600	7,157,800	0.006

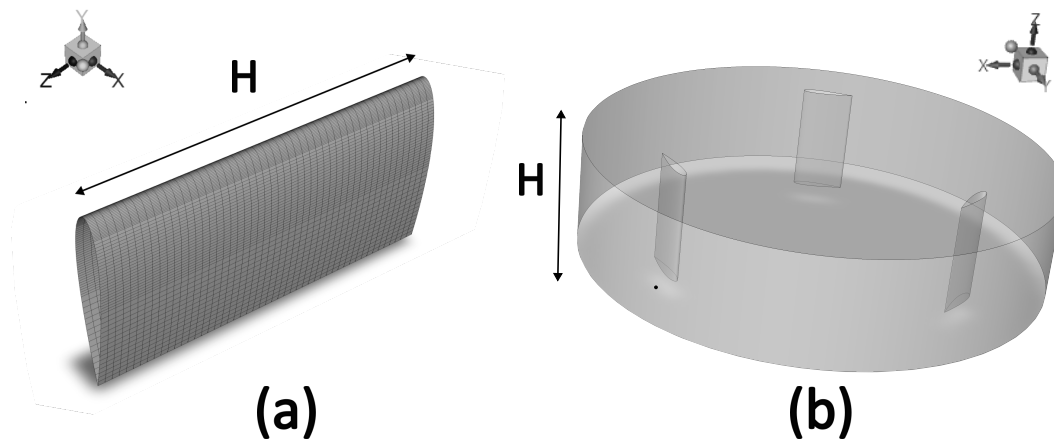


Figura 6.2: (a) Sección alar (airfoil), (b) Dominio interno de dominio 2.5D

6.2 Análisis de resultados

El objetivo principal de este estudio paramétrico, a diferencia de otros estudios relacionados al grosor centrados en la estela del rotor, es netamente su incidencia sobre la aceleración del aerogenerador. Los resultados de la velocidad tangencial en el tiempo, expuestos en la Figura 6.3(a) constan de dos fases, independiente cual sea su dominio:

- Estado no estacionario: etapa en que comienza la aceleración del rotor, hasta lograr un comportamiento oscilante de velocidad en el tiempo. Es debido al bajo valor de inercia la existencia de una velocidad máxima antes de la velocidad terminal.
- Estado estadísticamente estacionario: comienza desde que se observa una velocidad oscilante, pero se afirma su condición solo cuando el valor de su coeficiente de potencia (C_p) es nulo o sus valores medios de velocidad son invariantes en el tiempo.

En términos de velocidad tangencial del rotor, es evidente la existencia de una desviación del modelo 2D durante el estado no estacionario, tanto en magnitud como en comportamiento en el tiempo. Sin embargo, en el estado estadísticamente estacionario, todos los grosores 2.5D producen resultados casi idénticos, descritos con diferencias porcentuales menores al 20 % con respecto al esquema de mayor grosor ($H = 2c$), como se observa en la Figura 6.3(b).

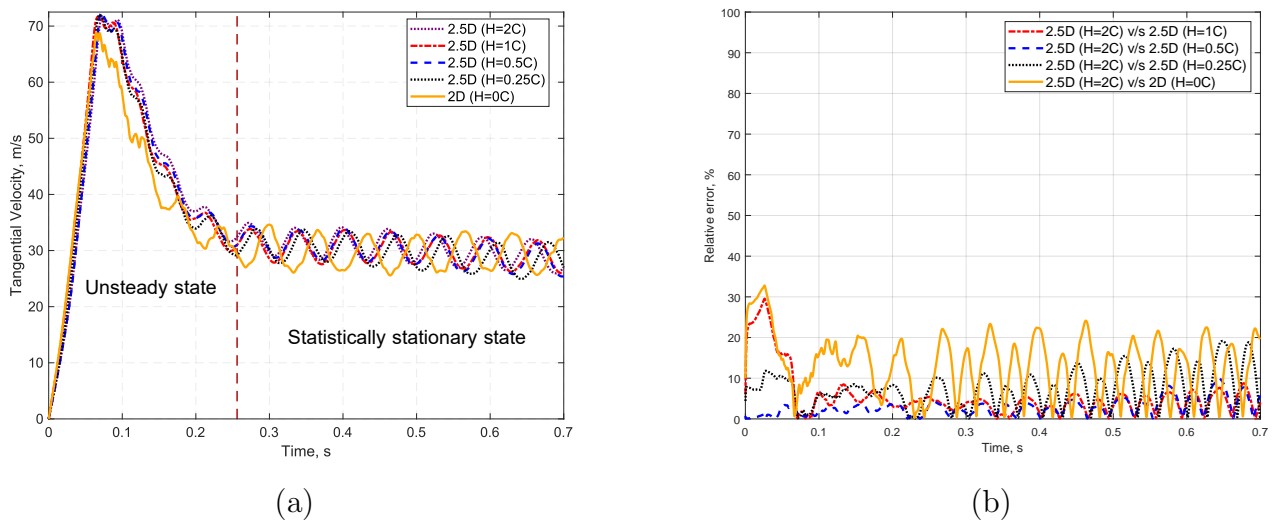
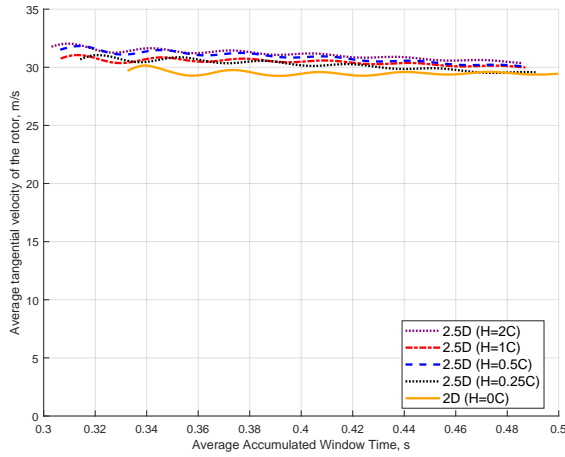
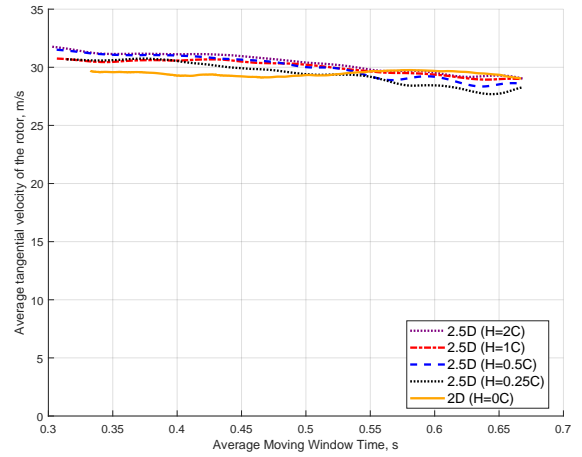


Figura 6.3: (a) Velocidad tangencial v /s tiempo; (b) Diferencia relativa de velocidad tangencial respecto a dominio $H=2c$

Los estudios de velocidad media, tanto para ventanas acumuladas y móvil, se exponen en la Figura 6.4. Por motivos de relevancia en términos operativos de un rotor, se enfatiza la media acumulada del estado estadísticamente estacionario, ya que otorga una magnitud representativa del comportamiento en el tiempo de operación del aerogenerador con parámetros de viento constantes. Al comparar las velocidades promedio acumuladas para el caso estacionario, en la Figura 6.4(a), se evidencia una desviación máxima del 4% con respecto al dominio estrictamente 2D, anotando incluso hasta un 1.1% para el caso de 0.5c.



(a)



(b)

Figura 6.4: Valores medios de velocidad de rotor: (a) ventana acumulada; (b) ventana móvil

Los resultados sugieren que $H=0.5c$ es el grosor conveniente, ya que garantiza la precisión mientras reduce el tiempo de simulación en un factor de seis, de semanas a días, como lo resume la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Wall-time y desviación porcentual de velocidad, estudio 2.5D

Caso	Grosor, mm	Desviación media acumulada, %	Wall-time, días	Core-días
0	30	4%	2	64
c/4	75	3%	4	128
c/2	150	1%	5	160
1c	300	1%	9	288
2c	600	0%	28	896

Resulta evidente que los valores porcentuales de la media acumulada, para el estado estadísticamente estacionario, son transversalmente bajos. Dentro de los factores posibles que pueden explicar una diferencia porcentual para la velocidad en el tiempo por sobre un 20 % en el caso 2D, es el decaimiento más exagerado del valor máximo de velocidad en relación a los 2.5D, que conllevan a un desfase del giro de rotor. Lo anterior se corrobora si se analiza el ángulo azimutal en el tiempo para cada simulación.

Según la Figura 6.5, posterior al primer ciclo del rotor 2D en el estado no estacionario (0.1 s), este esquema presenta un desfase exagerado en relación a los 2.5D. Lo anterior es concordante con la diferencia de velocidad desde los 0.1 (s), que se traduce en una diferencia porcentual del 20 %.

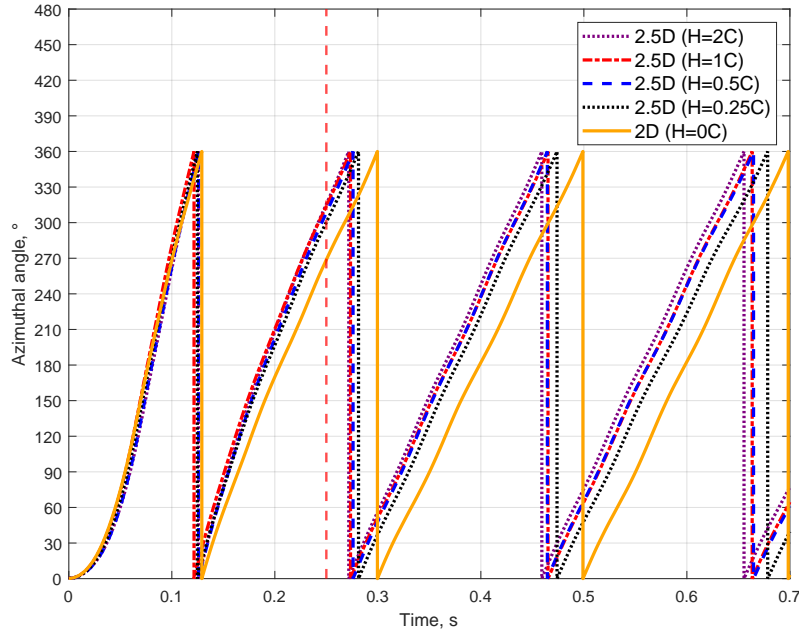


Figura 6.5: Análisis angular de cada modelo de dominio 2.5D

Con respecto al estado estadísticamente estacionario, los modelos de forma transversal presentan frecuencias de giro del rotor prácticamente idénticas. Debido a las leves diferencias de velocidad producidas en el arranque, existen ciertos desplazamientos en el tiempo de inicio de cada ciclo, pero anotando el mismo período, como lo indica la Tabla 6.3.

Finalmente, es posible situar al modelo 2D como un esquema útil para análisis de estado estadísticamente estacionario de un rotor, ya que disminuye el costo computacional y posee magnitudes comparables a una sección de rotor de $0.5c$.

Tabla 6.3: Estudio de frecuencias de ángulo azimutal, estadísticamente estacionario

Ciclo	Caso	Tiempo inicio, s	Tiempo final, s	Período, s	Frecuencia, Hz
1	0	0.30	0.50	0.20	5.01
	$c/4$	0.28	0.47	0.19	5.19
	$c/2$	0.28	0.47	0.19	5.30
	$1c$	0.27	0.47	0.19	5.21
	$2c$	0.27	0.46	0.19	5.34
2	0	0.50	0.70	0.20	5.02
	$c/4$	0.47	0.68	0.20	4.89
	$c/2$	0.47	0.67	0.20	4.99
	$1c$	0.47	0.66	0.20	5.05
	$2c$	0.46	0.66	0.20	5.09

Capítulo 7

Análisis de resultados

En este capítulo se analizan los parámetros de puesta en marcha del rotor (fase 1), para posteriormente interpretar los resultados de la incidencia de regímenes de flujo sobre el estado estadísticamente estacionario del aerogenerador (fase 2).

7.1 Fase 1: Aceleración de rotor

Los resultados pertinentes a la presente sección, se basan en la puesta en marcha del rotor del modelo 2D con esquema de flujo LES, dimensionado según la Sección 4.1. El tiempo de simulación final se determina hasta que se alcance el estado estadísticamente estacionario con condiciones de entrada invariantes, tanto en valores medios de velocidad y régimen laminar.

7.1.1 Estado no estacionario

La Figura 7.1 expone la velocidad tangencial que experimentó el rotor en el tiempo. Se evidencia desde los 15 (s) una aceleración más abrupta del sistema, ya que transiciona desde la etapa mixta de drag y lift (combined stage) hacia la etapa de lift (full lift stage).

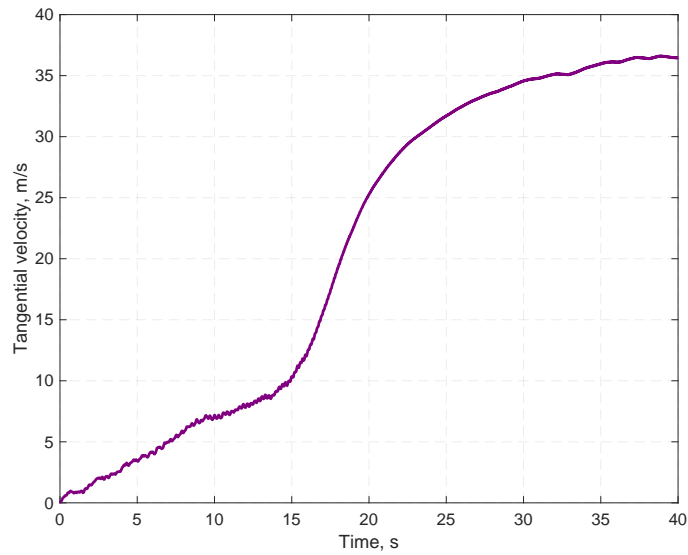


Figura 7.1: Velocidad tangencial de rotor en el tiempo, LES 2D

En estudio de dimensionamiento o diseño de aerogeneradores, con el objetivo de conocer la energía que es capaz de coleccionar el sistema, se calcula su curva de coeficiente de potencia (C_p) en relación al TSR (λ). La Figura 7.2 expone el comportamiento de dicho coeficiente hasta alcanzar su estado estadísticamente estacionario, cercano a un $TSR = 4$.

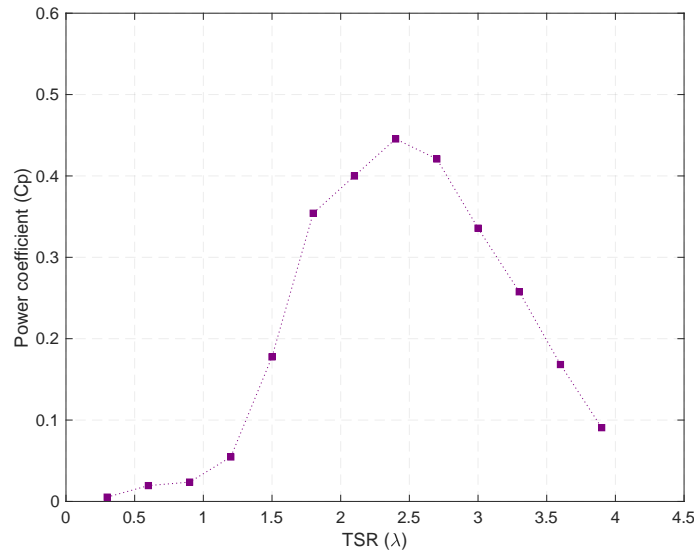


Figura 7.2: Coeficiente de potencia (C_p) v/s TSR, LES 2D

El valor de $C_{p_{max}}$ fue cercano a los 0.45, que es comparable con CFDs de VAWT [55], [56] (entre 0.3 a 0.5).

El comportamiento del momento neto experimentado por la turbina, se expresa en la Figura 7.3(a). Los valores tanto negativos y positivos están dentro de lo esperable, ya que el rotor experimenta durante el tiempo ciertos periodos de aceleración ($M < 0$) y desaceleración ($M > 0$). Conocer los valores del coeficiente de momento (C_M), fuera del análisis del rotor, resulta de interés para determinar el coeficiente de potencia ya que se calcula según la Ecuación (7.1).

$$C_p = \lambda \cdot C_M \quad (7.1)$$

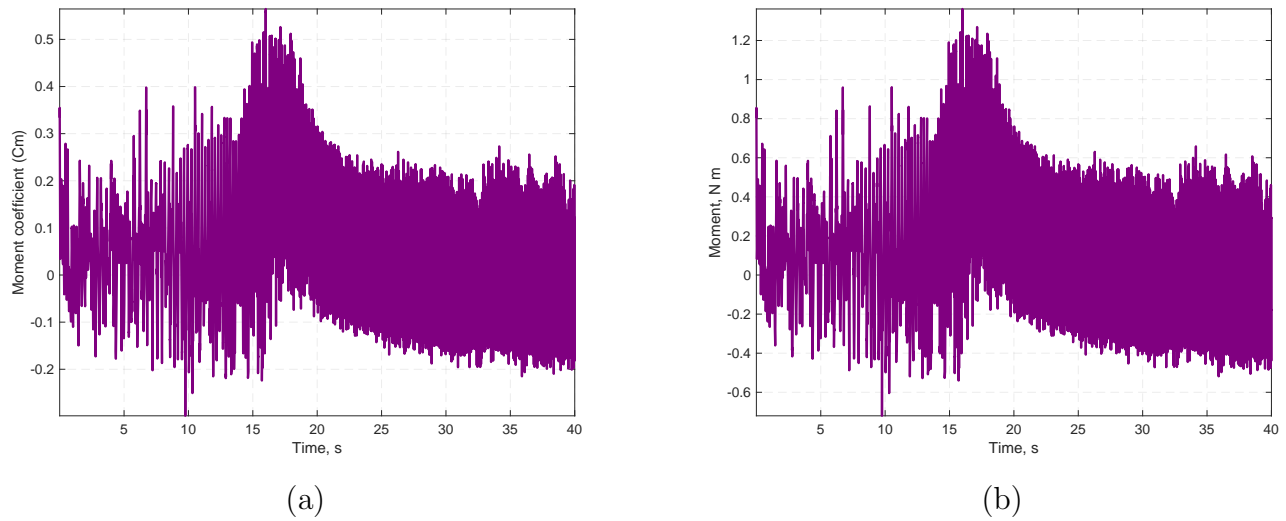


Figura 7.3: (a) Coeficiente de momento v/s tiempo; (b) Momento aplicado al rotor v/s tiempo

7.1.2 Estado estadísticamente estacionario

El parámetro para determinar que un aerogenerador alcanza su estado estadísticamente estacionario, desde el punto de vista de la velocidad, es tener un C_p nulo. Esto en términos de operación se traduce a que el momento externo neto sobre las palas sea 0.

La Figura 7.4 expone el último ciclo de giro del rotor antes de alcanzar su estado estacionario. Según la Figura 7.4.a, el comportamiento de la velocidad es oscilante. Esto es un indicio de estar en presencia de un posible estado estacionario, pero se debe calcular el valor de C_p y observar un valor nulo para asegurar dicha afirmación.

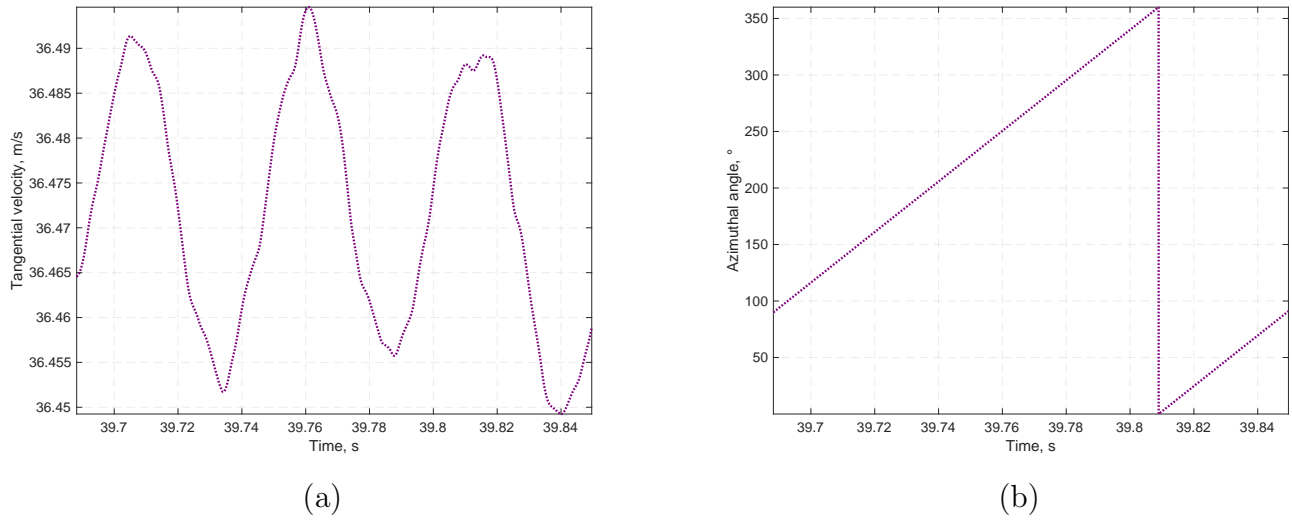


Figura 7.4: (a) Velocidad tangencial v/s tiempo; (b) Angulo azimutal v/s tiempo

La metodología empleada para definir la presencia del estado estadísticamente estacionario se basa en primer lugar, obtener el momento neto en el tiempo (M). Su comportamiento se resume en la Figura 4.32.

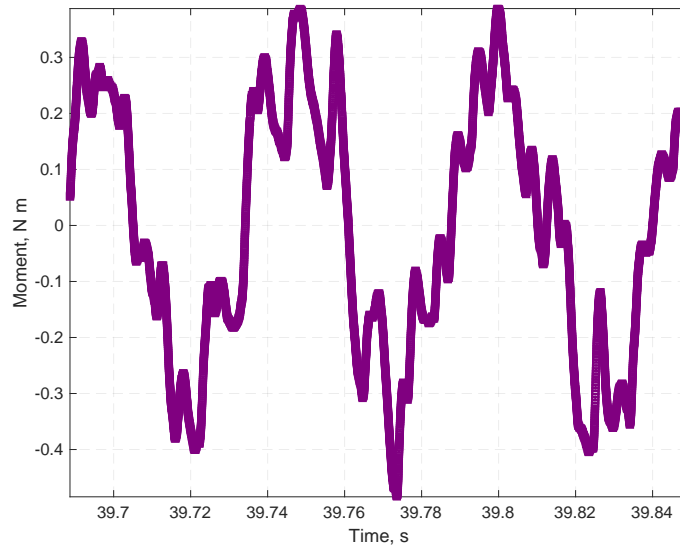


Figura 7.5: Momento sobre rotor v/s ángulo azimutal.

Resulta notorio su comportamiento oscilatorio, debido a que el momento está en función de la aceleración angular del sistema, como lo indica la Ecuación (3.33). Teniéndose el momento neto en el tiempo, se asegura que en $t = 40$ (s) se logra un $C_p = -0.009$, culminando la fase de aceleración del sistema.

7.2 Fase 2: Variación de regímenes de flujo

Una vez alcanzado el estado estadísticamente estacionario en 40 (s), se realizan los experimentos de los regímenes de flujo a estudiar de forma independiente.

7.2.1 Análisis de velocidad de rotor

El tiempo de simulación para cada caso fue, de igual forma que la Fase 1, el necesario para lograr un estado estadísticamente estacionario en cada régimen de flujo a estudiar.

Utilizando la misma metodología de la Fase 1, la Figura 7.6 expone el coeficiente de potencia para cada caso con respecto al tiempo.

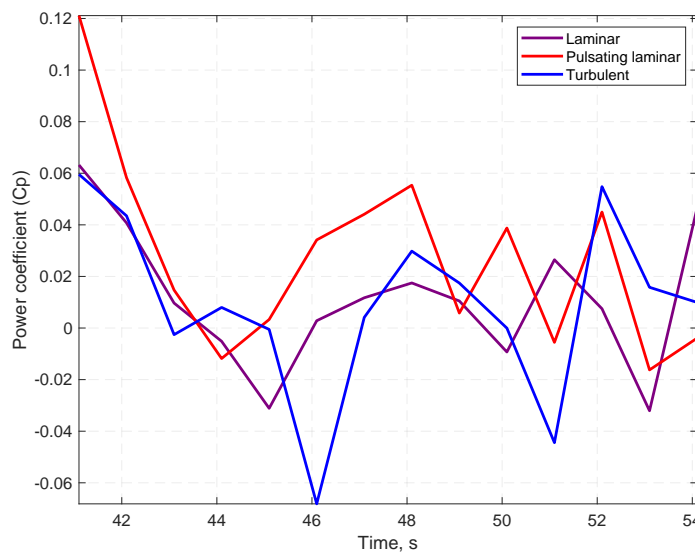


Figura 7.6: Coeficiente de potencia v/s tiempo

Si bien los experimentos laminar y turbulento logran un nuevo estado estadísticamente estacionario desde los 48 (s), se define como tiempo máximo de simulación 54 (s), ya que el C_p es nulo para todos los experimentos.

El comportamiento de la velocidad rotacional se detalla en la Figura 7.7. Existen diferentes tendencias en torno a la aceleración del rotor para cada régimen de flujo, destacándose para los casos:

- Laminar: posee un comportamiento prácticamente invariante desde que alcanza su estado estadísticamente estacionario en 40 (s).

- Laminar pulsante: presenta una magnitud de velocidad superior a sus pares. Se destaca una aceleración inicial pronunciada, que tiene correspondencia a un $C_p = 0.12$ (descrito por la Figura 5.3).
- Turbulento: su tendencia es comparable al laminar, pero un tanto mermado posterior a los 45 (s) de simulación.

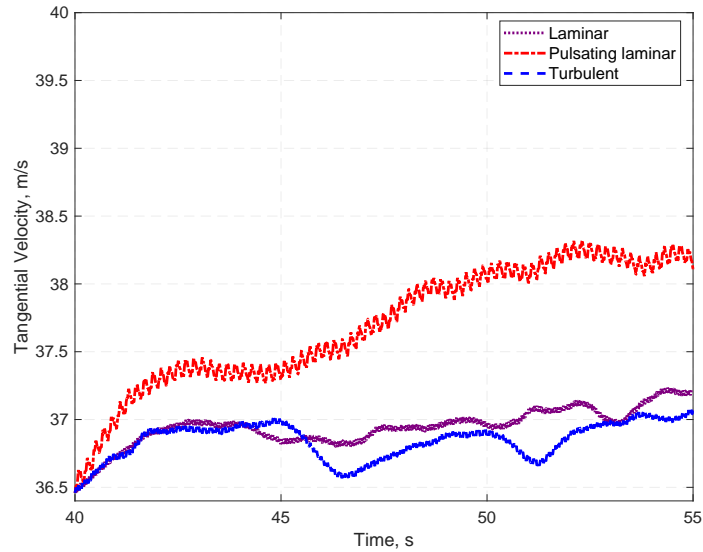


Figura 7.7: Velocidad tangencial rotor v/s tiempo

En términos cuantitativos, considerando de referencia el flujo laminar, la Figura 7.8 describe la diferencia porcentual de cada régimen de flujo en el tiempo.

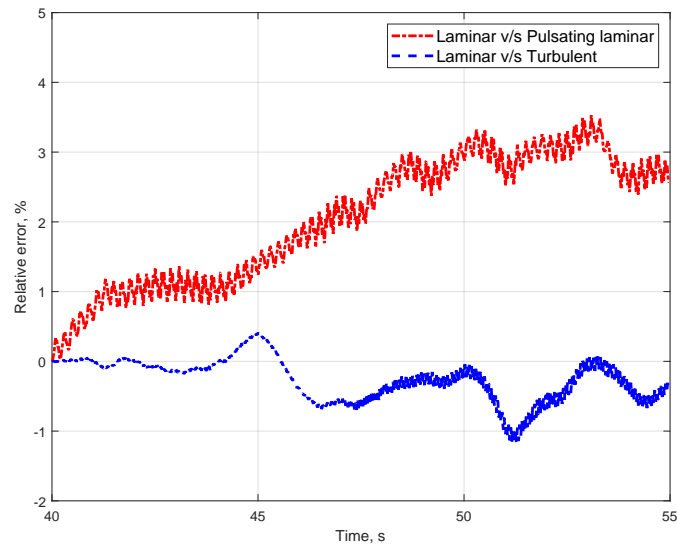


Figura 7.8: Diferencia porcentual de velocidad de rotor en relación a caso laminar

El flujo laminar pulsante anota un desempeño positivo en términos de velocidad terminal de rotor, logrando hasta un 3% por sobre el laminar.

Por el contrario, el caso turbulento en un comienzo tiene valores comparables, pero presenta una caída de velocidad de hasta 1%, para posteriormente recuperarse con valores comparables a la velocidad de rotor con flujo laminar.

De los factores que pueden generar discrepancias entre dos regímenes de flujo que presentan una intensidad turbulenta idéntica (10%), está la frecuencia.

El caso laminar pulsante presenta una frecuencia constante de 5 (Hz), que es determinada por la Ecuación (4.26). Por el contrario, al implementar el método Spectral Synthesizer para simular un flujo turbulento, este presenta una suma de hasta 100 armónicos de Fourier en su composición.

Dicha distribución de frecuencias puede estar generando dos posibles eventos:

- El flujo presenta disipación de energía cinética de la turbulencia (Figura 3.54) antes de entrar al contacto con el rotor.
- Tanto la inercia y dimensiones de la turbina no sean sensibles a la frecuencia de variación del flujo de velocidad.

Mediante las herramientas computacionales actuales, es posible abarcar el primer punto, ya que realizar estudios paramétricos de diseño e inercia están fuera de los alcances del presente trabajo.

7.2.2 Fase 3: Análisis de dominio

Con el objetivo de responder a la existencia y magnitud de disipación de energía cinética de la turbulencia de los diferentes regímenes, se expondrán los parámetros relacionados a la pérdida de energía a través de la línea central del dominio (Figura 7.9), evaluados en el tiempo final de simulación correspondiente a 54 (s).

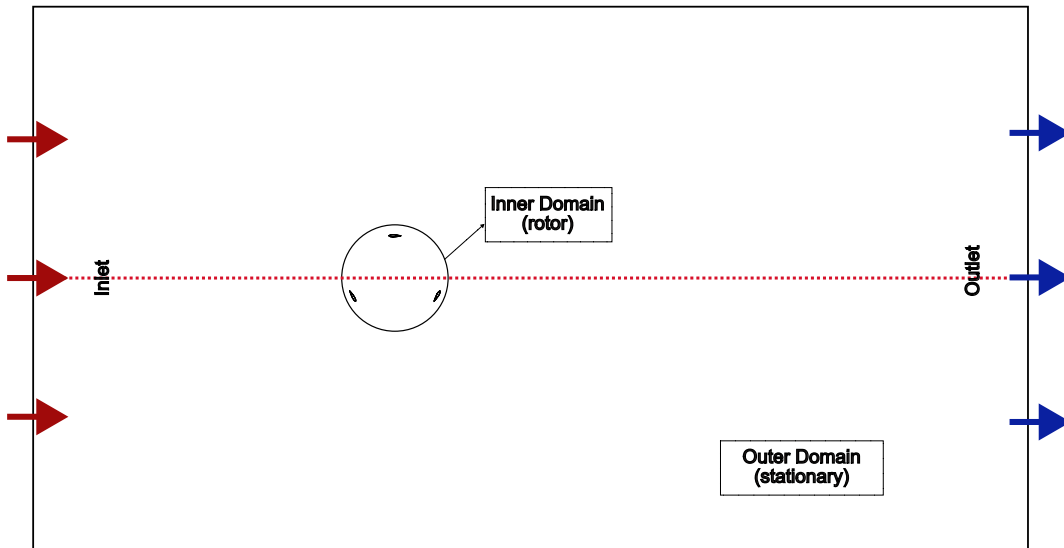


Figura 7.9: Esquema de línea transversal de dominio 2D, análisis de dominio

Energía cinética de la turbulencia

En relación a los resultados del cálculo de energía cinética de la turbulencia total (Ecuación (5.1)) y sub grilla (SGS), se puede apreciar de forma cualitativa de las figuras 7.10,7.11,7.12:

- Aguas arriba (rotor): las simulaciones son representativas a la condición de borde expuesta, tanto para las que presentan intensidad de la turbulencia, como para el caso laminar sin perturbaciones (energía cinética de la turbulencia nula).
- Rotor: existe generación de energía comparable entre los casos debido al giro de rotor. Esto es congruente con presentar una velocidad tangencial similar para todos los regímenes.
- Aguas abajo (rotor): es la zona con mayor generación de energía cinética de la turbulencia del dominio para todos los casos.

El caso laminar presenta de forma transversal valores nulos de energía cinética de la turbulencia para la sección aguas arriba del rotor. Sin embargo, el giro del aerogenerador perturba el fluido colindante, que se traduce en la producción de dicha energía. Como aquel sector contiguo a las aspas presentan una calidad de malla acorde a la fenomenología a simular (estructurada y de

tamaño de elemento pequeño), la escala SGS es prácticamente nula como se indica en la Figura 7.10(a).

El máximo de energía cinética de la turbulencia del dominio se ubica justo después del rotor. Esto es concordante con los gradientes de velocidad adversos que sufre dicho flujo por la cercanía a las paredes del airfoil (condición de no deslizamiento), como también a la velocidad rotacional ($-r\omega$) que presenta el giro del sólido. En términos de magnitudes, la velocidad del rotor en relación al flujo de ingreso es 4 veces su valor medio ($TSR = 4$), lo que conlleva a que dicha zona presente la mayor variación del flujo en todo el dominio.

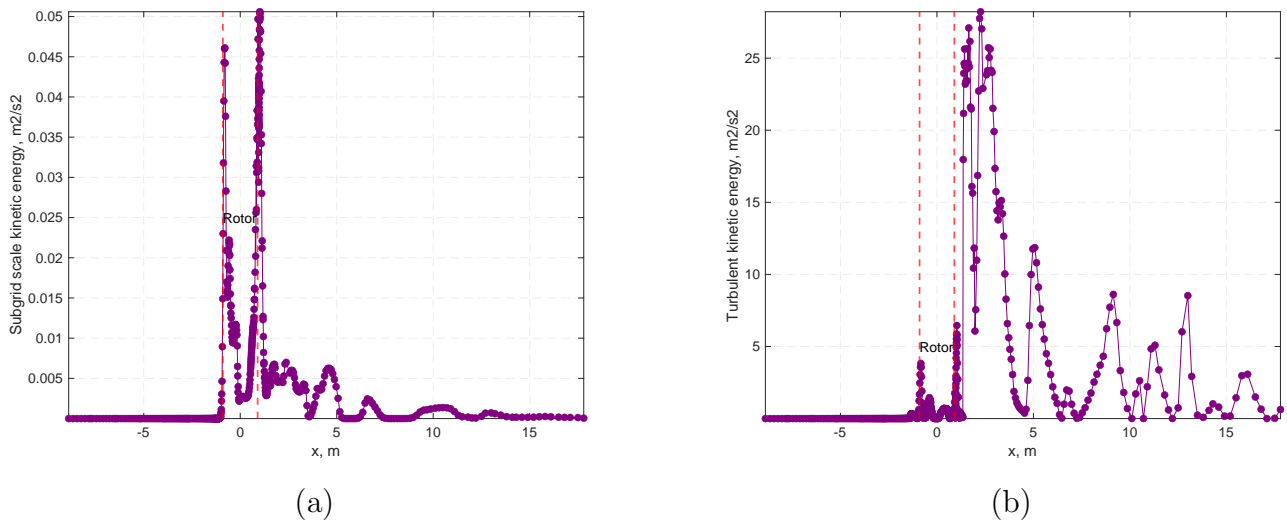


Figura 7.10: Línea central: (a) Energía cinética sgs v/s Posición; (b) Energía cinética total v/s Posición, caso laminar

Analizando la entrada de las simulaciones, solo el caso turbulento presenta una mayor proporción de energía cinética sub grilla (k_{sgs}) comparada a la resuelta (k_{res}) (Figura 7.11(b)). Se puede interpretar que la baja calidad de malla en la entrada del dominio fuerza a modelar toda la variación del flujo impuesto por la condición de inlet. Lo anterior se respalda al calcular la energía total, donde presenta la misma magnitud que la expuesta por la sub malla, como lo indica la Figura 7.11(b).

Interpretando la Figura 7.11(b), resulta un hecho la existencia de la disipación de energía del flujo justo antes de entrar en contacto con el aerogenerador. La existencia de disipación de escala SGS es congruente al método DKE seleccionado en configuración, ya que según la Ecuación (4.17), existe un transporte de energía en términos de generación y disipación dentro de la pequeña escala (caso contrario a modelos como Smagorinsky-Lilly, donde SGS solo es parte de la disipación de la escala calculada). Dicha caída de energía en el dominio es posible de vincular a la disminución de velocidad de rotor del 1 % para ciertos instantes (Sección 7.2.1), ya que si existe disipación de

energía, el flujo se encuentra en el rango disipativo de la cascada energía descrita por la Figura 3.54. En relación a su valor máximo, se ubica de forma homologa al laminar, pero presenta un valor cercano al 60 % de la energía de la turbulencia total aguas abajo del rotor del caso laminar.

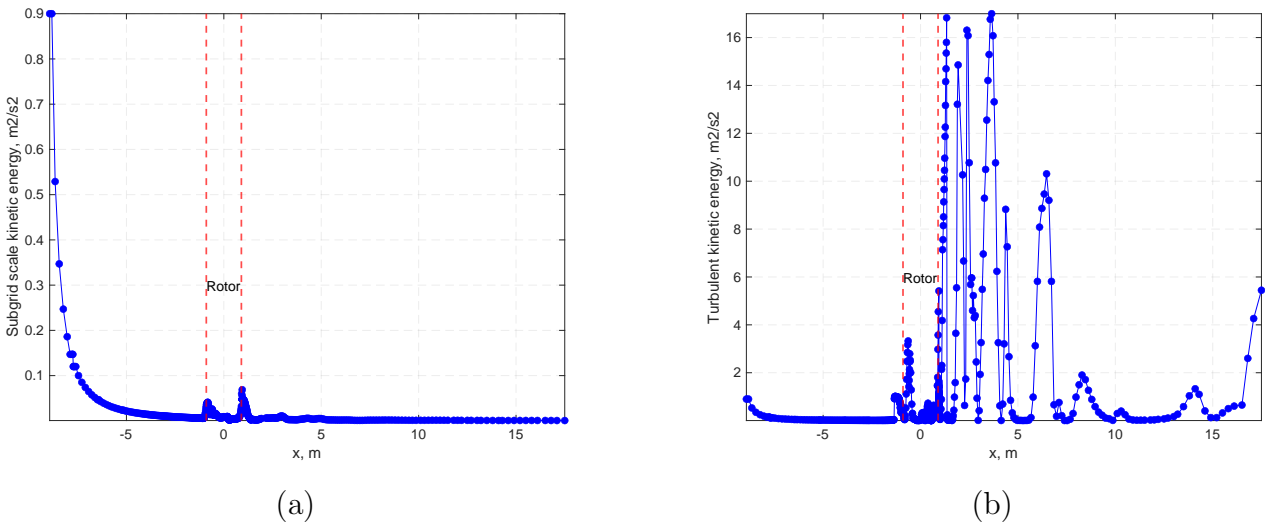


Figura 7.11: Línea central: (a) Energía cinética sgs v/s posición; (b) Energía cinética total v/s posición, caso turbulento

El flujo laminar pulsante, al tener una frecuencia y una función sinusoidal definida (Ecuación (4.26)), presenta la variación del flujo en el esquema de resolución LES, ya que la energía SGS es nula, según la Figura 7.12(a). Los valores de energía cinética total son cercanos a 0.9 (m^2/s^2), resultando comparables en magnitud al caso turbulento en k_{sgs} .

Lograr dichos valores de energía cinética en el inlet otorgan congruencia de la simulación, ya que los dos casos presentan idéntica intensidad de la turbulencia del inlet (10 %). En torno a la disipación, el caso pulsante no la presenta al tener un valor sostenido hasta colisionar con el rotor (Figura 7.12(b)).

El valor máximo de energía cinética total del dominio se encuentra posterior al rotor, de forma similar a los otros regímenes, pero se destaca que sus magnitudes son comparables al caso turbulento.

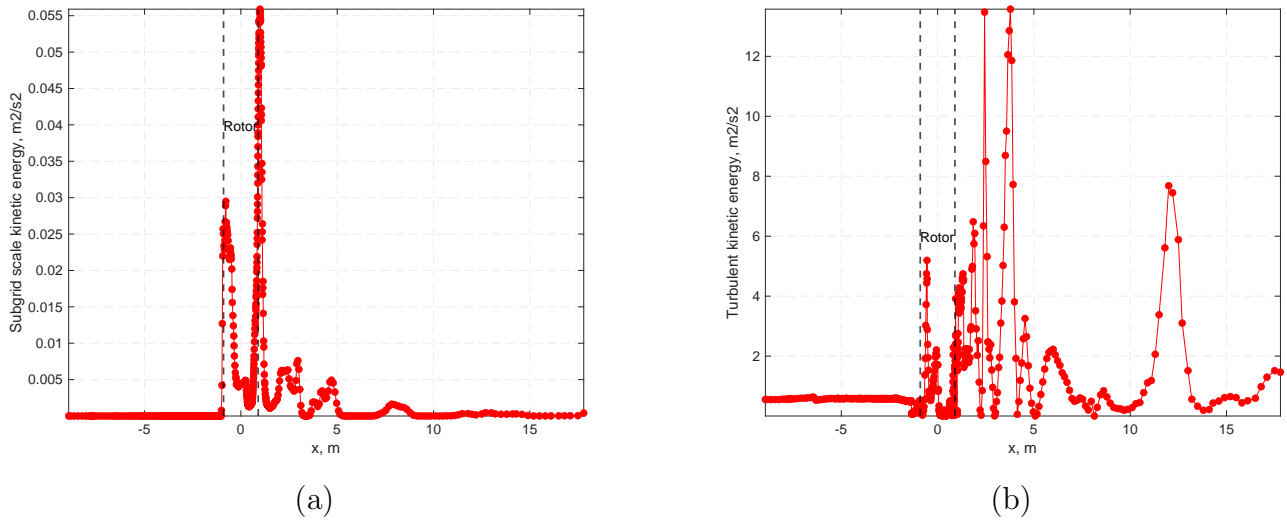


Figura 7.12: Línea central: (a) Energía cinética sgs v/s posición; (b) Energía cinética total v/s posición, caso laminar pulsante.

El análisis de energía cinética de la turbulencia, tanto para el esquema SGS y resuelto, solo es representativo para la zona de rotor y aguas arribas de este, ya que el flujo posterior al aerogenerador presenta una gran distribución de variación de velocidad, que se traducen en diferentes magnitudes en un estudio de contorno, como lo demuestran las figuras 7.13, 7.14, 7.15. En términos de magnitud no resultan ser comparables, sin embargo, existe una tendencia al aumento y ubicación del máximo de energía cinética de la turbulencia en los sectores colindantes a las aspas, de forma transversal.

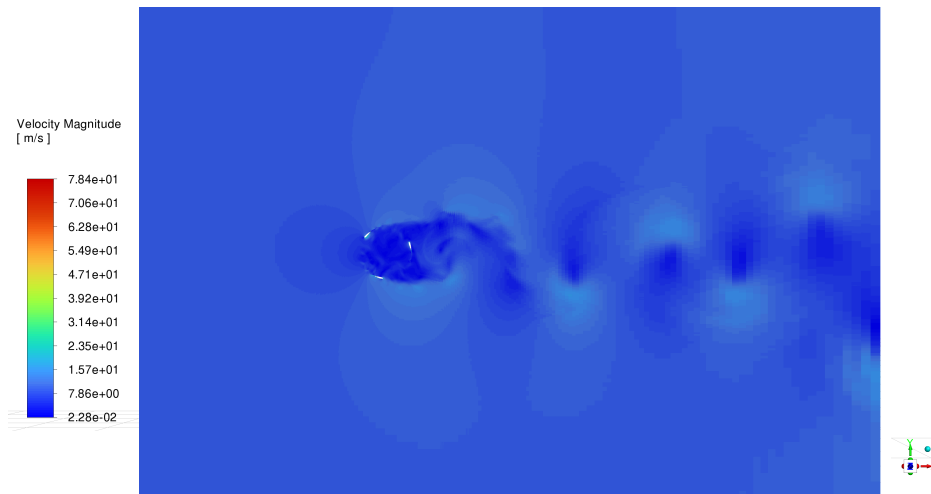


Figura 7.13: Contorno de magnitud de velocidad, caso laminar

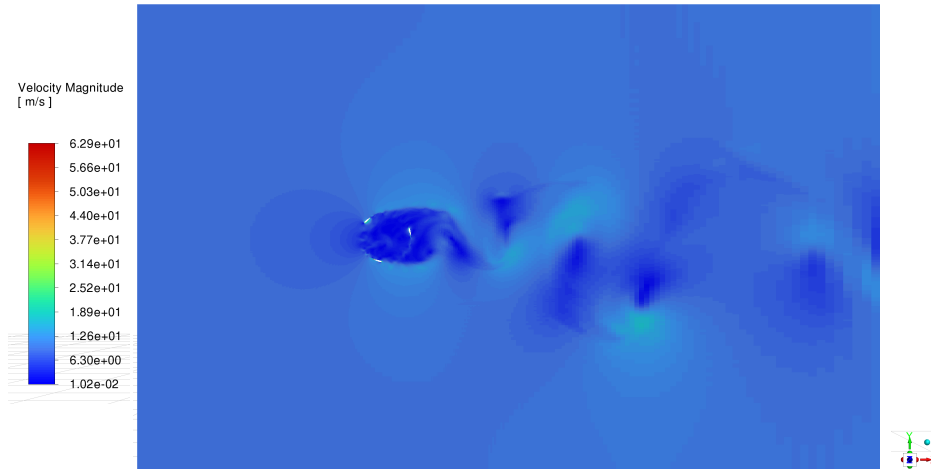


Figura 7.14: Contorno de magnitud de velocidad, caso turbulento

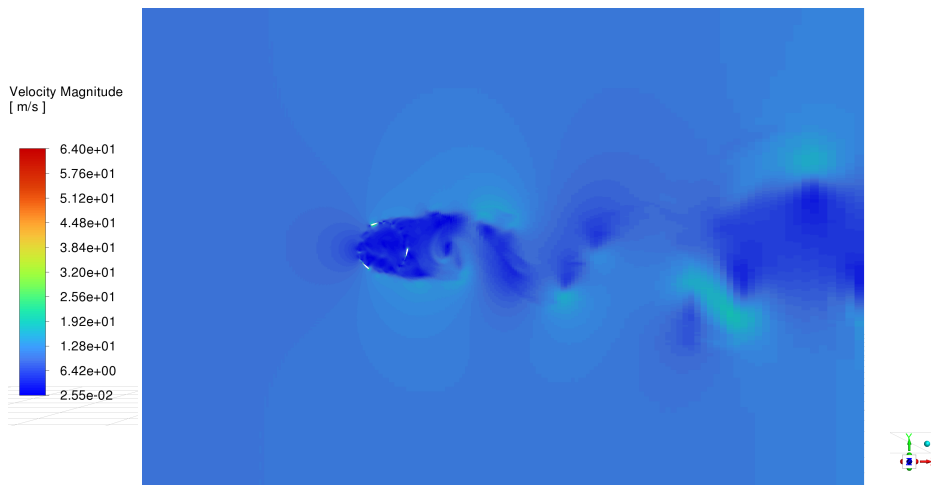


Figura 7.15: Contorno de magnitud de velocidad, caso laminar pulsante

Capítulo 8

Conclusiones y Recomendaciones

Se logra evaluar exitosamente la capacidad de un dominio 2D en la resolución de la aceleración de un rotor VAWT con sistema de rotación 6DOF y esquema de flujo LES. Con respecto a la puesta en marcha del rotor, éste presenta un comportamiento similar a CFDs de literatura con inercia y dimensiones comparables, pero discrepa en su velocidad tangencial terminal al poseer una mayor velocidad media de inlet. El estado estadísticamente estacionario se establece al poseer un valor de coeficiente de potencia nulo al lograr un $TSR = 4$, comparable a simulaciones de similares características.

Con respecto al efecto del régimen de flujo de un rotor en su estado estadísticamente estacionario, se concluye que la intermitencia de flujo tiene un mayor impacto en la operación de un rotor ya acelerado ($TSR = 4$) por sobre las características inherentes de un flujo turbulento. Se afirma la hipótesis que posiciona las fluctuaciones de velocidad sobre la turbulencia, ya que los resultados del flujo laminar pulsante representan un aumento en la energía capturada en relación al laminar, manifestado en un aumento de hasta un 3% de su velocidad de rotor en estado estadísticamente estacionario. Por el contrario, el caso turbulento presenta un comportamiento similar al laminar para todo tiempo, pero tiende a desacelerar levemente entre un 0.5% a 1%.

El aumento de velocidad del caso pulsante se asocia principalmente por su frecuencia de 5 (Hz). Este valor se posiciona en la escala micro meteorológica, la cual dispone energía adicional que en la práctica no es colectada por turbinas en operación. El estudio dimensional lleva consigo la sensibilidad del rotor a dicha frecuencia, donde los datos de velocidad tangencial evidencian efectivamente una reacción a dichas ráfagas de periodicidad constante, además de no presentar disipación de energía cinética turbulenta en el dominio.

De acuerdo a los resultados invariantes, o incluso, negativos del caso turbulento, demuestran la disipación total de energía cinética turbulenta (k_{tot}) de la entrada antes de que el flujo incida sobre el rotor. Se espera entonces que el comportamiento de la velocidad tangencial sea comparable al laminar, pero experimentando velocidades levemente en desmedro debido a la disipación energética.

En cuanto a la incidencia del rotor en el dominio, este induce la mayor variación de velocidad, independiente cual sea el régimen de estudio. Las altas velocidades de rotación (4 veces la de entrada) afectan en dirección y magnitud al flujo que posteriormente entrará en contacto con el rotor, conllevando a que el flujo incidente siempre se vea influenciado por la rotación del cuerpo al encontrarse a velocidades de su estado estadísticamente estacionario (TSR alto). Aguas abajo del rotor se evidencia para todo tiempo la formación de estelas (wake), que representa la mayor porción de energía cinética de la turbulencia del dominio (sobre $14 \text{ m}^2/\text{s}^2$). Estas tienen un comportamiento propio de la operación de un aerogenerador posterior de su etapa de puesta en marcha. Finalmente, la intensidad de la turbulencia del flujo de entrada (10%) no es un factor determinante en la operación de un rotor VAWT que se encuentra a un $TSR = 4$. Si bien presenta ciertas diferencias entre los experimentos, no superan el 3% de discrepancias con el flujo invariante. En términos de energía cinética turbulenta total (k_{tot}), la intensidad turbulenta (IT) de la entrada representa solo un 5% de dicha energía en la zona aguas abajo del rotor para el caso turbulento, y para el laminar pulsante, valores cercanos al 6%. Con tales magnitudes, se afirma que el propio rotor es el factor principal en la inducción de fluctuaciones de velocidad en el flujo que posteriormente entrará en contacto con sus aspas.

Se recomienda considerar un estudio de aceleración de idénticas características para un dominio 2.5D de $H = 0.5c$, considerando el esquema de flujo LES y 6DOF. Si bien el dominio 2D presenta valores comparables a la literatura, el modelo LES al ser esquema explícitamente 3D, se debe cuantificar la velocidad en la coordenada vertical del rotor, y como esta afecta en la puesta en marcha del aerogenerador.

En relación a la malla híbrida realizada, se expresa la necesidad de realizar una disminución en el tamaño de elementos de la primera capa colindante a los airfoils, ya que los valores de y^+ para ciertos instantes de tiempo superaban lo recomendado para simulaciones LES ($y^+ < 3$).

Finalmente, resultaría relevante plantear un estudio paramétrico de frecuencias para un flujo pulsante sobre un rotor en operación durante su estado estadísticamente estacionario. Estos deben contemplar desde 5 (Hz) hasta valores cercanos 0.1 (Hz), considerando parámetros de diseño y valores medios de velocidad invariantes. Lo anterior otorgará información sobre la reacción de un rotor de inercia comercial frente a la energía contenida en las ráfagas de altas frecuencias, que eventualmente se verían traducidas en un aumento de colección energética para una operación de VAWT con sistema de control de ráfagas.

Referencias

- [1] G. Olah, *Beyond oil and Gas: The methanol Economy*, Weinheim, 2006.
- [2] Statista, “Emisiones mundiales de dióxido de carbono,” Jun. 2024. [Online]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/635894/emisiones-mundiales-de-dioxido-de-carbono/>
- [3] IEA, “Renewable energy consumption,” Jan. 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024/global-overview>
- [4] Statista, “Distribución porcentual de la generación de electricidad en el mundo en 2022,” Jun. 2024. [Online]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/600383/electricidad-generada-en-el-mundo-por-fuente-energetica/>
- [5] Wwea, “Wwea annual report 2023,” 2024. [Online]. Available: <https://wwindea.org/AnnualReport2023>
- [6] G. de Chile, “Energía eólica.” 2022. [Online]. Available: <https://generadoras.cl/tipos-energia/energia-eolica>
- [7] A. Gupta, H. A. Abderrahmane, and I. Janajreh, “Flow analysis and sensitivity study of vertical-axis wind turbine under variable pitching,” *Applied Energy*, vol. 358, p. 122648, Mar. 2024. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626192400031X>
- [8] M. T. Asr, E. Z. Nezhad, F. Mustapha, and S. Wiriadidjaja, “Study on start-up characteristics of H-Darrieus vertical axis wind turbines comprising NACA 4-digit series blade airfoils,” *Energy*, vol. 112, pp. 528--537, Oct. 2016. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544216308337>
- [9] A. Carbó Molina, T. De Troyer, T. Massai, A. Vergaerde, M. C. Runacres, and G. Bartoli, “Effect of turbulence on the performance of VAWTs: An experimental study in two different wind tunnels,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 193, p. 103969, Oct. 2019. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167610519305690>

- [10] Hi-Vawt, “Ds-1500 VAWT Information,” 2012. [Online]. Available: <http://www.hi-vawt.com.tw/en/ds1500w.html>
- [11] F. Emejeamara, A. Tomlin, and J. Millward-Hopkins, “Urban wind: Characterisation of useful gust and energy capture,” *Renewable Energy*, vol. 81, pp. 162--172, Sep. 2015. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148115002104>
- [12] J. He, X. Jin, S. Xie, L. Cao, Y. Wang, Y. Lin, and N. Wang, “CFD modeling of varying complexity for aerodynamic analysis of H-vertical axis wind turbines,” *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 2658--2670, Jan. 2020. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148119311528>
- [13] C. Li, S. Zhu, Y.-l. Xu, and Y. Xiao, “2.5D large eddy simulation of vertical axis wind turbine in consideration of high angle of attack flow,” *Renewable Energy*, vol. 51, pp. 317--330, Mar. 2013. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148112005770>
- [14] E. Hau, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. [Online]. Available: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-642-27151-9>
- [15] S. Eriksson, H. Bernhoff, and M. Leijon, “Evaluation of different turbine concepts for wind power,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 5, pp. 1419--1434, Jun. 2008. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032107000111>
- [16] D. A. Spera, *Fundamental Concepts in Wind Turbine Engineering*. American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [17] M. O. L. Hansen, *Aerodynamics of wind turbines*, 2nd ed. London ; Sterling, VA: Earthscan, 2008, oCLC: ocm86172940.
- [18] H. Riegler, “Hawt versus vawt: Small vawts find a clear niche,” *Refocus*, vol. 4, no. 4, pp. 44--46, 2003. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1471084603004335>
- [19] J. P. Abraham, B. D. Plourde, G. S. Mowry, W. J. Minkowycz, and E. M. Sparrow, “Summary of Savonius wind turbine development and future applications for small-scale power generation,” *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 4, no. 4, p. 042703, Jul. 2012. [Online]. Available: <https://pubs.aip.org/jrse/article/4/4/042703/281312/Summary-of-Savonius-wind-turbine-development-and>

- [20] J. V. Akwa, H. A. Vielmo, and A. P. Petry, "A review on the performance of Savonius wind turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 3054--3064, Jun. 2012. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112001505>
- [21] S. Roy and U. K. Saha, "Review of experimental investigations into the design, performance and optimization of the Savonius rotor," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 227, no. 4, pp. 528--542, Jun. 2013. [Online]. Available: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0957650913480992>
- [22] J. P. Abraham and B. Plourde, Eds., *Small-scale wind power: design, analysis, and environmental impacts*. New York [New York] (222 East 46th Street, New York, NY 10017): Momentum Press, 2014, oCLC: 885197454.
- [23] T. D. Ashwill, "Measured Data for the Sandia 34-Meter Vertical Axis Wind Turbine," 1988.
- [24] E. Möllerström, P. Gipe, J. Beurskens, and F. Ottermo, "A historical review of vertical axis wind turbines rated 100 kW and above," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 105, pp. 1--13, May 2019. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032118308153>
- [25] D. Wood, *Small Wind Turbines: Analysis, Design, and Application*, ser. Green Energy and Technology. London: Springer London, 2011. [Online]. Available: <https://link.springer.com/10.1007/978-1-84996-175-2>
- [26] L. Battisti, E. Benini, A. Brighenti, S. Dell'Anna, and M. Raciti Castelli, "Small wind turbine effectiveness in the urban environment," *Renewable Energy*, vol. 129, pp. 102--113, Dec. 2018. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148118305834>
- [27] A. Posa and E. Balaras, "Large Eddy Simulation of an isolated vertical axis wind turbine," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 172, pp. 139--151, Jan. 2018. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167610517305123>
- [28] E. Möllerström, F. Ottermo, J. Hylander, and H. Bernhoff, "Noise Emission of a 200 kW Vertical Axis Wind Turbine," *Energies*, vol. 9, no. 1, p. 19, Dec. 2015. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/9/1/19>
- [29] V. Katinas, M. Marčiukaitis, and M. Tamašauskienė, "Analysis of the wind turbine noise emissions and impact on the environment," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 825--831, May 2016. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115015233>

- [30] L. C. Pagnini, M. Burlando, and M. P. Repetto, “Experimental power curve of small-size wind turbines in turbulent urban environment,” *Applied Energy*, vol. 154, pp. 112--121, Sep. 2015. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261915005802>
- [31] E. Möllerström, F. Ottermo, A. Goude, S. Eriksson, J. Hylander, and H. Bernhoff, “Turbulence influence on wind energy extraction for a medium size vertical axis wind turbine: Turbulence influence on wind energy extraction for a medium size VAWT,” *Wind Energy*, vol. 19, no. 11, pp. 1963--1973, Nov. 2016. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/we.1962>
- [32] J. D. Anderson, *Fundamentals of aerodynamics*, sixth edition ed., ser. McGraw-Hill series in aeronautical and aerospace engineering. New York, NY: McGraw Hill Education, 2017.
- [33] M. J. T. Loutun, D. H. Didane, M. F. Mohideen Batcha, K. Abdullah, M. F. Mohd Ali, A. N. Mohammed, and L. O. Afolabi, “2D CFD Simulation Study on the Performance of Various NACA Airfoils,” *CFD Letters*, vol. 13, no. 4, pp. 38--50, Apr. 2021. [Online]. Available: <http://www.akademiabaru.com/submit/index.php/cfdl/article/view/3415>
- [34] T. Burton, Ed., *Wind energy: handbook*. Chichester ; New York: J. Wiley, 2001.
- [35] R. Eppler, *Airfoil Design and Data*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1990. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-02646-5>
- [36] I. ANSYS, “Ansys_fluent_theory_guide.pdf,” 2021.
- [37] J. Tu, G.-H. Yeoh, and C. Liu, “CFD Mesh Generation: A Practical Guideline,” in *Computational Fluid Dynamics*. Elsevier, 2018, pp. 125--154. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081011270000040>
- [38] M. Bern and P. Plassmann, “Mesh Generation,” in *Handbook of Computational Geometry*. Elsevier, 2000, pp. 291--332. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444825377500073>
- [39] J. Blazek, *Computational fluid dynamics: principles and applications*, 3rd ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2015.
- [40] I. Sadrehaghghi, “Mesh Generation in CFD,” in *CFD Open Series*. Annapolis, MD, 2020.
- [41] I. ANSYS, “Meshing User’s Guide,” in *ANSYS Meshing User’s Guide*. ANSYS, Inc, 2010.
- [42] T. Ahmad, S. L. Plee, and J. P. Myers, “FLUENT User’s Guide,” 2021.

- [43] X. Wang, X. Luo, B. Zhuang, W. Yu, and H. Xu, “6-DOF Numerical Simulation of the Vertical-Axis Water Turbine,” in *ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference: Volume 1, Symposia – Parts A, B, C, and D*. Hamamatsu, Japan: ASMEDC, Jan. 2011, pp. 673--678. [Online]. Available: <https://asmedigitalcollection.asme.org/FEDSM/proceedings/AJK2011/44403/673/361992>
- [44] GoEngineer, “SOLIDWORKS Flow Simulation Sliding Mesh Explained,” Dec. 2016. [Online]. Available: <https://www.goengineer.com/blog/solidworks-flow-simulation-sliding-mesh>
- [45] *Classical mechanics*, Third edition, fourteenth impression ed. Noida: Pearson India Education Services, 2016, oCLC: 1423811257.
- [46] J. L. Tennekes H, *A First Course in Turbulence*, 1st ed. MIT Press, 1972.
- [47] S. M. Ghiaasiaan, *Convective heat and mass transfer*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2011.
- [48] D. C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*, 3rd ed. DCW, 2006.
- [49] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*, 2nd ed. Harlow, England ; New York: Pearson Education Ltd, 2007, oCLC: ocm76821177.
- [50] J. H. Ferziger, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 4th ed. Springer, 2020, oCLC: ocm76821177.
- [51] M. E. Salgado, J. I. Yuz, and R. A. Rojas, “Análisis de Sistemas Lineales.”
- [52] A. Posa and E. Balaras, “Large Eddy Simulation of an isolated vertical axis wind turbine,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 172, pp. 139--151, Jan. 2018. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167610517305123>
- [53] J. M. Foale, “Simulating Extinction and Blow-off in Kerosene Swirl Spray Flames.”
- [54] W.-W. Kim, S. Menon, W.-W. Kim, and S. Menon, “Application of the localized dynamic subgrid-scale model to turbulent wall-bounded flows,” in *35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. Reno,NV,U.S.A.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Jan. 1997. [Online]. Available: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.1997-210>
- [55] M. Maalouly, M. Souaiby, A. ElCheikh, J. Issa, and M. Elkhoury, “Transient analysis of H-type Vertical Axis Wind Turbines using CFD,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 4570--4588, Nov. 2022. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352484722006916>

- [56] Y. Celik, L. Ma, D. Ingham, and M. Pourkashanian, "Aerodynamic investigation of the start-up process of H-type vertical axis wind turbines using CFD," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 204, p. 104252, Sep. 2020. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167610520301628>
- [57] A. Posa and E. Balaras, "Large Eddy Simulation of an isolated vertical axis wind turbine," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 172, pp. 139--151, Jan. 2018. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167610517305123>
- [58] A. Rezaeiha, H. Montazeri, and B. Blocken, "CFD analysis of dynamic stall on vertical axis wind turbines using Scale-Adaptive Simulation (SAS): Comparison against URANS and hybrid RANS/LES," *Energy Conversion and Management*, vol. 196, pp. 1282--1298, Sep. 2019. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890419307526>