



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROPUESTA DE MODIFICACIÓN Y
ANÁLISIS MEDIANTE CFD DEL PERFIL
AERODINÁMICO PARA UN ROTOR DE UN
AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL
BIOINSPIRADO EN LA ALETA DE LA
BALLENA JOROBADA

TESIS POR ARTÍCULO ESPECIALIZADO

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA:

M. en IATM. JULIO CESAR MARÍN AGUILAR

COMITÉ DE TUTORES

DRA. MIRIAM SÁNCHEZ POZOS

DR. BORIS MIGUEL LÓPEZ REBOLLAR

DR. J. CUAUHTÉMOC PALACIOS GONZÁLEZ



MARZO DE 2025.

RESUMEN

Este estudio abordó la modificación geométrica de los álabes en una turbina eólica de eje vertical Darrieus recta, mediante un diseño biomimético inspirado en las aletas dorsales de la ballena jorobada, con el objetivo de incrementar el coeficiente de potencia (C_p) a través de la modificación de los coeficientes de sustentación (C_L) y arrastre (C_D). Para ello, se ajustaron protuberancias o tubérculos en el borde de ataque del perfil aerodinámico y se evaluaron distintas configuraciones geométricas. El análisis se hizo mediante simulaciones numéricas, utilizando modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD). Los coeficientes aerodinámicos resultantes se integraron en el modelo de Tubo Doble de Corriente Múltiple (DMST) para estimar el rendimiento del rotor y comparados con los valores obtenidos en una aeroturbina equipada con perfiles estándar NACA-0018.

Los resultados mostraron que la eficacia de las configuraciones biomiméticas en los rotores varía según la relación de velocidad en la punta (TSR). Para $TSR < 1$, la combinación geométrica menos favorable ($A/\bar{c} = 0.1$, $\lambda/\bar{c} = 1$) presentó un desempeño similar al rotor sin modificar. Sin embargo, al superar este umbral ($TSR > 1$), el rendimiento comenzó a disminuir, alcanzando reducciones de hasta -39.76% y -24.21% , según los modelos empleados en el DMST. Por otro lado, la configuración más favorable ($A/\bar{c} = 0.2$, $\lambda/\bar{c} = 4$), en el intervalo $0.25 < TSR < 1.75$, logró incrementos en el C_p de entre 5.4% y 6.7% en comparación con la aeroturbina de perfiles estándar, alcanzando su máximo desempeño en $TSR = 2$ para ambos métodos DMST utilizados.

La comparación entre los dos modelos DMST empleados reveló consistencia en el rango de TSR bajos ($0.25-0.75$), con diferencias relativas inferiores al 2% . No obstante, a medida que la TSR aumentó, las divergencias entre los métodos fueron incrementándose, alcanzando valores de hasta 87.5% en TSR elevadas ($1.75-2.00$) para la configuración geométrica desfavorable.

En conclusión, las modificaciones biomiméticas propuestas demostraron su potencial para mejorar el coeficiente de potencia de este tipo de aeroturbinas de eje vertical, particularmente en rangos específicos de la TSR . Estos hallazgos apuntan que la biomimetización es una estrategia viable para mejorar la eficiencia energética de turbinas eólicas funcionando a bajas velocidades de viento, lo que contribuye al desarrollo de técnicas más eficientes y adaptables a entornos urbanos y rurales.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIAS	iii
RESUMEN.....	iv
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABLAS	xi
NOMENCLATURA	xii
INTRODUCCIÓN	xvi
a) Presentación	xvi
b) Estructura de la tesis.....	xviii
c) Planteamiento del problema	xix
d) Hipótesis.....	xix
e) Objetivos	xix
f) Alcances y limitaciones	xx
CAPÍTULO I.	
ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	2
1.1. Aerogeneradores de Eje Vertical Tipo Darrieus.....	2
1.2. Perfiles Aerodinámicos y su Importancia en los rotores Darrieus.....	4
1.3. Biomimética en Ingeniería	6
1.4. Simulaciones y modelado de aeroturbinas de eje vertical	12
CAPÍTULO II.	
MARCO TEÓRICO.....	17
2.1. Descripción general de los sistemas de energías renovables	17
2.2. Energía eólica	20
2.3. Aerogeneradores	23
2.4. Aerodinámica del rotor Darrieus recto.....	30
2.5. Estrategias generales para el diseño de aeroturbinas.....	37
2.6. Modelos basados en tubos de corriente	38
2.7. Dinámica de Fluidos Computacional.....	44
2.8. Capa límite	47
2.8.1. Número de Reynolds para placas planas	48

2.8.2. Coeficiente de fricción	49
2.9. Tratamientos cerca de la pared en la CFD	49
2.9.1. Cálculo de y^+ en función de y^+ deseado	51
2.9.2. Consideraciones para el mallado en regiones cercanas a la pared	52
2.9.3. Estrategias de mallado en regiones cercanas a la pared para modelos de turbulencia con número de Reynolds bajo	53
2.10. Rosa de vientos	53
2.11. Sistemas biomiméticos.....	55
CAPÍTULO III.	
METODOLOGÍA	61
3.1. Definición del área de estudio	62
3.2. Análisis estadístico y probabilístico de los datos meteorológicos	63
3.3. Diseño biomimético de los álabes	65
3.4. Simulación numérica mediante CFD	66
3.5. Aplicación del modelo DMST	66
3.6. Comparación de los modelos DMST	67
CAPÍTULO IV.	
RESULTADOS	69
4.1. Revista Ingeniería Investigación y Tecnología (Artículo 1).....	69
4.2. Revista Ingeniería Investigación y Tecnología (Artículo 2).....	70
4.3. Discusión de resultados	70
CONCLUSIONES	74
ANEXOS.....	78
A.1. Caracterización de los aerogeneradores de eje horizontal y tendencias	78
A.2. Teoría del <i>momentum</i>	80
A.3. Discretización de la malla cerca de la pared	90
A.4. Aspectos probabilísticos para variables continuas aleatorias	94
A.4.1. Función de densidad de la probabilidad	95
A.4.2. Función de distribución acumulada	96
A.4.3. Raíz error cuadrático medio (RMSE)	97
A.5. Descripción de algunas distribuciones de probabilidad en el análisis de datos	98
A.5.1. Distribución de Weibull.....	98

A.5.2. Distribución Rayleigh.....	99
A.5.3. Distribución Normal	100
A.5.4. Distribución Gamma.....	101
A.5.5. Distribución Lognormal	102
A.6. Exploración de los datos en el área de estudio en Matlab®	104
A.7. Intensidad de la turbulencia y relación de viscosidad turbulenta	108
PUBLICACIONES Y CONTRIBUCIONES ACADÉMICAS.....	110
REFERENCIAS.....	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Ballena jorobada. Ilustración de las protuberancias en la aleta dorsal.....	7
Figura 2.1.	Capacidad de generación de energía instalada por fuente en el Escenario de Nuevas Políticas, 2000–2040	19
Figura 2.2.	Representación de un sistema de energía moderno, que incorpora fuentes de energía renovables, generación distribuida y funciones de red inteligente. La integración es posible gracias al uso extensivo de la electrónica de potencia	21
Figura 2.3.	Principales etapas en la transformación de la energía del viento que efectúa un aerogenerador	23
Figura 2.4.	Rotores eólicos	24
Figura 2.5.	Distintas formas de agrupar a los aerogeneradores	25
Figura 2.6.	Molino de viento en Nashtifan, Irán. Características: 6 palas, longitud 15 m y diámetro del rotor de 7 m	26
Figura 2.7.	a) Representación de los partes principales del aerogenerador Darrieus moderno; b) Detalle del tren de potencia	27
Figura 2.8.	Distintos arreglos de la aeroturbina Darrieus	27
Figura 2.9.	Desarrollo del diseño en aerogeneradores de eje vertical de tipo sustentación	28
Figura 2.10.	Partes fundamentales en los aerogeneradores de eje horizontal y eje vertical	28
Figura 2.11.	Dimensiones de diseño de una aeroturbina tipo H	31
Figura 2.12.	Triángulos de velocidades del álabe en diferentes posiciones azimutales	31
Figura 2.13.	Triángulos de velocidades alrededor de un álabe de un rotor Darrieus	32
Figura 2.14.	Ángulos de ataque con respecto a los ángulos azimutales de los álabes de la turbina eólica a relaciones de velocidad TSR de 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0; con factor de inducción axial cero.....	33
Figura 2.15.	Gráficos de los coeficientes aerodinámicos de sustentación (C_L) y arrastre (C_D) de un álabe NACA-0018 para un $Re = 5 \times 10^5$	34
Figura 2.16.	Esquema de fuerzas sobre un álabe de una turbina eólica vertical	35
Figura 2.17.	Triángulos de velocidades y de fuerzas aerodinámicas en diversos ángulos de rotación de la aeroturbina	36
Figura 2.18.	Estrategias de diseño aplicadas comúnmente en aerogeneradores de eje vertical	37
Figura 2.19.	Principales métodos teóricos para los aerogeneradores de eje vertical de álabe recto	38
Figura 2.20.	Representación de los modelos de disco actuador (izquierda) y de tubo de corriente único (derecha), según P. M. Kumar et al. (2017)	39
Figura 2.21.	Esquema del modelo de tubo doble de corriente	40
Figura 2.22.	Esquema ilustrativo del modelo de tubos de corriente múltiples	41
Figura 2.23.	a) Esquema de discos actuadores en tándem; b) Representación esquemática del modelo DMST	42
Figura 2.24.	Representación de los tubos de corriente para la aeroturbina Darrieus tipo H en el modelo DMST.....	42
Figura 2.25.	Configuración geométrica del modelo DMST con $N_{st} = 5$	43
Figura 2.26.	Alcance multidisciplinario de la CFD.....	45
Figura 2.27.	Funciones de interconectividad de los tres elementos principales dentro del esquema de análisis de la CFD.....	46
Figura 2.28.	Expansión de la capa límite externa en una placa plana, adyacente a la superficie	48
Figura 2.29.	Diferentes regiones en la capa límite utilizados en la CFD	51

Figura 2.30. Representación de la gráfica de una rosa de vientos para un sitio elegido. Los círculos concéntricos representan incrementos del 5% de probabilidad de que el viento provenga cierta dirección con la velocidad en un intervalo específico.....	54
Figura 2.31. Rosas de viento que muestran las distribuciones de frecuencia, velocidad y energía en diferentes direcciones	55
Figura 2.32. Áreas del conocimiento de las que se apoya la biomimética.....	56
Figura 2.33. Ejemplos encontrados en el medio ambiente estudiados por la biomimética.....	57
Figura 2.34. Ballena jorobada.....	58
Figura 2.35. Técnica de alimentación mediante redes de burbujas de una ballena jorobada.....	58
Figura 2.36. Tubérculos en las aletas dorsales de una ballena jorobada	59
Figura 2.37. Representación esquemática de la migración de vórtices hacia los valles entre protuberancias.....	59
Figura 3.1. Diagrama de bloques empleada en el análisis de modificaciones biomiméticas en perfiles aerodinámicos NACA-0018	61
Figura 3.2. Ubicación de la zona de estudio en Google Maps, destinada al análisis de las características del viento para el desarrollo del prototipo de la aeroturbina.....	62
Figura 3.3. a) Rosa de vientos para la zona de estudio (elaborada en WRPLOT®); b) Visualización de la rosa de vientos en Google Earth®	63
Figura 3.4. Histograma para los datos de la velocidad del viento en San Nicolas Tolentino	64
Figura A.1. Aerogenerador de eje horizontal de gran escala (Las longitudes aproximadas de la torre y de cada álabe son 270 y 90 metros, respectivamente)	78
Figura A.2. Tren de potencia completo de un aerogenerador DeWind 8.2	78
Figura A.3. Principales componentes de un aerogenerador de eje horizontal (HAWT).....	79
Figura A.4. Evolución del tamaño y de la capacidad de los HAWT a través del tiempo	80
Figura A.5. Crecimiento del tamaño del rotor de los HAWT desde 1980.....	80
Figura A.6. Esquema del tubo de corriente para un aerogenerador	81
Figura A.7. Disco actuador en un aerogenerador.....	81
Figura A.8. Representación gráfica de la velocidad promedio y la presión estática del tubo de corriente, incluyendo en el disco actuador.....	82
Figura A.9. Volúmenes de control establecidos por un tubo de corriente para el concepto del rendimiento ideal en un rotor eólico.....	82
Figura A.10. Gráficas de C_T , C_p y V/V_∞ con respecto al factor de inducción axial (a)	86
Figura A.11. Comportamiento de los coeficientes de empuje experimentales y teóricos.....	87
Figura A.12. Relación entre el coeficiente de empuje y el factor de inducción axial utilizando una ecuación empírica basada en datos experimentales.....	88
Figura A.13. Coeficientes de momento con respecto a la relación de velocidad en la punta.....	89
Figura A.14. Coeficientes de potencia con respecto a la relación de velocidad en la punta.....	90
Figura A.15. Esquema que entrelaza la relación entre el espesor de la capa límite y las capas de resolución	90
Figura A.16. Ilustración entre la distancia “ y ” al centroide de la celda y la distancia “ y_H ” relativa con la altura de la capa, medidas a partir de la pared del sólido.....	91
Figura A.17. Representación de la altura total y la razón de crecimiento entre cada capa	91
Figura A.18. Comparación entre una transición adecuada y deficiente observando la transición de volumen de la última celda de resolución y de la primera que conforma el flujo libre	93
Figura A.19. Representación de la semejanza entre las áreas de la última capa de resolución y la primera franja donde inicia el dominio de la corriente libre	93

Figura A.20. Histogramas de frecuencia relativa para anchos de intervalos cada vez más reducidos	95
Figura A.21. Función de densidad de la probabilidad.....	96
Figura A.22. El histograma se aproxima a una función de densidad de la probabilidad	96
Figura A.23. Representación de la función de distribución acumulada	97
Figura A.24. Diversas formas de las distribuciones de Weibull cuando $\alpha = 1$	99
Figura A.25. Bosquejo de la distribución de probabilidad normal	101
Figura A.26. Ejemplos de PDF con distintos parámetros de “ μ ” y “ σ ”	101
Figura A.27. Funciones de densidad de probabilidad lognormal para distintos valores de los parámetros μ y σ^2	104
Figura A.28. Distribución de densidad (PDF) de los datos del viento en MATLAB®	105
Figura A.29. PDF de Rayleigh junto con sus valores característicos en MATLAB®	105
Figura A.30. PDF Normal con sus valores característicos en MATLAB®	105
Figura A.31. Funciones CDF para la distribución de Rayleigh y Normal en MATLAB®.....	106
Figura A.32. Funciones de no excedencia para la distribución de Rayleigh y Normal en MATLAB®	106
Figura A.33. PDF Weibull con sus valores característicos en MATLAB®	106
Figura A.34. PDF Gamma con sus valores característicos en MATLAB®	107
Figura A.35. PDF Lognormal con sus valores característicos en MATLAB®	107
Figura A.36. Curvas PDF examinadas dentro de MATLAB® para los datos del viento de la región de observación.....	107

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Contrastes entre las energías renovables y convencionales.....	19
Tabla 2.2. Comparación entre diferentes tipos de aeroturbinas.....	29
Tabla 2.3. Propiedades geométricas de los rotores H	30
Tabla 2.4. Pasos para seguir en el cálculo de y para una y^+ dada	52
Tabla 3.1. Indicadores de ajuste para distintas PDF's de la zona de estudio.....	65
Tabla A.1. Algunos valores de referencia para la intensidad de la turbulencia (I)	108

NOMENCLATURA

Símbolo	Unidades	Definición
α	°	Ángulo de ataque del álabe individual
α_0	°	Ángulo de fijación de los álabes (pitch)
δ_{99}	m	Grosor (o espesor) de la capa límite
$\bar{\epsilon}$	m ² /s ³	Tasa de disipación de la energía turbulenta
θ	°, rad	Ángulo azimutal de posición para un álabe dentro del rotor
θ_{st}	°, rad	Ángulo azimutal de posición para el punto medio de un arco del rotor delimitado por un tubo de corriente
λ	m °, rad	Período o longitud de onda de la función cosenoidal Ángulo de desplazamiento de los niveles o etapas del rotor
μ	kg/m·s	Viscosidad absoluta o dinámica del fluido
μ_t	kg/m·s	Viscosidad turbulenta
ν	m ² /s	Viscosidad cinemática del fluido
ρ	kg/m ³	Densidad del fluido
σ	–	Solidez del rotor
τ_w	N/m ²	Esfuerzo cortante en la pared
ω	rad/s 1/s	Velocidad angular del rotor Razón de disipación específico
$\Delta\theta$	°, rad	Incremento (o división) angular azimutal para los segmentos de los tubos de corriente
ΔH	m	Tamaño de los elementos verticales en la discretización del rotor
κ	–	Constante de von Kármán
a	–	Factor de inducción axial
a'	–	Factor de inducción axial para el segundo disco actuador (mitad aguas abajo del tubo de corriente)
c	m	Cuerda del álabe
\bar{c}	m	Cuerda promedio del álabe
h	m	Altura del nivel o etapa del rotor
k	m ² /s ²	Energía cinética turbulenta
m	kg	Masa
\dot{m}	kg/s	Flujo másico o flujo de masa
p_∞	Pa	Presión estática de la corriente libre (presión atmosférica local)

p_w	Pa	Presión estática en la región de la estela
u^+	–	Velocidad normalizada por la velocidad de fricción
u_τ	m/s	Velocidad de fricción en la pared
\bar{u}	m/s	Velocidad promedio del flujo
u'	m/s	Raíz cuadrática media de las fluctuaciones de velocidad
u'_i	m/s	Velocidad fluctuante con respecto a la velocidad promedio
x_{cr}	m	Distancia sobre la placa plana donde el flujo laminar comienza a producir turbulencias
y	m	Distancia desde la pared al centroide de la primera celda de la malla
y^+	–	Espesor adimensional de la capa límite
y_F	m	Altura de la última capa de resolución en la malla
y_H	m	Altura de la primera capa de resolución en la malla
y_T	m	Altura total de las capas de resolución en la malla equivalente a δ_{99}
z	m	Coordenada sobre el borde de ataque del perfil en dirección de la envergadura del álabe
A	m	Amplitud de la función cosenoidal
A_c	m ²	Área de la sección transversal del rotor (proyección en la dirección del flujo)
A_d	m ²	Área de la sección transversal del disco actuador
A_F	m ²	Área aproximada del último elemento de la capa de resolución
A_I	m ²	Área aproximada del primer elemento de la capa que pertenece al flujo libre
A_{st}	m ²	Área frontal del disco actuador dentro del tubo de corriente
AG	–	Familia del perfil aerodinámico (Geometría del álabe)
B	–	Número de álabes en el rotor
C_f	–	Coefficiente de fricción
C_n	–	Coefficiente de fuerza normal del álabe en el rotor
C_t	–	Coefficiente de fuerza tangencial del álabe en el rotor
C_D	–	Coefficiente de arrastre del álabe individual
C_L	–	Coefficiente de sustentación del álabe individual
C_P	–	Coefficiente de potencia del rotor
C_Q	–	Coefficiente de momento del rotor
C'_Q	–	Coefficiente de momento (mitad corriente abajo del rotor)
C_T	–	Coefficiente de empuje
D	m	Diámetro del rotor

	N	Fuerza de arrastre (Drag)
D_T	m	Diámetro del eje central del rotor
E	-	Factor empírico adimensional (constante de von Kármán)
E_k	J	Energía cinética
F_n	N	Fuerza normal
F_t	N	Fuerza tangencial
G	-	Tasa de crecimiento entre capas de la malla
H	m	Envergadura del álabe o altura del rotor
H_0	m	Distancia vertical entre el suelo y la base del rotor
I	%	Intensidad de la turbulencia
L	N	Fuerza de sustentación (Lift)
M	N·m	Momento que actúa sobre un perfil en el rotor
N	-	Número de capas de la malla de resolución
N_θ	-	Número de incrementos angulares $\Delta\theta$
N_{st}	-	Numero de tubos de corriente (mitad del número de $\Delta\theta$)
N_H	-	Número de divisiones verticales para la discretización del rotor
P	W	Potencial total o útil
Q	N·m	Par de torsión generado por los álabes al eje del rotor
Q_{avg}	N·m	Par de torsión promedio en el rotor
Q_b	N·m	Par de torsión ejercido por un álabe al eje del rotor
R	m	Radio del rotor
Re	-	Número de Reynolds
$Re_{x,cr}$	-	Número de Reynolds crítico
T	N -	Fuerza de empuje (reacción) en el rotor (Thrust) Cantidad de niveles verticales dentro del rotor
T_{avg}	N	Fuerza de empuje promediada en el tiempo
T_i	N	Fuerza de empuje instantánea
TSR	-	Relación de velocidad en la punta (Tip Speed Ratio)
U_i	m/s	Velocidad promediada en el tiempo
V_∞	m/s	Velocidad de la corriente libre del flujo
V'_∞	m/s	Velocidad idealizada de corriente libre en la mitad del rotor (V_e)
V_c	m/s	Componente de la velocidad relativa en dirección tangencial al movimiento de rotación periférico del rotor

V_d	m/s	Velocidad promedio en el disco actuador
V'_d	m/s	Velocidad promedio en el segundo disco actuador (mitad aguas abajo del tubo de corriente)
V_e	m/s	Velocidad de equilibrio en la mitad del rotor
V_i	m/s	Velocidad inducida en la sección del álabe
$V_{i,n}$	m/s	Componente de la velocidad inducida en la dirección normal
V_t	m/s	Velocidad tangencial (o periférica) en el rotor (sección del álabe)
V'_i	m/s	Velocidad inducida en la sección del álabe (mitad aguas abajo del tubo de corriente)
V_R	m/s	Velocidad relativa del álabe dentro del rotor
V_w	m/s	Velocidad promedio en la estela (región alejada del rotor corriente abajo)
V'_w	m/s	Velocidad promedio en la estela (mitad aguas abajo del tubo de corriente)
\dot{W}_B	W	Potencia instantánea de un álabe entregada al eje del rotor
\dot{W}_T	W	Potencia instantánea de la aeroturbina

INTRODUCCIÓN

a) Presentación

La energía eólica, como fuente limpia y renovable, se ha consolidado como una alternativa para mitigar la crisis energética y la contaminación ambiental. La disminución acelerada de los combustibles fósiles, el incremento en los costos energéticos y su impacto negativo en el medio ambiente han impulsado la búsqueda de fuentes de energía más sostenibles y confiables. En este contexto, el desarrollo de tecnologías eólicas ha cobrado una importancia creciente.

El avance en nuevas tecnologías de conversión de energía eólica ha permitido mejorar el diseño y eficiencia de las aeroturbinas. Sin embargo, el viento presenta dos características distintivas que lo diferencian de otras fuentes de energía: su variabilidad aleatoria y cambios de dirección. Estos rasgos plantean desafíos en el diseño de los álabes del rotor, así como en los sistemas de control encargados de regular la velocidad de rotación y evitar velocidades excesivas que puedan comprometer la integridad estructural de la turbina. A pesar de los avances alcanzados, en entornos con bajas velocidades de viento o condiciones de flujo turbulento y caótico, como en zonas urbanas, muchas aeroturbinas aún presentan limitaciones en la conversión eficiente de la energía del eólica.

En función de la orientación de su eje de rotación, los aerogeneradores se clasifican en: de eje horizontal (HAWT, por sus siglas en inglés) y de eje vertical (VAWT). Los HAWT tiene una eficiencia alta y presentan un mejor arranque automático, por lo que predominan en parques eólicos ubicados en montañas, praderas y océanos. No obstante, su instalación en estos entornos conlleva costos elevados de infraestructura y pérdidas inevitables en la transmisión de energía debido a la distancia entre los aerogeneradores y los centros de demanda energética (Yang et al., 2018). Además, estas turbinas dependen fuertemente de la dirección del viento, por lo que requieren mecanismos complejos de orientación (yaw) y control de paso de pala (pitch) para maximizar su rendimiento y evitar sobrecargas estructurales.

En contraste, los VAWT ostentan la ventaja de no depender de la dirección del viento, lo que los hace más adecuados para entornos urbanos o regiones con vientos turbulentos y cambiantes. Además, ofrecen niveles de ruido más bajos y menores costos de mantenimiento en comparación con los HAWT, lo que ha favorecido su desarrollo en aplicaciones específicas (Roshan et al., 2020).

Los VAWT pueden clasificarse en dos categorías según el principio de operación predominante:

- **Turbinas basadas en sustentación**, como el rotor Darrieus, que aprovechan principalmente las fuerzas aerodinámicas de sustentación para generar movimiento.
- **Turbinas basadas en arrastre**, como el rotor Savonius, que operan principalmente por la resistencia del viento sobre sus superficies.

No obstante, esta clasificación no es completamente estricta, ya que en muchos diseños ambos efectos coexisten en proporciones variables.

Las aeroturbinas de eje vertical representan una alternativa prometedora para la generación de energía en entornos con flujos turbulentos y direcciones de viento cambiantes. Sin embargo, a bajas velocidades del viento, su desempeño es limitado, especialmente en diseños basados en fuerzas de

sustentación, debido a las características aerodinámicas de los perfiles utilizados. Dado que la geometría del rotor es el principal factor responsable de capturar la energía cinética del viento y convertirla en energía mecánica, resulta inherente revisar su diseño para modificar el rendimiento y mejorar la eficiencia en la conversión de energía.

Las simulaciones numéricas, métodos de optimización y técnicas de “soft-computing” han demostrado ser herramientas útiles en la mejora del rendimiento de estas turbinas, permitiendo la exploración de formas más eficientes y estrategias de control avanzadas. Sin embargo, la aerodinámica de los VAWT presenta desafíos reveladores. El movimiento rotacional y la geometría peculiar de estos rotores generan pérdidas dinámicas, formación de vórtices en las puntas de los álabes e interacciones complejas entre los perfiles y el eje central. Como resultado, el flujo alrededor de la aeroturbina es sumamente tridimensional, lo que dificulta su análisis (S. Roy & Saha, 2013).

La dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) se ha consolidado como una herramienta poderosa en la mecánica de fluidos, proporcionando modelos numéricos precisos para analizar el flujo de fluidos. Mediante el uso de software especializado como ANSYS-Fluent, STAR-CCM+ y OpenFOAM, entre otros, es posible modelar y simular el desempeño de distintos diseños de rotores. El análisis CFD ha sido ampliamente aplicado para calcular el desempeño de diversos arreglos de turbinas eólicas, a partir de modelos en dos y tres dimensiones generadas mediante software CAD, que posteriormente son discretizados en mallas y resueltos numéricamente en programas especializados.

La biomimética ha surgido como un enfoque innovador en el diseño de sistemas mecánicos, ofreciendo soluciones inspiradas en estrategias maduras por la naturaleza a lo largo de millones de años de evolución. No obstante, su integración en la ingeniería sigue representando un desafío, a pesar de los avances tecnológicos recientes que han permitido reproducir con mayor precisión los principios naturales en aplicaciones industriales. En el campo de las energías renovables, la biomimética ha demostrado un gran potencial para mejorar la eficiencia aerodinámica de las turbinas eólicas, lo que hace particularmente relevante su estudio en este contexto.

El principio esencial de la biomimética radica en la idea de que la naturaleza ha resuelto muchos de los problemas que enfrenta la ingeniería. Los organismos vivos han desarrollado soluciones muy eficientes a lo largo de la evolución, y estas pueden ser usadas en el diseño de sistemas mecánicos. Un ejemplo notable es el diseño de los trenes de alta velocidad en Japón, donde los ingenieros enfrentaron el desafío de reducir la onda de choque al entrar en los túneles ("tunnel boom") y mejorar la aerodinámica general. La solución surgió al estudiar el comportamiento del pájaro martín pescador (*Alcedo atthis*), cuya morfología le permite sumergirse en el agua con una mínima perturbación. Inspirados en la forma del pico de esta ave, los trenes diseñados con este principio lograron ser un 10 % más rápidos y reducir el consumo de electricidad en un 15 % en comparación con los modelos anteriores (Valleru, 2018).

Algunos avances en aerodinámica han tomado inspiración de los animales marinos, adaptando sus características para mejorar el desempeño de diversas aplicaciones. Por ejemplo, el diseño del fuselaje de aviones inspirado en la morfología del pez vela y el pez espada, o la implementación de estructuras superficiales basadas en las escamas de la piel del tiburón, han demostrado ser eficaces para reducir el arrastre aerodinámico y mejorar la eficiencia del flujo sobre los cuerpos en movimiento (Aftab, 2017).

De manera similar, las ballenas jorobadas (*Megaptera novaeangliae*) poseen una capacidad de maniobra excepcional, logrando operar a ángulos de ataque elevados sin sufrir una pérdida significativa de sustentación. Esta ventaja se debe a la presencia de tubérculos en el borde de ataque de sus aletas,

los cuales generan vórtices estabilizadores que retrasan la entrada en pérdida dinámica (*stall*) y mejoran el flujo de agua. En un estudio pionero, Fish & Battle (1995) diseñaron aletas artificiales con y sin tubérculos, descubriendo que estos detalles geométricos permitían aumentar el ángulo de ataque máximo en un 42% antes de que ocurriera la pérdida de sustentación. Este principio ha comenzado a ser aplicado en turbinas eólicas con el propósito de incrementar la potencia de salida y mejorar la estabilidad aerodinámica.

Este trabajo de investigación se basó en este concepto biomimético para el desarrollo de un rotor de eje vertical tipo Darrieus recto, incorporando la morfología de las aletas de la ballena jorobada, con especial énfasis en la conformación de protuberancias en el borde de ataque de los álabes del rotor. La intención principal de este estudio fue examinar el efecto de la biomimetización en las cualidades aerodinámicas de un rotor Darrieus tipo H, recurriendo a simulaciones numéricas como herramienta de evaluación. Para ello, se incorporarán principios de biomimética en el diseño del perfil aerodinámico, replicando las protuberancias con el propósito de aumentar el coeficiente de potencia.

Si bien las simulaciones en CFD son procesos computacionalmente intensivos y meticulosos, presentan ventajas significativas a largo plazo. Este enfoque permite reducir la dependencia de la construcción de prototipos experimentales y la realización de pruebas en túneles de viento, lo que disminuye costos de fabricación y reducir el tiempo de desarrollo, sin comprometer la calidad de los análisis aerodinámicos.

Por lo tanto, esta investigación se concentró en la valoración numérica del desempeño aerodinámico de un rotor Darrieus biomimetizado, aplicando CFD como herramienta principal, complementada con el modelo de Tubo Doble de Corriente Múltiple (DMST) para la estimación del coeficiente de potencia y el diagnóstico del rendimiento global del rotor.

b) Estructura de la tesis

El trabajo de investigación, desarrollado bajo el formato de artículo especializado, se realizó en cumplimiento de los requisitos para obtener el grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería, conforme a las disposiciones establecidas en los artículos 57, 59 y 60 del Reglamento de Estudios Avanzados de la Universidad Autónoma del Estado de México. El proyecto de investigación, titulado **“Propuesta de modificación y análisis mediante CFD del perfil aerodinámico para un rotor de un aerogenerador de eje vertical bioinspirado en la aleta de la ballena jorobada”**, fue registrado ante la Secretaría de Estudios Avanzados bajo el número de registro DCISEN-0121 y se detalla a lo largo de esta tesis.

La descripción del proyecto inicia con la formulación del problema de investigación, seguida de la presentación de la hipótesis, los objetivos, el alcance y las limitaciones del estudio. Posteriormente, se incluye un análisis exhaustivo del estado del arte, en el cual se examinan investigaciones previas relacionadas con la influencia de protuberancias biomiméticas en el control del flujo aerodinámico, aplicadas a perfiles aerodinámicos y aerogeneradores de eje vertical. En los capítulos subsecuentes, se describe en detalle la metodología empleada para el diseño y análisis de los perfiles aerodinámicos modificados mediante biomimetización. Este análisis abarca la implementación de protuberancias cosenoidales en el borde de ataque de perfiles tipo NACA-0018, la modelación computacional basada en dinámica de fluidos computacional (CFD) y la aplicación del modelo del Tubo Doble de Corriente Múltiple (DMST). Dichas metodologías se utilizaron para estimar los coeficientes de potencia (C_p) de rotores tripala rectos tipo Darrieus a escala. Finalmente, los resultados obtenidos en el proyecto se presentan a través de las publicaciones derivadas de esta investigación. Estas publicaciones son evaluadas en términos de su contribución al cumplimiento de los objetivos establecidos, destacando

su impacto en el desarrollo de estrategias biomiméticas para optimizar el rendimiento de aerogeneradores de eje vertical de baja potencia.

c) Planteamiento del problema

El progreso en el desarrollo de tecnologías renovables para la generación de energía ha impulsado mejoras constantes en las aeroturbinas. Sin embargo, el viento presenta dos características únicas que lo distinguen de otras fuentes energéticas: su velocidad variable y su cambio constante de dirección. Estas propiedades demandan mejores diseños de los álabes del rotor, así como sistemas de control capaces de regular las revoluciones por minuto, evitando velocidades excesivas que puedan comprometer la integridad del aerogenerador, y asegurando su orientación hacia la posición más favorable para la captación de energía.

Aunque existe una amplia variedad de máquinas eólicas diseñadas para distintos propósitos, aún persisten limitaciones importantes en su desempeño en condiciones de baja velocidad del viento y en entornos urbanos, donde el flujo de aire es muy turbulento y caótico. En estos escenarios, muchos dispositivos no son suficientemente confiables para garantizar una conversión energética eficiente.

Los aerogeneradores de eje vertical, particularmente los rotores Darrieus, destacan como una solución prometedora para estas condiciones debido a su capacidad de operar independientemente de la dirección del viento. Sin embargo, a bajas velocidades del viento, su desempeño aerodinámico es limitado, especialmente en configuraciones basadas en la fuerza de sustentación. Esto se debe a las características inherentes de los perfiles aerodinámicos convencionales, que no maximizan la extracción de energía en este rango de operación.

Dado que la geometría del rotor es el componente principal responsable de capturar la energía cinética del viento y transformarla en energía mecánica, es necesario explorar modificaciones en el diseño de los álabes. La implementación de estrategias biomiméticas, como la incorporación de protuberancias inspiradas en las aletas dorsales de la ballena jorobada, representa una oportunidad para mejorar el rendimiento aerodinámico de los rotores. Estas modificaciones pueden permitir una mayor captación de energía incluso en condiciones adversas, incrementando la eficiencia de los aerogeneradores de eje vertical en entornos urbanos y zonas de viento bajo.

d) Hipótesis

La biomimetización de perfiles aerodinámicos mediante la implementación de protuberancias cosenoidales en el borde de ataque permitirá mejorar el desempeño aerodinámico de aeroturbinas de eje vertical Darrieus tipo H de baja potencia, aumentando su coeficiente de potencia en aproximadamente un 10 %. Este incremento será consecuencia de un mejor control del flujo aerodinámico, que reducirá la separación del flujo y las pérdidas asociadas.

e) Objetivos

General:

Evaluar y cuantificar el efecto de la biomimetización en un perfil aerodinámico mediante la incorporación de protuberancias cosenoidales en el borde de ataque, inspiradas en las aletas dorsales de la ballena jorobada (*Megaptera novaeangliae*), sobre el desempeño de un aerogenerador de eje

vertical tipo Darrieus H, empleando simulaciones numéricas de dinámica de fluidos computacional (CFD) y el modelo del Tubo Doble de Corriente Múltiple (DMST).

Específicos:

- Adaptar geoméricamente los perfiles NACA-0018 mediante la variación de amplitud y período de las protuberancias con respecto a la cuerda promedio.
- Realizar simulaciones numéricas empleando las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el esquema de Reynolds (RANS, por sus siglas en inglés) en CFD para determinar los coeficientes de arrastre y sustentación en función del ángulo de ataque de los álabes biomimetizados.
- Comparar el desempeño aerodinámico de los rotores con perfiles modificados y estándar, mediante gráficas de los coeficientes de potencia (C_p) obtenidos con teorías DMST.
- Identificar las condiciones en las que los perfiles biomimetizados generan mejoras en la eficiencia del rotor para distintas relaciones de velocidad en la punta (TSR , Tip Speed Ratio).
- Comparar dos esquemas DMST, destacando las diferencias en la estimación del C_p y las implicaciones de los ajustes en el factor de inducción axial.
- Determinar el rango de TSR donde las metodologías presentan divergencias y analizar su relevancia para aplicaciones prácticas.

f) Alcances y limitaciones

Este trabajo se centrará en el análisis geométrico y aerodinámico de una turbina eólica de eje vertical Darrieus recta con configuración tripala, empleando simulaciones numéricas. Se integrarán principios de biomimética mediante la incorporación de protuberancias inspiradas en las aletas de la ballena jorobada en un perfil aerodinámico tipo NACA-0018, con el objetivo de incrementar el coeficiente de potencia.

Si bien las simulaciones en dinámica de fluidos computacional requieren recursos computacionales significativos y procesos iterativos minuciosos, estas ofrecen grandes ventajas a largo plazo. Al permitir la evaluación detallada de diseños sin necesidad de fabricar múltiples prototipos para pruebas experimentales en túneles de viento, se reducen tanto los costos asociados a la fabricación de modelos físicos como el tiempo invertido en pruebas experimentales.

El modelo desarrollado está diseñado para aplicaciones orientadas al abastecimiento de pequeñas y medianas demandas de energía, no conectadas a redes eléctricas alternas monofásicas o trifásicas, en áreas con un potencial eólico significativo dentro del Estado de México. Su implementación se enfoca en entornos donde las condiciones meteorológicas sean favorables, tales como carreteras, regiones aisladas sin acceso a redes de distribución eléctrica, y áreas urbanas con altos niveles de turbulencia, lo que permite aprovechar la energía del viento de manera más eficiente.

En términos de costos, se busca que este diseño ofrezca ventajas competitivas frente a aerogeneradores comerciales de capacidad similar, especialmente en cuanto a eficiencia y accesibilidad económica. Sin embargo, no se pretende competir con grandes aerogeneradores de eje horizontal ni con granjas eólicas interconectadas a sistemas eléctricos de gran envergadura, ya que el alcance de este proyecto se limita a soluciones locales y descentralizadas.



CAPÍTULO I.

ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

“No podemos cambiar el pasado,
pero sí podemos dar forma al futuro”

Soichiro Honda

CAPÍTULO I.

ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Las energías renovables están adquiriendo una importancia mayor para satisfacer la demanda energética en aumento y reducir los contaminantes ambientales. La generación de energía eólica ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, buscando no solo aumentar la eficiencia sino también adaptarse a diferentes entornos y necesidades energéticas. El avance en la tecnología de generación de energía eólica ha llevado al desarrollo de diversos tipos de aerogeneradores, entre los cuales los aerogeneradores de eje vertical tipo Darrieus han ganado atención debido a su diseño compacto. Este tipo de aeroturbinas, particularmente en configuraciones de baja potencia, son ideales para aplicaciones en zonas residenciales y urbanas, debido a su capacidad de capturar viento desde cualquier dirección sin necesidad de un sistema de orientación (Rogowski et al., 2018). Sin embargo, estas máquinas enfrentan desafíos significativos relacionados con la eficiencia aerodinámica, y el rendimiento en condiciones de viento turbulento y cambiantes.

Este capítulo aborda los antecedentes y el estado del arte relacionados con la aplicación de principios de biomimética al diseño de perfiles aerodinámicos, específicamente el NACA-0018, para modificar el rendimiento en aerogeneradores de eje vertical de baja potencia. La modificación biomimetizada del borde de ataque en los álabes, basada en las aletas dorsales de la ballena jorobada, promete mejoras en la eficiencia del rotor y, por ende, en el rendimiento de estos dispositivos.

1.1. Aerogeneradores de Eje Vertical Tipo Darrieus

El viento puede entenderse como la circulación del aire que se produce como resultado de las diferencias en la presión atmosférica en la Tierra, y trae consigo una fuerza renovable que puede ser explotada. Desde tiempos antiguos, se ha utilizado la fuerza del viento para diversas aplicaciones, como la navegación, la trituración de granos, el bombeo de agua y otros usos (L. Zhang, 2021). Sin embargo, la energía eólica moderna, que se produce a través de aerogeneradores para obtener electricidad, es una tecnología relativamente reciente. La primera turbina eólica moderna se construyó en 1887 en Escocia (Gipe & Möllerström, 2022), pero la tecnología no se desarrolló significativamente hasta la década de 1970 debido al alza en los costos del petróleo y el temor por el cambio climático. A partir de entonces, se han desarrollado turbinas eólicas más grandes y eficientes, y se han construido parques eólicos a gran escala en todo el mundo (Gipe & Möllerström, 2023).

La energía eólica se identifica por su continuo cambio de dirección y velocidad, que afectan considerablemente la producción de energía. Hay diversos estudios y mejoras tecnológicas que están tratando de aminorar este inconveniente. Un aerogenerador habitualmente es clasificado como una turbomaquinaria con eje central y álabes (o palas) que transforma la energía cinética del flujo de fluido (aire o agua) en movimiento de rotación, obteniendo electricidad por medio de una transmisión y un generador (Burton et al., 2021).

Los aerogeneradores se dividen en dos categorías principales, dependiendo de la orientación del eje de rotación: **horizontal** y **vertical**. Las aeroturbinas de eje horizontal tienen una mayor eficiencia y una mejor capacidad de arranque automático. Actualmente, los aerogeneradores de eje horizontal para parques eólicos son muy populares, pero se instalan principalmente en montañas, praderas y

océanos, donde los costos de infraestructura pública son muy altos. Además, existe una inevitable pérdida de transmisión de energía porque las turbinas eólicas están lejos de los núcleos de demanda en la energía (Yang et al., 2018). Una de las limitaciones básicas de las turbinas de eje horizontal radica en su alta sensibilidad a la dirección del viento, por lo que necesitan complicados mecanismos de inclinación y orientación para regular la velocidad del rotor y la alineación en la dirección del viento, respectivamente. En contraste, las turbinas eólicas de eje vertical no son sensibles a la variación en la dirección del viento. Esta característica las hace atractivas para utilizarse en áreas urbanas o donde la dirección del viento cambia continuamente. Además, la menor producción de ruido y los costos de mantenimiento en comparación con las de eje horizontal son otras ventajas importantes que han ayudado al desarrollo de las aeroturbinas de eje vertical (Roshan et al., 2020). Entre otras virtudes están la seguridad potencial operacional durante condiciones de ráfagas, robustez, escalabilidad, y bajos costos de fabricación, instalación y mantenimiento. Una evaluación detallada del rendimiento aerodinámico de las aeroturbinas de eje vertical es una tarea difícil ya que el flujo en dichos sistemas se complica por fenómenos como la pérdida dinámica, las interacciones pala–estela y los efectos de la curvatura del flujo (Rezaeiha et al., 2018).

A diferencia de los perfiles de las aeroturbinas de eje horizontal que mantienen ángulos de ataque relativamente estables del flujo entrante, los álabes de las aeroturbinas de eje vertical experimentan ángulos de ataque variables que cambian rápidamente entre positivos y negativos. Además, encaran el viento turbulento (en el lado de sotavento, corriente abajo) debido a los vórtices creados por los perfiles que pasan (por el lado de barlovento, corriente arriba). Estos fenómenos subrayan la complejidad del problema aerodinámico al que se enfrentan los diseñadores de aeroturbinas de eje vertical, quienes deben considerar cuidadosamente estos factores para optimizar el rendimiento de los rotores (Ouchene et al., 2023)

En 1931 el ingeniero francés Georges Jean Marie Darrieus introdujo y patentó su diseño de este tipo de aeroturbinas de eje vertical. El diseño original presentaba palas en forma de ala unidas a un eje central vertical, permitiendo que el rotor capturara el viento desde cualquier dirección sin necesidad de un sistema de orientación, lo que representó una ventaja significativa sobre los aerogeneradores de eje horizontal. A pesar de su simplicidad estructural, estos primeros modelos enfrentaron problemas de baja eficiencia y par de arranque insuficiente (Rogowski et al., 2021).

Durante las décadas de 1930 a 1960, los estudios y desarrollos fueron limitados, y la mayoría de las aplicaciones eran experimentales o de pequeña escala. Los primeros diseños enfrentaron problemas significativos, como la fatiga de los materiales y fallos estructurales. Estos problemas se debieron principalmente a la falta de una comprensión completa de las cargas dinámicas y las tensiones estructurales en las turbinas eólicas (P. M. Kumar et al., 2019). Para las décadas de 1970 y 1980, los investigadores comenzaron a explorar mejoras en el diseño de los aerogeneradores de eje vertical, impulsado por la crisis energética y la búsqueda de fuentes alternativas de energía. En particular, la Canadian National Research Council y la Sandia National Laboratories en Estados Unidos desarrollaron y probaron varios prototipos. Estas investigaciones se centraron en optimizar la geometría de las palas y mejorar la aerodinámica para aumentar la eficiencia. Los diseños helicoidales y en forma de H fueron particularmente prominentes durante este período (Song et al., 2020). En la década de 1990, se produjo una renovada atención hacia los aerogeneradores de eje vertical. Empresas como FloWind desarrollaron y comercializaron aerogeneradores basados en el diseño Darrieus. Sin embargo, estos proyectos enfrentaron desafíos económicos y técnicos que limitaron su adopción generalizada. Los aerogeneradores de eje horizontal dominaban el mercado debido a su mayor eficiencia y tecnología más madura (Mohamed et al., 2020). En las últimas dos

décadas, los avances en materiales y tecnología computacional han revitalizado el interés en los aerogeneradores de eje vertical. El uso de materiales compuestos como los polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP) ha mejorado la durabilidad y reducido el peso de las turbinas, facilitando su instalación en entornos urbanos. Además, las simulaciones computacionales avanzadas, utilizando software como ANSYS, han permitido la optimización aerodinámica y la evaluación precisa del rendimiento de diferentes diseños (Bere et al., 2021).

El futuro de los aerogeneradores de eje vertical tipo Darrieus parece prometedor, con investigaciones continuas enfocadas en mejorar su eficiencia y adaptabilidad a diferentes entornos. Al explorar configuraciones nuevas de álabes y técnicas de simulación avanzada para mejorar el rendimiento aerodinámico, reducir los costos de producción, además de la integración de tecnologías inteligentes y de control avanzado podría permitir una operación más eficiente y adaptable en tiempo real, maximizando la captura de energía, incluso en condiciones de viento variable (Karimian & Abdolahifar, 2020). Estos avances tienen el potencial de hacer que los aerogeneradores de eje vertical sean una opción preferida para la generación de energía renovable en entornos con condiciones del viento variables (Bangga et al., 2021).

1.2. Perfiles Aerodinámicos y su Importancia en los rotores Darrieus

La elección del perfil aerodinámico es un rasgo transcendental del diseño de rotores de eje vertical, ya que impacta en la eficiencia y la capacidad de generación de energía del sistema. Los distintos perfiles aerodinámicos tienen sus propios coeficientes de sustentación y arrastre, predisponiendo la capacidad del rotor para capturar la energía eólica (Santamaría et al., 2022). Conjuntamente, los álabes del rotor son los elementos que toman bastante repercusión en el diseño de las turbinas eólicas, ya que es un factor clave en la eficiencia para convertir la energía eólica, además puede influir en la estabilidad del rotor y en la reducción de ruido durante su funcionamiento (Burton et al., 2021).

Los perfiles NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) han sido ampliamente estudiados y utilizados en la industria aeronáutica y en la ingeniería de aerogeneradores debido a su capacidad para mejorar la eficiencia aerodinámica, adaptarse a diversas condiciones de viento y permitir innovaciones en geometría (Tirandaz & Rezaeiha, 2021). Por ejemplo, investigaciones han analizado el rendimiento de varios perfiles y su impacto en la eficiencia de rotores de tipo H. Song et al. (2020) investigaron las características aerodinámicas de turbinas Darrieus con diferentes espesores máximos de perfiles NACA (12%, 15%, 18% y 21%). Los resultados mostraron que el perfil NACA-0018 ofrecía el mejor rendimiento en términos de coeficientes de potencia y torque por debajo del TSR óptimo, mientras que perfiles más delgados como el NACA-0012 mejoraban el rendimiento a un TSR más altos. Mantravadi et al. (2019) examinaron el rendimiento de rotores Darrieus usando álabes NACA-0012, 0015 y 0030. Los resultados revelaron que el perfil 0030 ofrecía un rendimiento más uniforme y eficiente en comparación con los perfiles 0012 y 0015, especialmente bajo condiciones de fluctuación continua del viento. Mohammed et al. (2020) investigaron diferentes perfiles (0012, 0015 y 0021) para turbinas Darrieus de palas rectas en el rendimiento del rotor, apuntando que el perfil 0015 ofrecía un rendimiento superior, en términos de coeficientes de potencia y par de torsión, comparado con los otros álabes, especialmente en configuraciones de rotor bipala.

El grosor y la curvatura del perfil aerodinámico tienen un impacto significativo en el rendimiento de los rotores Darrieus. Jain & Saha (2020) evaluaron el impacto de la relación espesor-cuerda (t/c)

en el fenómeno de pérdida dinámica en rotores Darrieus H. Determinaron que perfiles más delgados presentaban picos más altos en los coeficientes de sustentación y arrastre, mientras que perfiles más gruesos tenían una separación más gradual de la capa límite, reduciendo la severidad de la pérdida dinámica. En otro aspecto, Sengupta et al. (2019) examinaron rotores Darrieus H con álabes asimétricos, enfocándose en cómo la curvatura y el grosor de las palas afectan el rendimiento en estas condiciones. Vieron que los perfiles con mayor curvatura y grosor en el lado de succión mejoraron el rendimiento del rotor durante la fase de potencia. Además, una mayor curvatura del lado de succión redujo la formación de vórtices y mejoró la eficiencia aerodinámica, reflejado en un incremento del coeficiente de potencia en condiciones de baja velocidad del viento. Por su parte, Rashed et al. (2020) sugieren que los perfiles más gruesos pueden ser más adecuados para aplicaciones donde la estabilidad y la eficiencia son prioritarias, a pesar de una reducción en el par y la potencia máximos; mientras que los perfiles simétricos ofrecían mejores rendimientos en comparación con los asimétricos. Por otro lado, Bangga et al. (2021) mostraron que el aumento del grosor del perfil aerodinámico no solo ayuda a suprimir los efectos del estancamiento dinámico, sino que también mejora el rendimiento de las turbinas de alta solidez. Los perfiles más gruesos demostraron una reducción en la generación y desprendimiento de vórtices, mejorando la distribución de presión durante el proceso de estancamiento dinámico. La elección adecuada de estos parámetros puede optimizar la eficiencia de la aeroturbina y la captación de energía, haciendo de los perfiles NACA una buena opción este tipo de aerogenerador.

Los perfiles aerodinámicos influyen directamente en la capacidad del aerogenerador para capturar la energía del viento y convertirla en energía mecánica y, posteriormente, en energía eléctrica. La disyuntiva del álabe conveniente para el rotor Darrieus es imprescindible para maximizar el desempeño del sistema lo mejor posible. El perfil NACA-0018 es uno de los más utilizados en este tipo de aeroturbinas, especialmente en configuraciones tipo H.

Se distingue por ser simétrico con un espesor del 18% de la longitud de la cuerda, lo que le confiere una robustez y estabilidad ideal para aplicaciones en aerogeneradores de eje vertical, permitiendo un rendimiento constante independientemente de la dirección del viento, ofreciendo un buen equilibrio entre sustentación y arrastre en un amplio rango de ángulos de ataque. Este álabe ha sido objeto de numerosos estudios que respaldan su uso debido a sus características favorables. Por ejemplo, en el estudio numérico por Rogowski et al. (2021) sobre turbinas Darrieus con álabes NACA, el perfil con denominación 0018 mostró un mejor desempeño en el rotor con respecto a los 0012, 0015 y 0021; logrando un coeficiente de potencia máximo más alto a velocidades de viento bajas a moderadas. En otro análisis, Rogowski et al. (2020) examinaron el rendimiento de una aeroturbina Darrieus H empleando álabes de la serie NACA de cuatro dígitos. El estudio mostró que el perfil 0018 ofrecía un coeficiente de potencia máximo atractivo, haciéndolo una opción viable para futuras investigaciones. Aunque se recomendó el uso del perfil 1418 para aplicaciones específicas de álabes fijos, el 0018 sigue siendo una opción robusta debido a su simplicidad y buen rendimiento general. En aplicaciones de baja velocidad, Rhenals-Julio et al. (2023) observaron que el perfil 0018 demostró ser más eficiente, en comparación con el 0021 y 0025, para aplicaciones de aeroturbinas Darrieus H, ofrecía una mejor relación de coeficientes de sustentación y arrastre, haciéndolo ideal para maximizar la eficiencia energética. Con respecto al impacto del grosor de los perfiles en la contaminación acústica de los rotores Darrieus H, Bozorgi & Zarei (2024) analizaron numéricamente perfiles desde el 0008 hasta el 0024, notando que el 0018 ofrecía una buena relación entre el coeficiente de potencia y la reducción de ruido, siendo una opción adecuada para aplicaciones en entornos urbanos.

En consecuencia, el perfil NACA-0018 debido a sus propiedades aerodinámicas favorables y su adaptabilidad a condiciones de viento turbulento, es una opción ideal para su uso en aeroturbinas Darrieus. Su capacidad para mantener un rendimiento estable en una variedad de condiciones lo convierte en una opción viable para mejorar la captación de energía eólica en entornos urbanos.

1.3. Biomimética en Ingeniería

La biomimética, del griego "*bios*" (vida) y "*mimesis*" (imitar), es un campo interdisciplinario que busca resolver problemas humanos mediante la emulación de modelos, sistemas y elementos naturales. La observación y el análisis de la naturaleza proporcionan soluciones optimizadas a lo largo de millones de años de evolución. Esta filosofía no solo aplica a la biología, sino que se extiende a la física, la química, la ingeniería y la tecnología (Wanieck et al., 2020).

El proceso de la biomimética se basa en analogías entre dominios y requiere experiencia en dos campos fundamentalmente dispares entre la ingeniería y la biología (Weidner et al., 2018). Los humanos han usado la biología como inspiración para resolver problemas de ingeniería durante casi 3 000 años. Sin embargo, aún se enfrentan desafíos dentro de un proceso de diseño bioinspirado o biomimético, lo que resulta en áreas de investigación fragmentadas y aisladas. Esto es debido a la razón por la cual las estrategias de solución de problemas biológicos generalmente no se pueden transferir directamente de la biología a la tecnología, sino que requieren un método creativo de implementación (Fayemi et al., 2017).

A lo largo de la historia, la biomimética ha dado lugar a innovaciones significativas en diversos campos de la ingeniería. Uno de los primeros ejemplos documentados de biomimética es el trabajo de Leonardo da Vinci (en el siglo XV) observando el vuelo de los pájaros. Diseñó máquinas voladoras como el "Ornithopter", intentando emular la mecánica del vuelo de las aves (Zhou, 2023). Aunque sus máquinas nunca volaron, sus estudios sentaron las bases para la aviación moderna. En el siglo XX, el ingeniero suizo George de Mestral observó cómo las semillas de *Arctium lappa* (bardana) se adherían al pelo de su perro y su ropa. Al examinar las semillas bajo un microscopio, descubrió que estaban cubiertas de pequeños ganchos que se sujetaban en cualquier cosa con la que entraran en contacto. Este descubrimiento, en 1941, llevó a la creación del velcro, que se ha convertido en un componente esencial en diversas industrias, desde la moda hasta la aeroespacial (Hapsari et al., 2022).

La aplicación de principios biomiméticos a perfiles aerodinámicos ha revolucionado el diseño y optimización de estos elementos en diversas industrias, especialmente en la aeroespacial y la energía renovable. La imitación de estructuras y mecanismos de organismos naturales para mejorar la eficiencia aerodinámica ha demostrado ser útil para resolver problemas de arrastre, sustentación y control de flujo, que son comunes en el diseño de álabes (Rose et al., 2021). Ofrecen varias ventajas sobre los diseños tradicionales, incluyendo: una mayor eficiencia energética y mejor adaptabilidad a diferentes condiciones de operación. Las simulaciones numéricas y el uso de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) facilitan la evaluación y el mejoramiento de estos diseños, permitiendo la creación de álabes que reproducen las características más eficientes observadas en la naturaleza (Basri et al., 2023).

Las plantas, insectos, aves y animales acuáticos han sido objeto de numerosos estudios que han permitido la creación de perfiles aerodinámicos más eficientes y resistentes a la separación de flujo

(Rose et al., 2021). Estos se han enfocado en entender cómo las características morfológicas de estos organismos pueden ser replicadas en diseños técnicos para mejorar el rendimiento.

Las escamas de ciertos peces, como las del tiburón, presentan microestructuras que han sido ampliamente examinadas por su capacidad para reducir el arrastre. En la investigación de Bhatia et al. (2022), se colocaron dentículos basados en la piel de tiburón a un perfil aerodinámico NACA-0012, registrando una reducción del arrastre de hasta un 11.2% y un incremento de la sustentación del 11.3% en relación con perfiles estándar. En otro estudio por Hamilton et al. (2023) identificaron que las microestructuras sugeridas en las escamas del pez espada pueden reducir el arrastre en condiciones de flujo laminar hasta en un 6.7%, según estudios experimentales y modelos numéricos. Estos estudios resaltan cómo la disposición y la estructura particular de las escamas retrasan la transición de flujo laminar a turbulento, lo que resulta en una menor resistencia y mayor eficiencia aerodinámica.

Una de las directrices interesantes de la biomimética aplicada en álabes es la introducción de los tubérculos típicos en las aletas dorsales de la ballena jorobada (*Megaptera novaeangliae*). Modificar el borde de ataque de un álabe empleando estas protuberancias que tienen las aletas de las ballenas jorobadas en perfiles aerodinámicos se debe a que varios estudios han revelado que las protuberancias son un factor determinante en los movimientos de giro extraordinarios para cazar sus presas, a pesar de las amplias dimensiones del mamífero. Fish & Battle (1995), pioneros en identificar cómo los tubérculos en el borde de ataque de las aletas de estos mamíferos acuáticos mejoran el control del flujo, muestran como la forma y las características de las aletas pectorales influyen en su rendimiento hidrodinámico y en su habilidad para maniobrar en el agua (Figura 1.1), proporcionando diversas perspectivas para el diseño de tecnologías marinas y aerodinámicas.



Figura 1.1. Ballena jorobada. Ilustración de las protuberancias en la aleta dorsal (V. Gopinathan & Bruce Ralphin Rose, 2021).

Adaptar los tubérculos en la parte frontal de los perfiles aerodinámicos retarda la pérdida dinámica, y se corrigen las cualidades de sustentación y arrastre en el régimen posterior a la pérdida por la presencia de vórtices que vuelven a unir la capa límite, como lo muestran Fish & Lauder (2006) y Sudhakar et al. (2017). De manera similar, las protuberancias del borde de ataque en las palas de los rotores eólicos pueden aumentar los rangos operativos del ángulo de ataque y velocidad del viento. La mayoría de los estudios previos son sobre tubérculos aplicados a perfiles aerodinámicos (Hansen et al., 2011, 2016; Miklosovic et al., 2004) y solo unos cuantos consideraron aplicaciones en aerogeneradores (R.-K. Zhang & Wu, 2012). En el estudio efectuado por R.-K. Zhang & Wu (2012), simulaban numéricamente cinco configuraciones diferentes de tubérculos en la pala de turbina eólica NREL Phase VI modificando aleatoriamente tanto la amplitud como la longitud de onda.

También compararon el par de torsión del eje resultante de los cinco casos probados con el perfil aerodinámico liso y observaron una mejora significativa en condiciones de velocidades del viento.

Ensayos experimentales hechos por Miklosovic et al. (2004) examinaron el resultado de la adición de tubérculos en parte frontal de perfiles aerodinámicos. Observaron que estas protuberancias tenían la capacidad de retrasar la pérdida dinámica, incrementando el ángulo en que se inicia este desplome en la sustentación en un 40%. Además, notaron un aumento del 6% en el coeficiente de sustentación máxima en condiciones específicas. También identificaron que, en ciertos rangos de ángulos de ataque, los perfiles con tubérculos generaban un mayor arrastre para niveles de sustentación equivalentes, mientras que, en otros rangos, presentaban una pendiente de sustentación más suave en comparación con los perfiles sin modificar. Johari et al. (2007), obtuvieron hallazgos experimentales similares al detectar un aumento del 50% en el coeficiente de sustentación con un mínimo o nulo impacto en el coeficiente de arrastre. Sin embargo, también percibieron un incremento del arrastre e incluso coeficientes de sustentación más bajos en proporción con el álabe de referencia en ángulos de ataque menores.

Fish et al. (2011a) analizaron aplicaciones marinas de la aleta de la ballena jorobada y sus características biomiméticas. A diferencia de los perfiles hidrodinámicos convencionales con bordes de ataque rectos, los prototipos que tienen tubérculos sinusoidales modifican el flujo de agua, generando vórtices entre las protuberancias que aceleran el flujo y mantienen una capa límite parcialmente adherida, lo que retrasa pérdida dinámica en ángulos de ataque a mayores, aumentando la sustentación y reduciendo el arrastre en comparación con perfiles convencionales en condiciones de desplome. Adicionalmente, Fish et al. (2011b) en perfiles NACA-0020 modificados con protuberancias revelaron un incremento del 6% en la sustentación máxima y un retraso del 40% en el ángulo de pérdida dinámica comparado con perfiles convencionales, evaluado en túneles de viento a un número de Reynolds de 500 000, sugiriendo su uso para ser aprovechados en dispositivos como hélices, ventiladores y turbinas eólicas para mejorar el rendimiento; concluyeron que tiene la ventaja de eliminar mecanismo de control complejos, costosos, pesados y de mantenimiento especializado.

Rostamzadeh et al. (2014) exploraron el impacto de las ondulaciones (tubérculos de las aletas de la ballena jorobada) en el borde de ataque del álabe NACA-0021 en la generación de vórtices longitudinales. A través de simulaciones computacionales, se encontró que estas modificaciones incrementan la sustentación en un 8% y reducen el arrastre en un 14% en régimen subsónico. Estos efectos mejoran la estabilidad del flujo y retrasan la separación, lo que sugiere aplicaciones potenciales en turbinas eólicas y aeronaves para optimizar la eficiencia aerodinámica.

Kobæk & Hansen (2016) hicieron un estudio aerodinámico tridimensional recurriendo a simulaciones numéricas en STAR-CCM+ para analizar dos diseños de álabes ondulados con el perfil S809, inspirados en las aletas de la ballena jorobada. El primer diseño modificó únicamente el borde de ataque con una forma sinusoidal, mientras que el segundo extendió la ondulación hasta el borde de salida. Los resultados mostraron que la eficiencia de las palas onduladas depende de la línea base del perfil y se mejora en ángulos de ataque altos, aunque con una menor pendiente en el coeficiente de sustentación y un aumento en el arrastre antes de la pérdida.

Aftab et al. (2016), expusieron una revisión exhaustiva de investigaciones en bordes de ataque sinusoidales. Los resultados experimentales y simulaciones numéricas revelaron que el estándar de flujo en el borde de ataque modificado era completamente diferente del observado en perfiles

aerodinámicos convencionales. Además, la inclusión de los tubérculos permitía abordar algunos inconvenientes como la separación del flujo, el ruido y la pérdida dinámica.

Serson et al. (2017) efectuaron simulaciones numéricas directas (DNS) para analizar el flujo alrededor de un perfil aerodinámico NACA-0012 de longitud infinita, modificado con un borde de ataque ondulado, imitando las aletas de la ballena jorobada, a un número de Reynolds bajo (1000). Fueron probadas nueve combinaciones de periodo y amplitud de las ondulaciones en relación con la longitud de la cuerda, evaluando los coeficientes de sustentación y arrastre en un rango de ángulos de ataque de 0° a 21°, con incrementos de 3°. Los resultados mostraron una reducción en ambos coeficientes y la relación sustentación/arrastre para cierto rango de ángulos de ataque. En un caso particular, la variación del coeficiente de sustentación se redujo significativamente, indicando una mejora en el control del desprendimiento de la capa límite a través de interacciones a lo largo de la pala y en la dirección del flujo.

Lall et al. (2019) hicieron un estudio numérico tridimensional en ANSYS-CFX y pruebas en túnel de viento para comparar el rendimiento aerodinámico de un perfil NACA-0015 con y sin tubérculos en el borde de ataque. Apreciaron que el perfil con protuberancias retrasaba la pérdida dinámica al menos 4° más que el perfil base, mejorando el coeficiente de sustentación en esa región. Para ángulos de ataque entre 14° y 21°, el perfil base tenía un mejor coeficiente de sustentación, pero los tubérculos demostraron ser efectivos en mejorar el control de flujo y el rendimiento aerodinámico en condiciones críticas.

Pena et al. (2019) llevaron a cabo un análisis numérico del rendimiento del perfil hidrodinámico NACA-634₀₂₁ modificando su borde de ataque con una geometría ondulada que imita los tubérculos de la aleta de la ballena jorobada. Utilizando un modelo híbrido denominado "Improved Delayed Detached Eddy Simulation (IDDES)", evaluaron el perfil en un rango de ángulos de ataque de 0° a 30°, con incrementos de 5°, en condiciones de flujo transitorio y turbulento. Los resultados mostraron que el perfil base tenía un mejor rendimiento antes de la pérdida dinámica, pero el perfil con protuberancias superaba al original después de entrar en pérdida al reducir la separación del flujo debido a las estructuras formadas en el campo del fluido.

En experimentos desarrollados por Hrynuk & Bohl (2020), se centraron en evaluar cómo la modificación de la parte frontal de un álabe, modelado a partir de la aleta de la ballena jorobada con una forma sinusoidal, influía en la eficiencia aerodinámica en ángulos de ataque desde 0° hasta 50°. Sus deducciones aludieron que las protuberancias agregadas al álabe operaron como un componente pasivo de control de flujo, el cual permitió controlar o retardar la pérdida dinámica.

Lobo et al. (2020), evaluaron cómo las protuberancias afectan el comportamiento de un perfil NACA-634-421. Mediante una combinación de análisis preliminares en XFLR y simulaciones en ANSYS ICEM CFD y ANSYS CFX. Sugieren que la incorporación de tubérculos en el borde de ataque puede tener efectos significativos en el rendimiento aerodinámico del ala, particularmente en condiciones de flujo no estacionario y ángulos de ataque elevados, donde la separación del flujo y el estancamiento aerodinámico son preocupaciones principales. Al modular el flujo cerca del borde de ataque, los tubérculos pueden ayudar a retrasar la separación del flujo y mejorar la estabilidad aerodinámica, lo que resulta en un rendimiento mejorado en comparación con un perfil aerodinámico convencional sin tubérculos.

Emam et al. (2021) evaluaron cómo la longitud y configuración de los tubérculos sobre el borde de ataque en el perfil S1223, bajo regímenes de flujo transitorio (números de Reynolds bajos), afectan la sustentación y arrastre, observaron que las protuberancias modifican la estructura del flujo cerca del borde de ataque y pueden influir en la distribución de la presión a lo largo del perfil. Este cambio no solo mejora la capacidad del perfil para generar sustentación a mayores ángulos de ataque, sino que también puede contribuir a una reducción en el arrastre, especialmente en el régimen de flujo post-estancamiento donde la corriente empieza a separarse del álabe. En otro estudio, Khedr et al. (2021), analizaron dos configuraciones de tubérculos con respecto a la amplitud, longitud de onda y configuración espacial a un perfil S1223 mediante simulaciones numéricas y túnel de viento. El principal hallazgo fue que los álabes con protuberancias en el borde de ataque presentaban mejoras para generar sustentación a mayores ángulos de ataque y control del estancamiento, sin incurrir en un incremento proporcional del arrastre, una característica deseable para el diseño de álabes de aeroturbinas.

Açikel et al. (2022), adaptaron una estructura con protuberancias al perfil NACA-0012 y realizaron modelado numérico, observando que el álabe facilitó una canalización del flujo en las cavidades tuberculadas, reflejando una disminución de la separación del flujo y, en consecuencia, un aumento en el rendimiento aerodinámico del álabe. V. T. Gopinathan et al. (2020) exploraron cómo los tubérculos en el borde de ataque influyen en la eficacia de los álabes. Utilizando perfiles NACA-0015 y NACA-4415 con un ángulo de 30° , revelaron que las protuberancias cambian el rendimiento antes del estancamiento, optimizando la relación entre la sustentación y el arrastre, demostrando el potencial de los tubérculos para mejorar la eficiencia de los perfiles en condiciones críticas. V. T. Gopinathan & Ralphin Rose (2023) investigaron las características aerodinámicas de los perfiles aerodinámicos como NACA-0015 y NACA-4415 con tubérculos en el borde de ataque. A través de análisis experimentales y numéricos a bajos números de Reynolds, descubrieron que estos tubérculos mejoran significativamente el rendimiento aerodinámico, particularmente al aumentar la transferencia de momento en la región crítica perdida dinámica.

La biomimética aplicada a los aerogeneradores se ha convertido en una herramienta para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de la generación de energía eólica. Las estructuras naturales como las alas de los pájaros, las aletas de los peces y algunas semillas han servido como modelos para crear álabes con mejor desempeño (Gaitan-Aroca et al., 2020). Por ejemplo, del estudio de Prathik et al. (2021) analizaron el rendimiento de una turbina eólica de eje vertical con álabes modificados inspiradas en características biológicas, como la hoja de la semilla de arce, y las alas del águila dorada y de la libélula. Las simulaciones mostraron que el perfil de libélula adaptada al álabe FX 63-137 presentó un mejor rendimiento en comparación con los perfiles con curvatura y estándar de la misma denominación.

Seidel et al. (2017) elaboraron un análisis estructural de aeroturbinas verticales pequeñas con base a fenómenos biológicos recurriendo al software ABAQUS CAE para simular desplazamientos y esfuerzos de von Mises en diferentes velocidades de viento. Investigaron la generación de sustentación en semillas de arce y triplaris samara, así como los tubérculos en las aletas de las ballenas jorobadas, utilizando el perfil NACA-0012 como base. Encontraron que las palas basadas en semillas podían soportar vientos de hasta 55 m/s, con menor deformación en comparación con el álabe estándar. Los tubérculos, aunque aumentaban el esfuerzo en algunos casos, generalmente reducían la deflexión en la mayoría de los prototipos propuestos.

Tian et al. (2017) desarrollaron una modificación del perfil aerodinámico NACA-4412 creado a partir de la morfología del ala del búho orejón (*Asio Otus*), con el objetivo de mejorar el desempeño aerodinámico de una turbina eólica de eje horizontal. Empleando el método de Glauert, combinaron el perfil base con el del búho, aplicando una relación de aspecto del 50% en la punta. Simulaciones numéricas y pruebas experimentales mostraron una mejora del 12% al 44% en la captación de potencia del viento en comparación con el diseño estándar. Los contornos de presión indicaron una mayor diferencia de presión entre las superficies inferior y superior del modelo biomimetizado, suministrando mejor sustentación y mayor eficiencia.

El ruido generado por los aerogeneradores es una de las principales preocupaciones en áreas residenciales. Las investigaciones han demostrado que las características de las alas de las lechuzas, que son conocidas por su vuelo silencioso, pueden ser adaptadas para reducir el ruido de las palas de los aerogeneradores. Estas adaptaciones incluyen la incorporación de bordes dentados y texturizados en las palas, que ayudan a disipar el sonido y reducir el ruido (Lv et al., 2021).

Las aletas de los peces, con su capacidad para generar vórtices que mejoran la eficiencia del movimiento en el agua, han inspirado el diseño de palas que pueden capturar más energía del viento en condiciones variables. Este fenómeno ha demostrado ser especialmente útil en aerogeneradores de eje vertical que deben funcionar, de manera eficiente, en vientos turbulentos y cambiantes. De la investigación de Khalid et al. (2024) mostró que un diseño de turbina vertical de doble etapa, inspirado en los hábitos de natación de los peces, logró un aumento del 600% en la producción de energía en ciertas condiciones, gracias a la interacción entre las palas interiores y exteriores, reduciendo la separación inestable del flujo y mejorando el rendimiento general de la turbina.

Una de las innovaciones más destacadas en la biomimética aplicada a aerogeneradores es la adaptación de los tubérculos de la aleta de la ballena jorobada en los bordes de ataque de las palas. Estos tubérculos crean pequeños vórtices que mejoran la sustentación y reducen la resistencia al aire, lo que resulta en una mejora significativa del rendimiento aerodinámico de las palas. Estudios numéricos y experimentales han demostrado que estas adaptaciones pueden aumentar la eficiencia de los aerogeneradores en un rango de condiciones de viento (Mishra et al., 2022).

Huang et al. (2015) elaboraron un estudio experimental sobre el efecto de los tubérculos en el rendimiento de los perfiles de una turbina eólica de eje horizontal pequeña, concebidas en las aletas de ballena. Los resultados mostraron que las protuberancias en el borde de ataque de los álabes generaron un 40% más de sustentación. Además, los vórtices formados entre los tubérculos incrementaron el ángulo de ataque en condiciones de pérdida dinámica, mejorando así la estabilidad y el rendimiento del rotor.

Abate & Mavris (2018) exploraron el efecto de los tubérculos en el borde de ataque, idealizadas en las aletas de la ballena jorobada, en los álabes de una turbina eólica de eje horizontal bipala usando el perfil NREL Phase VI (S809). Incorporaron un borde sinusoidal a lo largo de diferentes porcentajes de la envergadura de la pala y mediante simulaciones en Star CCM+ con el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST, evaluaron seis configuraciones en velocidades de flujo de 5 m/s a 20 m/s. Determinaron que las configuraciones con protuberancias en el 62% y 95% de la envergadura del perfil presentaron mayor producción anual de energía (AEP) a 20 m/s en comparación con el modelo sin modificar.

Erfort (2019) investigó la variación del par de torsión en una aeroturbina eólica de eje vertical tipo Darrieus con dos álabes, considerando cómo estas oscilaciones pueden afectar la vida útil del tren de transmisión debido a la fatiga. Usando el modelo "Tubo Doble de Flujo Múltiple" (DMST) en Python y simulaciones en OpenFOAM, examinó un perfil aerodinámico NACA-0012 modificado con "Distorsión adaptiva", proyectado en la aleta de la ballena jorobada. Esta modificación redujo las fluctuaciones del par de torsión formando una meseta en lugar de picos, lo que disminuyó el coeficiente de potencia, pero extendió la vida útil del eje del tren de transmisión en un 36%.

En el trabajo de Du et al. (2020) adaptaron los álabes NACA-0021 incorporando una configuración sinusoidal de tubérculos en el borde de ataque, a una aeroturbina recta Darrieus. Hicieron ensayos experimentales en túnel de viento bajo diferentes condiciones de flujo, registrando un mejor rendimiento de autoarranque en comparación con los álabes sin modificar. Mishra et al. (2022), propusieron la implementación de tubérculos en los álabes de una aeroturbina Darrieus recta, incluyendo tanto simulaciones numéricas (modelo de turbulencia SST de transición) como pruebas experimentales. La amplitud, longitud de onda y disposición a lo largo del borde de ataque fue identificada como factores que influyen en el rendimiento. La comparación entre el perfil NACA-0018 estándar y con protuberancias reveló que las modificadas tienen ciertas ventajas en condiciones de baja velocidad del viento y en ángulos de ataque elevados, donde el riesgo de estancamiento aerodinámico es más pronunciado.

Mientras que los estudios antes mencionados han demostrado los beneficios potenciales de integrar características biomiméticas en los álabes de aerogeneradores convencionales, el enfoque en las aeroturbinas de eje vertical ha sido relativamente limitado, ya que es un área que ha recibido menos atención en términos de la integración bioinspirada. Si bien, existen investigaciones que han analizado la aplicación de conceptos similares en aerogeneradores de eje horizontal y vertical, persiste un desafío no resuelto relacionado con la optimización del rendimiento del rotor en condiciones de velocidades bajas del viento. Este trabajo de investigación busca explorar cómo la adaptación de los tubérculos en el borde de ataque puede influir en el desempeño de los aerogeneradores de eje vertical. Se centra en el análisis de los efectos de estas características biomiméticas, en términos de rendimiento, especialmente en condiciones de baja velocidad de viento, que son comunes en entornos urbanos y de menor altura.

La emulación de las protuberancias propias de la aleta pectoral de la ballena jorobada, adaptada al borde de ataque de un perfil aerodinámico NACA-0018, tiene el potencial de variar los coeficientes de sustentación y arrastre. Como resultado, es plausible que esta modificación influya en el coeficiente de potencia y, en última instancia, mejore el rendimiento del rotor en situaciones de baja velocidad del aire.

1.4. Simulaciones y modelado de aeroturbinas de eje vertical

Las simulaciones numéricas son relevantes en el análisis del comportamiento aerodinámico de los aerogeneradores de eje vertical (o de sus componentes), particularmente en aquellos que utilizan perfiles modificados a ser probados. ANSYS Fluent es un software de dinámica de fluidos computacional (CFD) ampliamente utilizado en la industria y la academia para realizar simulaciones detalladas del flujo de aire alrededor de estos dispositivos. Este software permite la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo (RANS), lo que es esencial para capturar los fenómenos aerodinámicos complejos asociados con la operación de los rotores.

En Hasan et al. (2014) realizaron el análisis numérico de un rotor de eje vertical de tres álabes utilizando el perfil NACA-0018 con ANSYS-Fluent. Este trabajo se concentró en la evaluación del coeficiente de potencia en diferentes relaciones de velocidad de punta (TSR), utilizando el modelo de turbulencia RNG $k - \varepsilon$. Los resultados arrojaron que la aeroturbina alcanzó su máximo rendimiento a una TSR de aproximadamente 0.9, con un coeficiente de potencia máximo de alrededor de 0.32. En otro estudio numérico, Alaimo et al. (2015) compararon el rendimiento aerodinámico de rotores de eje vertical con perfiles rectos y helicoidales mediante simulaciones en 2D y 3D empleando ANSYS-Fluent, revelando que los aerogeneradores con álabes helicoidales experimentaron un flujo aerodinámico más estable y una distribución de carga más uniforme a lo largo de los álabes, lo que produjo un aumento de hasta un 15% en los coeficientes de potencia en comparación con álabes rectos. Por su parte, Parra-Santos et al. (2016) elaboraron un estudio numérico de un rotor de eje vertical tipo Darrieus, configurado con tres álabes rectos utilizando perfiles NACA. Con ANSYS-Fluent, emplearon las ecuaciones RANS para evaluar el rendimiento aerodinámico bajo diferentes ángulos de paso (pitch) y relaciones de velocidad en la punta. Las soluciones indicaron que el modelo de turbulencia SST de transición proporcionó predicciones más precisas del comportamiento del flujo en comparación con el modelo $k - \varepsilon$ realizable. Además, se observó que álabes con ángulos de paso negativos mejoraron significativamente el rendimiento del aerogenerador, logrando coeficientes de potencia de hasta 0.35 en configuraciones adecuadas.

En trabajos más recientes, Korukcu (2019) sondeó el desempeño aerodinámico de un rotor de eje vertical de álabes rectos usando ANSYS-Fluent 18.2. Fueron probados diferentes valores de solidez y tipos de perfiles aerodinámicos, indicando que la longitud de la cuerda y el radio del rotor tienen un impacto significativo en el rendimiento, registrándose coeficientes de potencia más elevados con configuraciones mejoradas. Además, se identificaron ángulos azimutales críticos (70° , 190° , y 310°) donde el rendimiento del aerogenerador se maximiza. Ashwindran et al. (2019) se centraron en la evaluación de la dependencia de la resolución de malla y del tamaño del paso de tiempo en simulaciones de aerogeneradores de eje vertical tipo drag utilizando ANSYS-Fluent. Se llevaron a cabo las simulaciones en 2D bajo condiciones de flujo no estacionario, empleando el modelo de turbulencia SST $k - \omega$, manifestando una mínima discrepancia en la precisión al utilizar diferentes configuraciones de malla y pasos de tiempo, lo que sugiere que es posible reducir el costo computacional sin sacrificar la precisión de los resultados. Gerrie et al. (2023) hicieron un estudio del rendimiento de una turbina híbrida de eje vertical capaz de alternar entre configuraciones Darrieus y Savonius. Utilizando simulaciones 3D en ANSYS-Fluent, contrastaron los resultados obtenidos con experimentos en túnel de viento. Aunque las simulaciones predijeron eficiencias menores en comparación con las pruebas experimentales, ambas mostraron tendencias similares, lo que valida el uso del modelo para el mejoramiento de turbinas híbridas. La configuración Savonius demostró ser más eficiente a bajas TSR (< 0.14), mientras que la configuración Darrieus obtuvo una eficiencia óptima del 12.5% al aumentar el diámetro o la longitud de los álabes. Carraro et al. (2022) evaluaron el impacto de la erosión en el borde de ataque de los álabes de aeroturbinas empleando ANSYS-Fluent con el modelo de turbulencia SST $k - \omega$, en forma bidimensional y tridimensional. Las soluciones mostraron que la erosión disminuye significativamente el rendimiento aerodinámico, particularmente al aumentar el arrastre y reducir la sustentación. Los modelos 3D proporcionaron una visión más precisa del flujo, mostrando que el arrastre se incrementa en un 17% con la erosión, mientras que el modelo 2D, aunque menos preciso, es 30 veces más rápido, lo que lo hace útil para análisis preliminares. La investigación destaca la importancia de considerar la erosión en el mantenimiento predictivo y el diseño de álabes.

Aunque la estructura de las aeroturbinas de eje vertical Darrieus (tipo H o recto) es sencilla en comparación con los aerogeneradores de eje horizontal, los rasgos aerodinámicos son de naturaleza difícil. Los enfoques teóricos aerodinámicos típicos son: *momentum*, vórtice y cascada (Du et al., 2019). El análisis aerodinámico de los álabes, tanto en aerogeneradores de eje horizontal y vertical, se apoya ampliamente en la teoría de cantidad de movimiento o *momentum*. Esta teoría abarca tres enfoques distintos: *momentum*, elemento de pala y *momentum* de elemento de pala (BEM, por sus siglas en inglés). Con base a este último, diversas variantes han sido formuladas (Paraschivoiu, 1981; Strickland, 1977; Templin, 1974; Wilson & Lissaman, 1974), tomando la idea de uno o varios tubos de corriente en la predicción del rendimiento de las aeroturbinas de eje vertical. Entre ellos, el modelo de Tubo Doble de Corriente Múltiple (DMST, por sus siglas en inglés), concebido por Paraschivoiu (1981), es uno de los más empleados para evaluar las características aerodinámicas de los aerogeneradores Darrieus. La esencia de este método se basa en igualar la variación del momento inducido por el fluido y la fuerza ejercida por el flujo de aire sobre el álabe, utilizando la teoría BEM. Este enfoque permite calcular tanto el par momento como la potencia generada por el rotor (Paraschivoiu, 2002). El DMST es interesante por su relativa sencillez de implementación y su capacidad para proporcionar resultados que pueden ser correlacionados con datos experimentales (L. Roy et al., 2021).

En general, el modelo DMST ayuda a determinar el desempeño de una aeroturbina de eje vertical debido a su capacidad para proporcionar una representación aproximada de la aerodinámica y su flexibilidad para evaluar muchos prototipos en el diseño de los álabes, siempre y cuando se tengan datos confiables de los coeficientes de arrastre y sustentación. Es una herramienta útil que brinda la capacidad de evaluar, optimizar y validar las mejoras en el diseño de álabes, lo que conduce a una mejora en el rendimiento y la eficiencia del rotor, por lo que este método se utilizó para el análisis de las geometrías analizadas en la presente investigación.

El campo de la aerodinámica ha experimentado avances significativos en la modelización y análisis de turbinas eólicas de eje vertical (VAWT, designación en inglés) particularmente en el uso del modelo Tubo Doble de Corriente Múltiple (DMST, acrónimo en inglés). Este enfoque resalta por su costo computacional bajo, robustez y facilidad de implementación (Moghimi & Motawej, 2020). En un modelo DMST, el dominio del flujo se discretiza en un conjunto de tubos de flujo adyacentes, cada uno con dos actuadores en tándem, uno en el semiciclo corriente arriba y el otro corriente abajo (Vu & Pham, 2020). Esta configuración permite considerar dos aspectos importantes de la física del flujo: las condiciones de flujo en constante cambio experimentadas por los álabes y la diferencia en el fluido percibido entre las partes frontal y posterior del rotor (Dabachi, Rahmouni, & Bouksour, 2020). Sin embargo, este tratamiento del rotor no modela otros aspectos importantes de la física del flujo, como la expansión de los tubos de flujo, la interacción estela-álabe y el efecto de la mitad trasera del rotor sobre la mitad delantera (L. Roy et al., 2021). A pesar de estas limitaciones, el DMST sigue siendo una herramienta popular en los diseños de los aerogeneradores de eje vertical (VAWT, por sus siglas en inglés) debido a sus predicciones simplificadas o medias de bastante precisión (Peng et al., 2019).

La eficacia del modelo DMST en diversas configuraciones VAWT han sido demostradas en varios estudios. Dabachi, Rahmouni, Rusu, et al. (2020), aplicaron el DMST en simulaciones aerodinámicas de turbinas eólicas flotantes Darrieus de tipo recto, analizando parámetros críticos como la solidez de la turbina y el número de álabes. Por otro lado, Moghimi & Motawej (2020) desarrollaron un modelo DMST para evaluar y comparar el rendimiento aerodinámico de las turbinas eólicas

verticales tipo Gorlov y Darrieus, determinando un rendimiento superior en el rotor Gorlov, en términos de efectividad y fluctuación.

Ghiasi et al. (2022), efectuaron una valoración sobre el impacto de variables como la solidez, longitud de cuerda, número de aspas y relación de aspecto en el rendimiento de turbinas eólicas Darrieus tipo H, a bajos números de Reynolds, utilizando el modelo DMST; proporcionando una visión de cómo estos parámetros afectan el rendimiento. Además, Vu & Pham (2020) implementaron un enfoque analítico basado en la teoría DMST con correcciones de estela y pérdida dinámica para investigar el rendimiento aerodinámico de VAWT, tipo H. Resaltan la importancia de explorar y comparar métodos DMST para evaluar con precisión el impacto de las modificaciones aerodinámicas en álabes, en el contexto específico de los aerogeneradores de eje vertical de baja potencia.

El DMST también ha sido aplicado para investigar el rendimiento de VAWT en presencia de cuerpos con arrastre elevado (romo) al flujo de viento por Naseem et al. (2020), mostrando que el viento desviado por cuerpos romos posee una velocidad mayor, lo que aumenta la generación de energía del VAWT. Asimismo, Ghiasi et al. (2021), emplearon el modelo DMST junto con simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) para estudiar el rendimiento de turbinas eólicas Darrieus tipo H, a bajas relaciones de velocidad en la punta (TSR), enfocándose en la torsión aeroelástica de la pala del rotor.

El análisis aerodinámico de álabes modificados, inspirados en la naturaleza, representa un campo de investigación prometedor en la ingeniería de aerogeneradores. La implementación de características biomimetizadas, como las observadas en las aletas de las ballenas jorobadas, puede ofrecer mejoras significativas en la eficiencia aerodinámica. En este contexto, el método DMST representa una herramienta analítica para evaluar el rendimiento aerodinámico de perfiles aerodinámicos, especialmente en aplicaciones relacionadas con aerogeneradores VAWT. Este modelo ha evolucionado para abordar las limitaciones de las teorías de *momentum* tradicionales (Ayati et al., 2019).

Para evaluar y comparar la eficiencia de los perfiles aerodinámicos propuestos, se seleccionaron dos referencias clave como base teórica y metodológica. La primera, de Saber et al. (2018), presenta un modelo DMST modificado que se empleó para predecir el rendimiento de rotores verticales rectos mediante ajustes en la modelación del flujo múltiple. La segunda, de Meana-Fernández et al. (2018), desarrolla un análisis numérico del rendimiento de aeroturbinas de eje vertical, proponiendo diseños óptimos tras una amplia exploración paramétrica.

Aunque las condiciones de flujo consideradas en ambos estudios difieren de las empleadas en este trabajo, sus enfoques metodológicos fueron adaptados para analizar el diseño y rendimiento de los perfiles biomiméticos desarrollados. Los valores cuantitativos obtenidos en el presente estudio se compararán con los modelos estándar empleados para rotores de eje vertical, en lugar de replicar los resultados específicos de las referencias utilizadas.



CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

“No hay atajos en el camino hacia el éxito”

Soichiro Honda

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

En el campo de la energía eólica, el diseño eficiente de aerogeneradores de eje vertical es esencial para maximizar la captación de energía y mejorar la sostenibilidad de los sistemas energéticos, especialmente en entornos complejos donde las corrientes de aire son impredecibles y varían en intensidad y dirección. Este desafío requiere un entendimiento de conceptos fundamentales que van desde la teoría de la energía eólica hasta la aplicación de herramientas avanzadas como la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Este capítulo tiene como propósito establecer las bases teóricas necesarias para comprender cómo los principios biomiméticos pueden aplicarse a los perfiles aerodinámicos de la serie NACA-0018, adaptados específicamente para álabes en turbinas eólicas de eje vertical Darrieus de tipo H de baja potencia, con el fin de mejorar la eficiencia aerodinámica del rotor.

2.1. Descripción general de los sistemas de energías renovables

La demanda de electricidad continúa aumentando ya que es la energía utilizada para alimentar una amplia gama de aplicaciones que van desde la iluminación hasta los electrodomésticos del hogar y los servicios digitales y de comercio electrónico globales. La generación de energía utiliza la mayor variedad de combustibles: carbón, gas natural, energía nuclear y fuentes renovables. A medida que el uso de la electricidad aumenta, los tipos de combustibles utilizados para generar electricidad cambiarán, tanto a nivel global como regional. Las políticas que buscan abordar el cambio climático y la calidad del aire influirán en la elección de fuentes, impulsando el crecimiento en la generación de energía. Las tendencias clave que jugarán un papel decisivo en nuestro panorama energético global hasta 2040 son (Zohuri & McDaniel, 2021):

1. La energía impulsa las economías modernas y los estándares de vida.

Para 2030, la clase media económica mundial probablemente se expandirá de 3 mil millones a más de 5 mil millones de personas. Este crecimiento coincidirá con una mejora sustancial en los estándares de vida, lo que resultará en un aumento del uso de energía en muchos países en desarrollo a medida que las personas desarrollen negocios modernos y obtengan acceso a automóviles, electrodomésticos y viviendas con aire acondicionado.



2. Las necesidades energéticas globales aumentan en aproximadamente un 25%, lideradas por las naciones no pertenecientes a la OCDE.

A pesar de los avances en eficiencia, la demanda mundial de energía probablemente aumentará casi un 25%. Casi todo el crecimiento ocurrirá en países fuera de la OCDE (por ejemplo, China e India), donde se espera que la demanda aumente alrededor del 40%, aproximadamente la misma cantidad de energía que se utiliza hoy en las Américas.



3. La demanda de electricidad casi se duplica en los países no pertenecientes a la OCDE.

La actividad humana sigue dependiendo de suministros fiables de electricidad. La demanda mundial de electricidad aumentará en un 60% entre 2016 y 2040, liderada por un casi duplicado en la demanda de energía en los países no pertenecientes a la OCDE.



4. **La electricidad proveniente de la energía solar y eólica aumenta en aproximadamente un 400%.** Entre los suministros energéticos de expansión más rápida estará la electricidad proveniente de la energía solar y eólica, creciendo juntas aproximadamente un 400%. La proporción combinada de solar y eólica en el suministro mundial de electricidad probablemente se triplicará para 2040, lo que ayudará a reducir en más del 30% la intensidad de CO₂ de la electricidad entregada.
5. **El gas natural amplía su papel para satisfacer una amplia variedad de necesidades.** La abundancia y versatilidad del gas natural lo convierte en una valiosa fuente de energía para satisfacer una amplia gama de necesidades, al tiempo que ayuda al mundo a pasar a fuentes de energía menos intensivas en carbono. El uso del gas natural probablemente aumentará más que cualquier otra fuente de energía, con aproximadamente la mitad de su crecimiento destinado a la generación de electricidad.
6. **El petróleo sigue desempeñando un papel clave en la movilidad y los productos modernos.** Aunque el incremento en la adopción de vehículos eléctricos y las mejoras en la eficiencia de los motores de combustión interna podrían llevar a un punto máximo en el consumo de combustibles líquidos por parte de la flota mundial de vehículos ligeros hacia 2030, su demanda seguirá creciendo en el transporte comercial y la industria química.
7. **La descarbonización del sistema energético mundial se acelerará.** A medida que la economía mundial casi se duplique para 2040, las ganancias en eficiencia energética y el cambio hacia fuentes de energía menos intensivas en carbono contribuirán a una reducción de casi el 45% en la intensidad de carbono del PIB mundial. Es probable que las emisiones globales de CO₂ relacionadas con la energía alcancen su punto máximo para 2040, aproximadamente un 10% por encima del nivel de 2016.



La necesidad de flexibilidad en los sistemas eléctricos crece aún más rápido que la demanda de electricidad debido al aumento de la proporción de energías renovables variables y la creciente demanda de refrigeración y vehículos eléctricos. En la Figura 2.1 muestra la capacidad de generación de energía instalada por fuente en el Escenario de Nuevas Políticas, 2000–2040 (Choi & Lee, 2022). Para satisfacer esta creciente demanda, las energías renovables desempeñarán un papel decisivo en la producción de energía en el futuro.

Las *energías renovables* pueden definirse como fuentes de energía naturales que se regeneran de manera continua, a una velocidad igual o superior a la del consumo humano, lo que las hace relativamente inagotables. Ejemplos son la energía solar, eólica, hidráulica, de mareas, biomasa y geotérmica. Términos como *energías verdes*, *alternativas* y *sostenibles* se utilizan frecuentemente para describir la conversión de estas energías renovables en electricidad, calor o energía mecánica, empleando métodos que son más limpios, seguros y menos contaminantes en comparación con los convencionales (Earnest & Rachel, 2019). Sin embargo, es vital comprender las diferencias entre las tecnologías que utilizan estas fuentes para poder tomar decisiones informadas sobre su aplicación en contextos específicos. En la Tabla 2.1 se aprecian las diferencias entre las energías renovables y las convencionales.

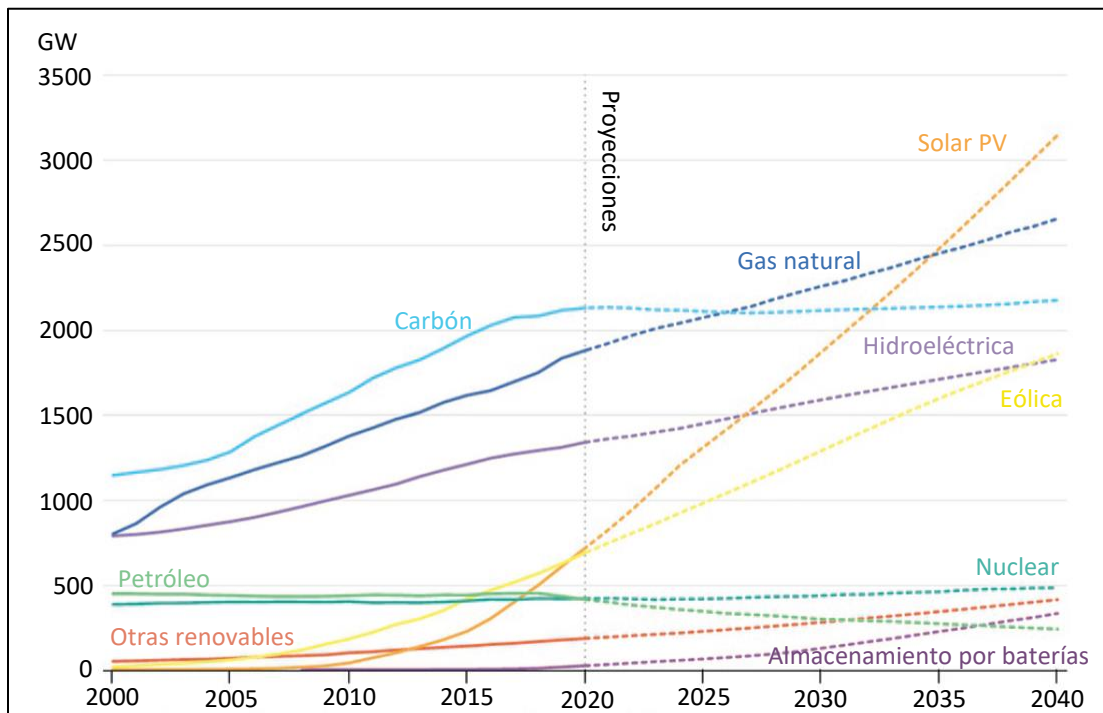


Figura 2.1. Capacidad de generación de energía instalada por fuente en el Escenario de Nuevas Políticas, 2000–2040 (Choi & Lee, 2022).

Tabla 2.1. Contrastes entre las energías renovables y convencionales.

Criterio	Renovables	Convencionales
Disponibilidad	Se utilizan directamente, sin necesidad de tratamientos complejos.	Requieren extracción y procesos de tratamiento que son complejos y dañinos para el ambiente.
Abundancia	Recurso que se regeneran continuamente.	Reservas en constante disminución.
Transportabilidad	No requiere transporte; se usa en el lugar donde está disponible.	Necesita ser transportado desde su origen, lo que incrementa su impacto ambiental.
Gases de efecto invernadero	Emisiones casi nulas (excepto durante la fabricación de equipos).	Libera gases de efecto invernadero durante su extracción y uso.
Seguridad energética	Reduce la dependencia de recursos limitados como petróleo y carbón.	La seguridad energética está en riesgo por la dependencia continua del petróleo.
Contaminación	Genera contaminación mínima, especialmente en la fase de disposición final.	Genera contaminación a múltiples niveles durante su ciclo de vida.

Fuente: Earnest & Rachel (2019).

Entre las tecnologías que han impulsado el crecimiento de las energías renovables, la electrónica de potencia ha sido un avance tecnológico significativo. Los convertidores de electrónica de potencia han permitido la integración de generadores de energía renovable con los sistemas existentes, como se muestra esquemáticamente en la Figura 2.2, mejorando la eficiencia en la recolección de energía mediante controles dedicados. Además, la electrónica de potencia es ampliamente utilizada en el lado del consumidor y es una tecnología clave para el desarrollo de la nueva red inteligente.

Las tecnologías de energía renovable son consideradas una de las soluciones más sobresalientes para el futuro y deben expandirse significativamente en este siglo para asumir la mayor parte de la producción energética global. Aunque existen numerosas tecnologías emergentes, estas varían en su grado de madurez y en la escala de su implementación. Además, la mayoría de las tecnologías renovables dependen de las condiciones climáticas, lo que presenta desafíos para su integración en los sistemas de red eléctrica. Es primordial resolver estos problemas para desarrollar un sistema energético capaz de manejar una alta penetración de energías renovables, lo que también implica avanzar en la creación de redes inteligentes. Estas redes pueden incluir microrredes y sistemas de almacenamiento de energía, y, en muchos casos, integrarán el sistema eléctrico con otros portadores de energía, como calefacción, refrigeración y gas, además de explorar el uso del transporte como un recurso adicional.

2.2. Energía eólica

La energía eólica ha sido aprovechada desde aproximadamente el año 4 000 a. C., inicialmente para impulsar embarcaciones, moler cereales y bombear agua en fincas. En tiempos más recientes, se ha empleado para generar electricidad. Los molinos de viento pequeños comenzaron a utilizarse para la generación eléctrica desde principios del siglo XX, pero el desarrollo de las turbinas eólicas modernas surgió a raíz de la crisis energética de la década de 1970 (Kanoğlu et al., 2020). Es importante destacar la diferencia entre los términos "*molino de viento*", utilizado para la generación de energía mecánica (como la molienda de granos o el bombeo de agua), y "*aerogenerador*", aplicado en la producción de energía eléctrica. No obstante, ambos dispositivos son técnicamente turbinas, ya que extraen energía de un fluido.

Al igual que cualquier fuente de energía, la energía eólica presenta tanto ventajas como desventajas. Entre sus principales beneficios, destacan los siguientes (Torabi, 2022):

- **Energía limpia o verde:** El viento es un fenómeno natural impulsado por los efectos térmicos en la Tierra. No genera emisiones, calor, ni ningún otro tipo de contaminación, lo que la convierte en una fuente de energía verde. A diferencia de las plantas térmicas convencionales, los aerogeneradores no contribuyen al smog, la lluvia ácida o la emisión de gases de efecto invernadero.
- **Abundancia de energía:** La cantidad de energía disponible en el viento es muy superior a la demanda energética mundial, incluso considerando el crecimiento del consumo energético. Si se aprovechara solo una pequeña fracción del viento global, sería suficiente para cubrir todas las necesidades energéticas.
- **Renovabilidad y sostenibilidad:** El viento es generado por la energía térmica del sol. Mientras existan el sol y la Tierra, seguirá soplando viento, lo que convierte a esta fuente en una opción renovable y confiable.
- **Fuente doméstica:** La energía eólica puede ser aprovechada en prácticamente cualquier país, utilizando las redes locales para distribuir la energía con mínimas pérdidas.

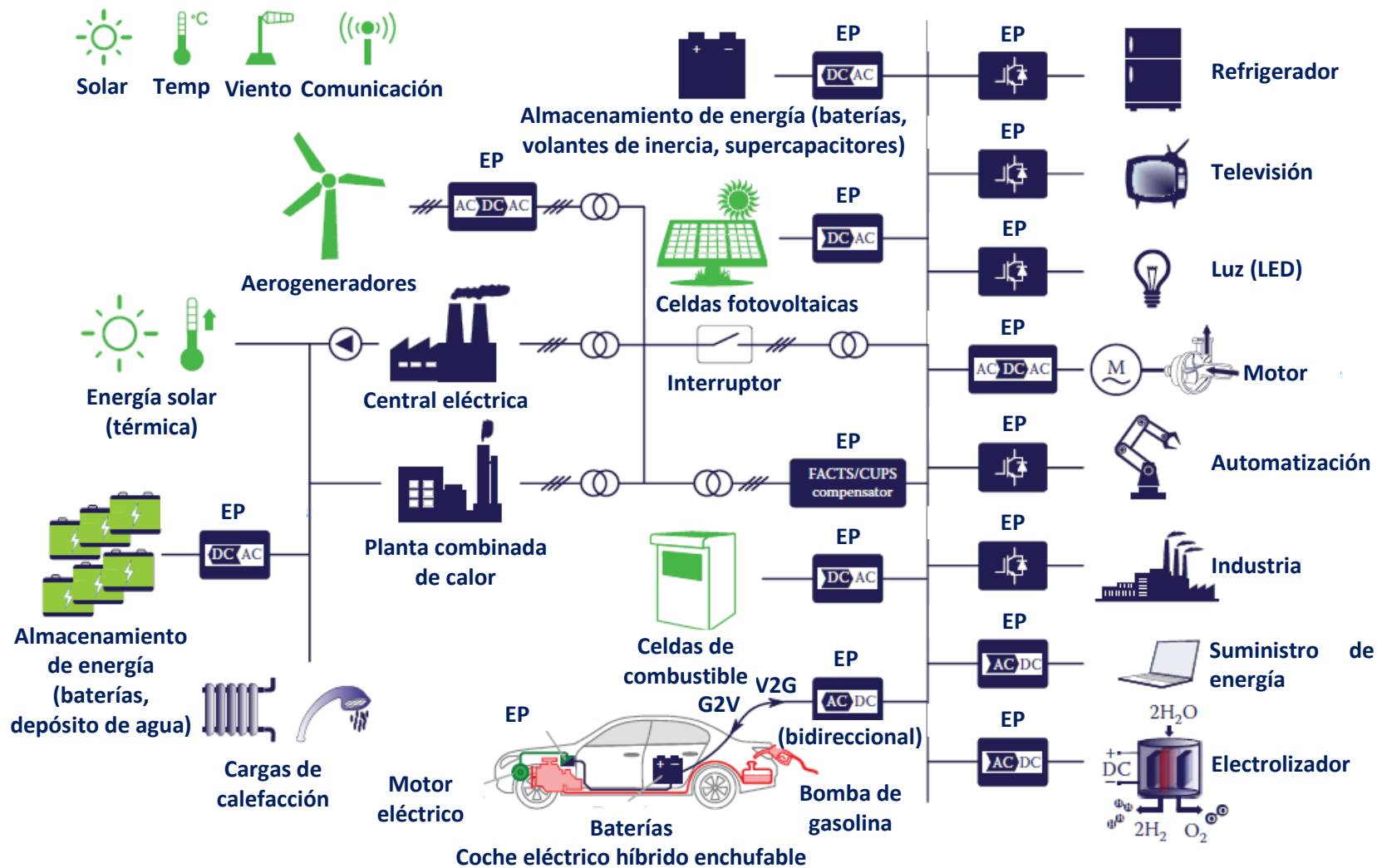


Figura 2.2. Representación de un sistema de energía moderno, que incorpora fuentes de energía renovables, generación distribuida y funciones de red inteligente. La integración es posible gracias al uso extensivo de la electrónica de potencia (EP: Electrónica de Potencia; G2V: red al vehículo; V2G: vehículo a la red) (Blaabjerg & Ionel, 2017).

- **Uso eficiente del suelo:** Los aerogeneradores requieren una superficie mínima para la construcción de sus cimientos. A diferencia de las plantas solares, que ocupan grandes áreas de tierra, los aerogeneradores pueden instalarse en terrenos agrícolas sin alterar su uso original. Los agricultores suelen alquilar pequeñas parcelas para la instalación de turbinas sin perder producción significativa.
- **Creación de empleos:** La instalación y mantenimiento de aerogeneradores genera numerosas oportunidades laborales en diversas disciplinas, como la ingeniería civil, mecánica y eléctrica, así como en servicios técnicos de mantenimiento.
- **Mantenimiento bajo:** Comparados con otras plantas de energía, como las nucleares o térmicas, los aerogeneradores requieren menos mantenimiento y pueden operar sin fallos durante décadas.

A pesar de los numerosos beneficios de la energía eólica, también existen algunas desventajas importantes que deben considerarse:

- **Ruido:** Los rotores generan ruido que, en algunos casos, puede ser un problema para las personas que viven cerca. Aunque algunos diseños permiten reducir el ruido perceptible por el oído humano, este aún puede afectar a otras formas de vida, particularmente la fauna local.
- **Contaminación estética:** Los aerogeneradores suelen ser estructuras grandes, lo que puede ser percibido como una contaminación visual en paisajes naturales o costeros. Particularmente, las turbinas eólicas instaladas en altamar pueden afectar la estética de las playas cercanas.
- **Daño a la fauna local:** Los álabes de las aeroturbinas pueden dañar a las aves que vuelan en las cercanías. Además, el ruido de las turbinas puede tener efectos no deseados en la fauna terrestre.
- **Reciclaje:** Las partes que componen los aerogeneradores están hechas de metales, materiales compuestos y otros elementos no metálicos. Si estas partes no pueden reciclarse adecuadamente, generarán residuos perjudiciales para el medio ambiente.
- **Generación en zonas remotas:** Aunque los aerogeneradores se pueden utilizar localmente, reduciendo las pérdidas de energía por transmisión en comparación con una red eléctrica, el viento de mayor densidad a menudo se encuentra en áreas donde no se requiere electricidad. Por ejemplo, el viento en altamar suele llevar más energía que en tierra, lo que significa que las plantas eólicas a menudo se instalan en lugares alejados de los centros de demanda energética.
- **Intermitencia:** Como cualquier fuente de energía natural, es intermitente. El viento puede detenerse o variar en velocidad y dirección, lo que implica que el diseño del sistema debe ser lo suficientemente sofisticado para garantizar una fuente de energía sostenible. En muchos casos, la energía generada debe almacenarse en dispositivos de almacenamiento a gran escala o complementarse con otras fuentes para garantizar un suministro constante.
- **Variación de potencia:** La potencia del viento es proporcional al cubo de su velocidad (Burton et al., 2021). Esto significa que, si la velocidad del viento se duplica, la potencia aumenta ocho veces. Por lo tanto, el diseño de las turbinas debe ser capaz de operar tanto con vientos de baja velocidad como soportar ráfagas de velocidad alta, lo que plantea desafíos de diseño y aumenta los costos del proyecto.

La energía disponible del viento puede calcularse mediante un análisis simple. Una porción de aire de masa m , que se desplaza con una velocidad V_{∞} , posee una energía cinética que se determina con:

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot V_\infty^2 \quad (2.1)$$

Si esta porción de aire tiene un volumen con un área de sección transversal A_c (perpendicular a la dirección del flujo) y una longitud L (paralela a la dirección del flujo), entonces su masa puede expresarse en función de la densidad del aire ρ de la siguiente manera:

$$m = \rho \cdot A_c \cdot L \quad (2.2)$$

Sustituyendo la Ecuación (2.2) en la Ecuación (2.1), se tiene:

$$E = \frac{1}{2} \rho \cdot A_c \cdot L \cdot V_\infty^2 \quad (2.3)$$

La potencia P , que es el cambio de la energía por unidad de tiempo, es:

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho \cdot A_c \cdot V_\infty^2 \frac{dL}{dt} = \frac{1}{2} \rho \cdot A_c \cdot V_\infty^2 (V_\infty) = \frac{1}{2} \rho \cdot A_c \cdot V_\infty^3 \quad (2.4)$$

La Ecuación (2.4) proporciona la potencia total disponible del viento para un área transversal A_c en relación con la dirección de la corriente libre. Una turbina eólica, o rotor, es el dispositivo encargado de extraer energía del viento. Un aerogenerador convierte una parte de la energía cinética del viento en energía mecánica, haciendo girar un eje que acciona una transmisión o acoplamientos, y posteriormente en energía eléctrica a través de un generador (Yahyaoui & Cantero, 2018), como se ilustra en la Figura 2.3.

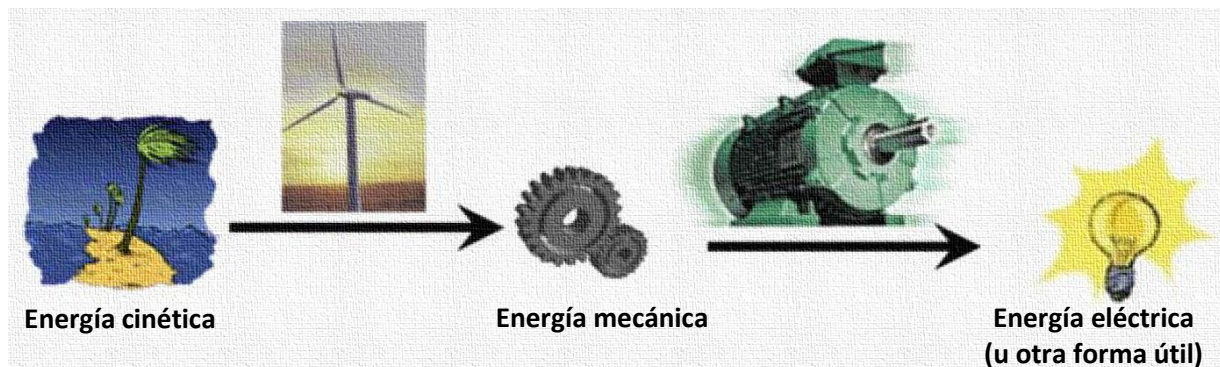


Figura 2.3. Principales etapas en la transformación de la energía del viento que efectúa un aerogenerador (Yahyaoui & Cantero, 2018).

2.3. Aerogeneradores

A lo largo de la historia se han propuesto innumerables configuraciones de dispositivos de conversión de energía eólica (Bos, 2012), como se muestra en la Figura 2.4. Generalmente, se agrupan según la orientación de su rotación en: **aerogenerador de eje horizontal** (HAWT, por sus siglas en inglés de Horizontal Axis Wind Turbine) y **aerogenerador de eje vertical** (VAWT, por sus siglas en inglés de Vertical Axis Wind Turbine). Otra alternativa de clasificarlos se basa en el principio de funcionamiento de las fuerzas aerodinámicas que actúan principalmente sobre sus álabes, ya sea por **sustentación** y/o

arrastre (Kanoğlu et al., 2020). Otra categorización, aunque menos común, considera el **diámetro del rotor** y la **potencia nominal** (R. Kumar et al., 2018), como puede verse en la Figura 2.5.

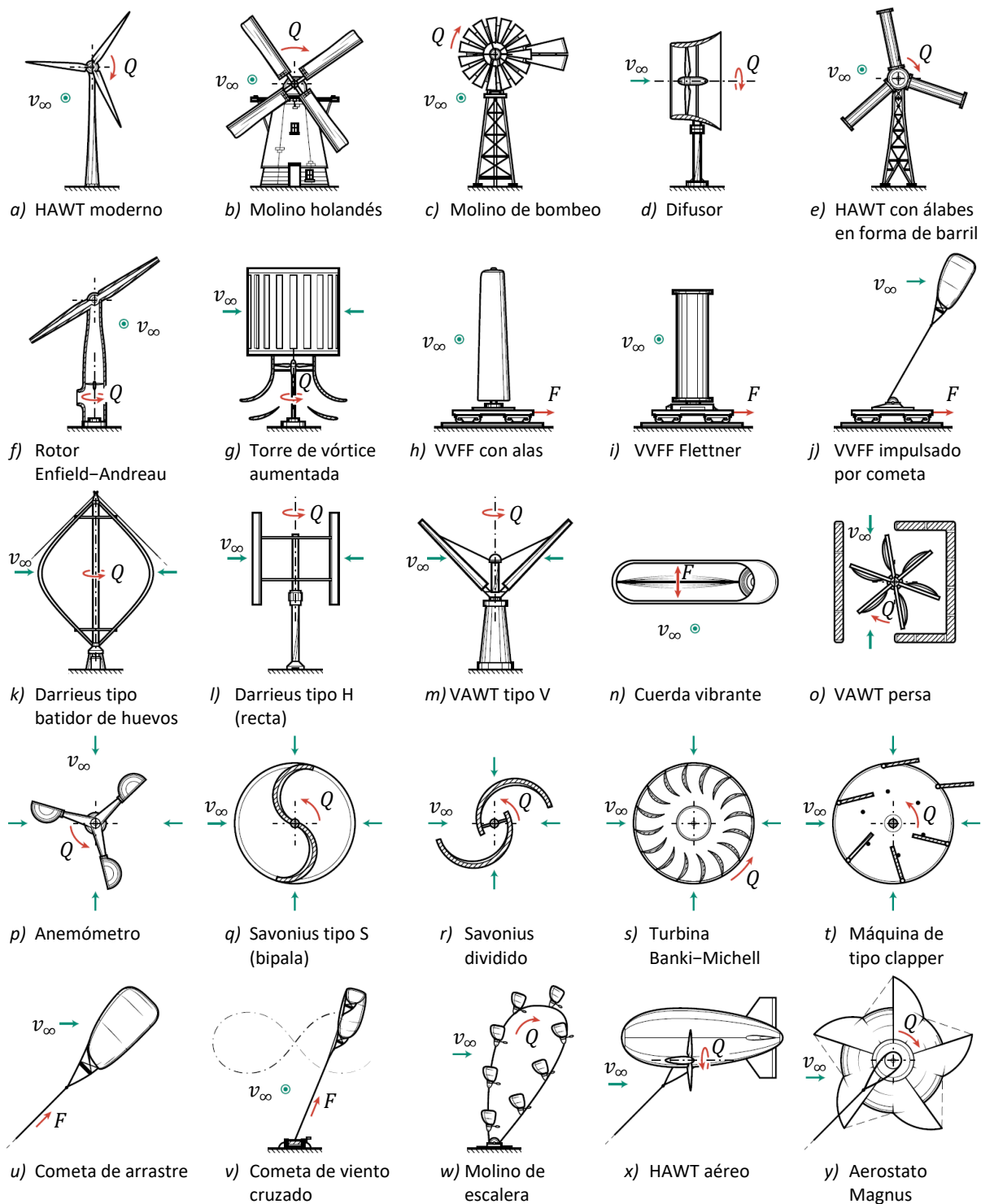


Figura 2.4. Rotores eólicos (Bos, 2012).

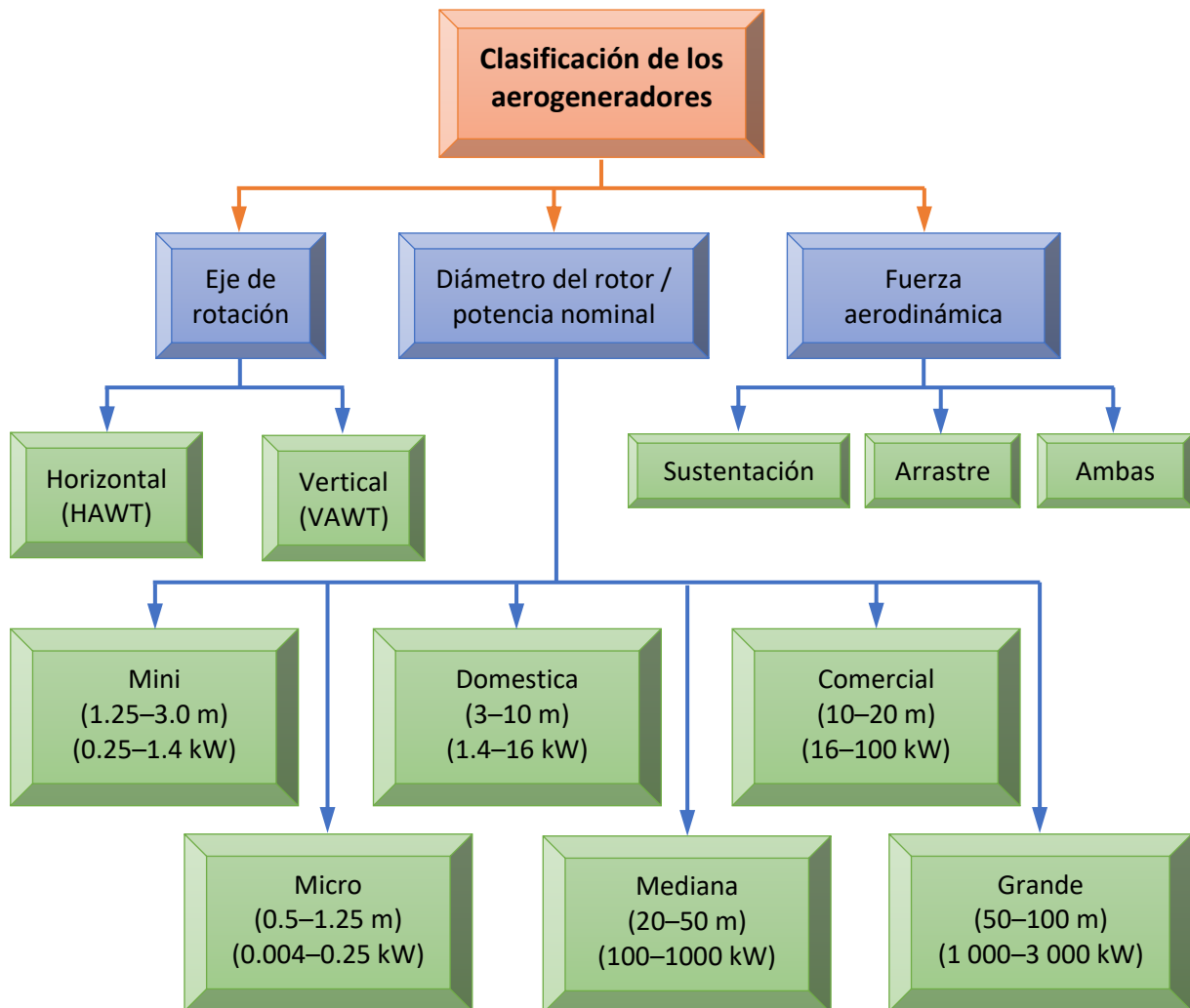


Figura 2.5. Distintas formas de agrupar a los aerogeneradores (R. Kumar et al., 2018).

A pesar de su protagonismo actual en el mercado de los HAWT, los VAWT tienen un lugar destacado en la historia de la energía eólica. Los primeros diseños de este tipo se remontan al año 1 700 a.C. en Mesopotamia, donde se empleaban como molinos de viento (Wendler-Ernst, 2014). Hoy en día, todavía se conservan algunos vestigios de estos molinos en Irán y Afganistán (antigua Persia). El primer diseño de los VAWT consistía en cuatro o más velas cuadradas montadas en un eje vertical. La simetría de este diseño impedía que el molino girara cuando el viento soplaba, por lo que se construyó una estructura que bloqueaba el viento en un lado. Esto resolvió el problema, permitiendo que el molino girara, aunque solo cuando el viento soplaba en la dirección adecuada (Figura 2.6).

Los VAWT pueden agruparse en dos tipos principales, dependiendo de la velocidad del viento, la eficiencia deseada y la aplicación. La primera clasificación es la *Savonius (de arrastre)*, inventado por Sigurd Johannes Savonius en 1922. Este tipo de rotor consta de dos o más álabes semicirculares simples. Aunque la eficiencia del rotor Savonius (alrededor del 15%) es menor que la de las HAWT (aprox. 45%) y las VAWT (aprox. 35%), sus ventajas, como la simplicidad de construcción y su buen par de arranque a velocidades de viento bajas, lo hacen atractivo para aplicaciones en entornos urbanos, iluminación de calles, bombeo de agua y aplicaciones en techos, ya que operan bien en condiciones de viento turbulento y a velocidades bajas (MohanKumar et al., 2023).



Figura 2.6. Molino de viento en Nashtifan, Irán. Características: 6 palas, longitud 15 m y diámetro del rotor de 7 m (Wendler-Ernst, 2014).

La segunda agrupación es la *Darrieus (de sustentación)*, que presenta una mejor eficiencia en comparación con los aerogeneradores Savonius, debido a su diseño de álabes simple y su centro de gravedad bajo, lo que las hace más atractivas para aplicaciones en altamar. El primer diseño moderno de este tipo fue patentado por el inventor francés Georges Jean Marie Darrieus, primero en Francia en 1925 y luego en Estados Unidos en 1931. El concepto original de Darrieus es el rotor en forma de Φ . Una ventaja de esta forma es que las palas están constantemente sometidas a tensión, lo que en principio permite un mejor rendimiento estructural y palas más ligeras.

Como se presenta en la Figura 2.7, los principales elementos de una turbina eólica Darrieus son sus *álabes curvos*, cuyos extremos están sujetos a *bujes rígidos superior e inferior*, separados por la *columna del rotor*. Para minimizar los esfuerzos internos de flexión durante la rotación, las palas tienen una forma que se aproxima a la curva *troposkien* (del griego, *cuerda giratoria*), una geometría que permite reducir al mínimo los esfuerzos de flexión. Suelen tener dos o tres álabes de paso fijo (pitch), generalmente simétricas en su sección transversal y sin torsión ni disminución del grosor. El material más común para las palas de los Darrieus es una aleación de aluminio extruido. Las palas están atornilladas a los bujes superior e inferior, cada uno de los cuales está rígidamente conectado a la columna del rotor. De este modo, la columna del rotor capta el par de torsión de ambos bujes y lo transmite al tren de potencia. La resistencia al pandeo es el principal aspecto estructural de la columna del rotor, ya que esta debe soportar las cargas elevadas hacia abajo producidas por los cables de soporte (Spera, 2009).

El diseño de la patente incluía dos configuraciones principales en los álabes: curvos y rectos, como se exhibe en la Figura 2.8. Existen varias variantes de álabes curvos, como las versiones en voladizo y con cables de soporte. Estas variantes minimizan los momentos de flexión en las palas, pero son más propensas a la pérdida dinámica (stall) en comparación con los de palas rectas. Por otro lado, los de álabes rectos presentan varias ventajas: autorregulación, geometría simple de la turbina, ausencia de cables de soporte y menores costos (Dabachi, Rahmouni, Rusu, et al., 2020).

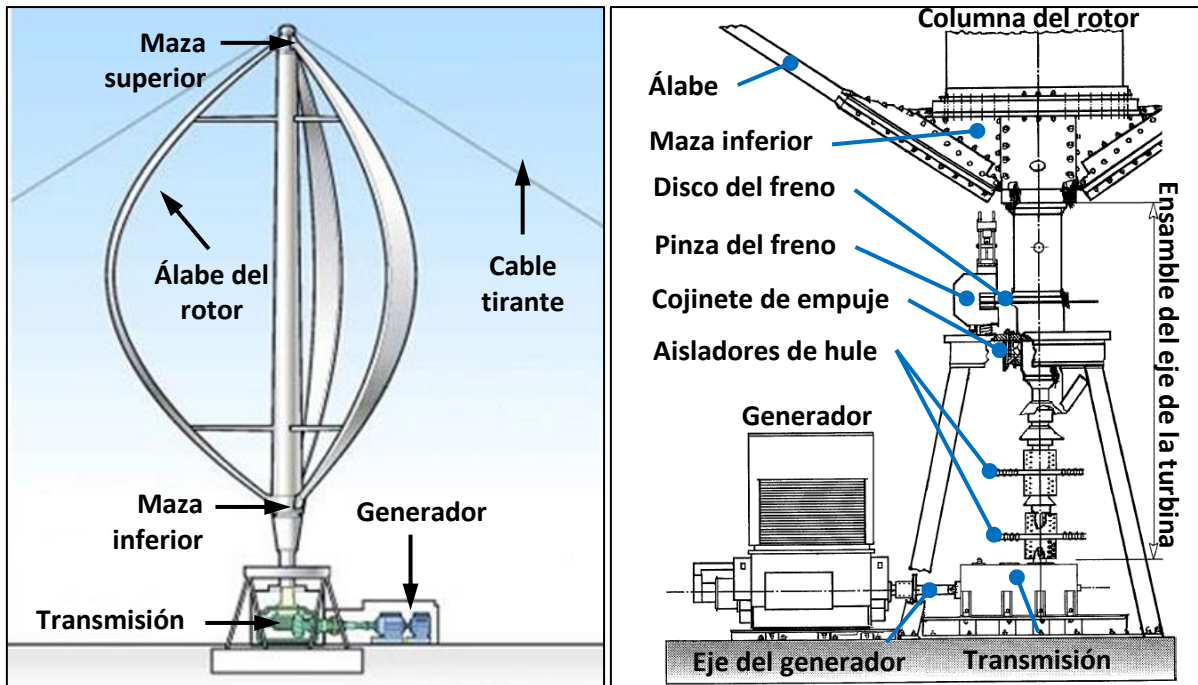


Figura 2.7. a) Representación de las partes principales del aerogenerador Darrieus moderno; b) Detalle del tren de potencia (Hussany, 2023; Spera, 2009).

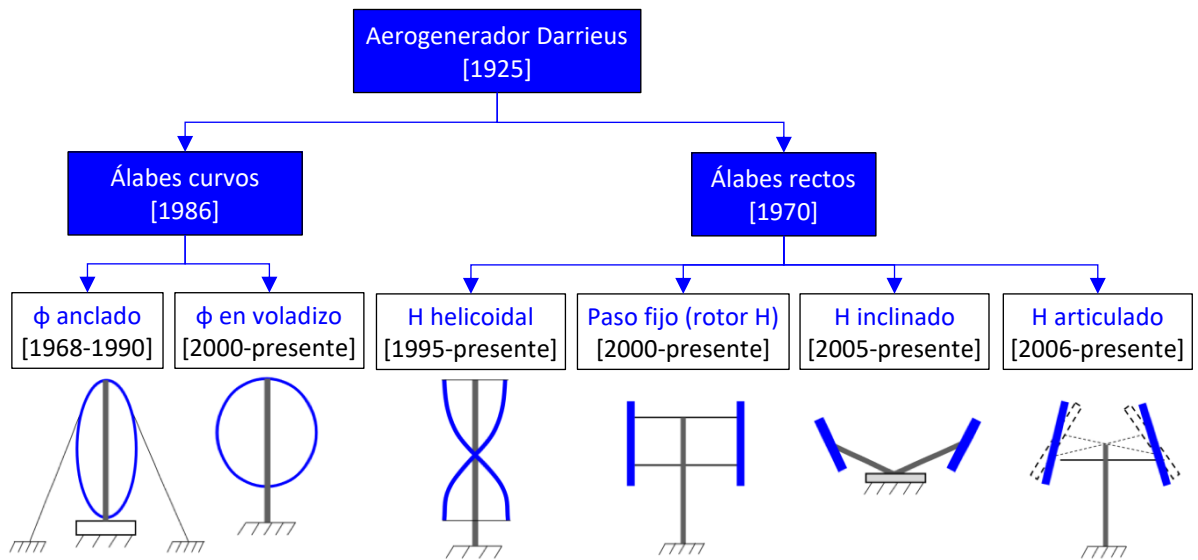


Figura 2.8. Distintos arreglos de la aeroturbina Darrieus (Dabachi, Rahmouni, Rusu, et al., 2020).

En la Figura 2.9 se expone una línea de tiempo que ilustra el progreso de las turbinas eólicas de eje vertical con capacidad superior a 100 kW, que incluyen tanto rotores experimentales, prototipos y aeroturbinas comerciales fabricados en mayor número. Pueden distinguirse dos fases en el impulso de estos aerogeneradores: la primera alrededor de las décadas de 1980 y 1990, y la segunda en la última década. Entre los años 2010–2020 se ve un resurgimiento del rotor H y antes se prefería el rotor Φ . Por último, también se revela un cambio geográfico en donde se desarrollaron estas tecnologías (P. M. Kumar et al., 2019; Möllerström et al., 2019).

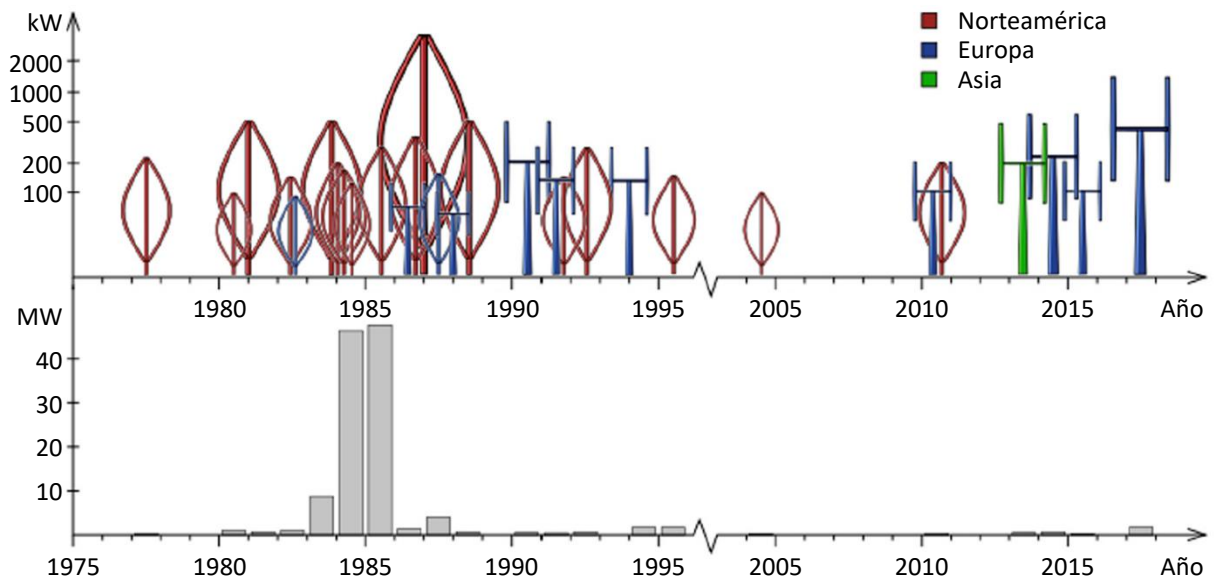


Figura 2.9. Desarrollo del diseño en aerogeneradores de eje vertical de tipo sustentación (Möllerström et al., 2019).

Últimamente, ha recobrado la importancia por los VAWT debido a ciertas virtudes relacionadas que las hacen apropiadas para ciertas aplicaciones. En comparación con los convencionales HAWT, los de eje vertical ofrecen varias ventajas, las cuales se resumen en la Figura 2.10 y la Tabla 2.2.

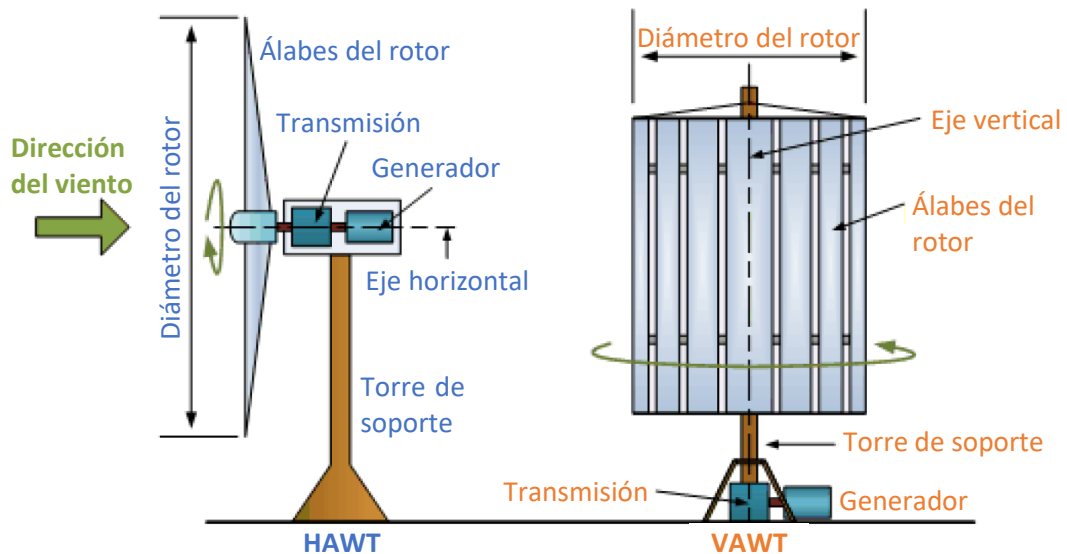


Figura 2.10. Partes fundamentales en los aerogeneradores de eje horizontal y eje vertical (Galetta, 2019).

Para un análisis detallado de los componentes principales y las tendencias en el desarrollo de los HAWT, se recomienda consultar el Anexo A.1, donde se describen sus elementos más representativos y las proyecciones de crecimiento en la industria eólica.

Tabla 2.2. Comparación entre diferentes tipos de aeroturbinas.

Atributo	HAWT	Darrieus	Savonius
Geometría del álabe	Compleja	Sencilla	Fácil
Mecanismo de ajuste (yaw)	Indispensable	Ninguno	Ninguno
Capacidad de cambiar el ángulo del álabe (pitch)	Sí	Sí	No
Fabricación a gran escala	Sí	Sí	No
Soporte de peso del rotor	Medio	Bajo	Alto
Nivel de ruido	Alto	Bajo	Bajo
Disposición del generador y la transmisión	Parte superior de la torre	En la base	En la base
Puesta en marcha (autoarranque)	Sí	Lento	Sí
Cimientos	Complejos	Sencillos	Sencillos
Eficiencia ideal	Alta	Alta	Baja
Costos de mantenimiento	Costosos	Baratos	Baratos
Investigación previa	Extensa	Escasa	Escasa
Complejidad estructural	Si	No	No

Fuente: Gitifar et al. (2024).

Las virtudes de los rotores Darrieus H, particularmente cuando se emplean en entornos con bastante turbulencia y velocidades del viento reducidas, son las siguientes (Du et al., 2019):

- **Indiferencia a la dirección del viento:** No depende de un dispositivo de orientación (yaw).
- **Geometría de álabes sobria:** Pueden tener una sección transversal constante a lo largo de toda su longitud, sin torsión ni disminución de grosor, por lo que todas las secciones del álabe tienen la misma relación de velocidad en la punta y velocidad relativa.
- **Reducción del ruido aerodinámico:** Debido al radio constante de la pala se previenen velocidades excesivas en la periferia, como sucede con los HAWT de tamaño similar.
- **Menor impacto por variaciones del flujo:** La eficiencia del rotor se ve menos perjudicado por la inestabilidad de la dirección del viento y la turbulencia, especialmente en entornos urbanos.
- **Facilidad de mantenimiento:** Los sistemas de transmisión, generador y control pueden instalarse a nivel del terreno; lo que tanto el montaje como el mantenimiento. Además, la ausencia de una carcasa, el sistema de transmisión y el generador pueden disponerse para reducir la inercia de giro, lo que facilita el arranque autónomo.
- **Mayor densidad de potencia:** Experimento sugieren que estos aerogeneradores pueden colocarse mucho más cerca unos de otros, aprovechando los vórtices generados por las aeroturbinas situadas corriente arriba. Esto incrementa la densidad de potencia del sitio.

A pesar de sus ventajas, los rotores H registran ciertos inconvenientes con respecto a los aeroturbinas de eje horizontal, los cuales son (Du et al., 2019):

- **Zonas muertas aerodinámicas:** Cuando la turbina eólica termina una revolución, los álabes transitan por zonas ineficaces aerodinámicas o “muertas”, lo que reduce el desempeño general del aerogenerador.

- **Aerodinámica compleja:** Es complicada debido al vaivén frecuente el ángulo azimutal y de ataque de los álabes.
- **Par de arranque bajo:** Tienden a tener un momento de torsión reducido, lo que puede impedir arrancar automáticamente, incluso sin carga.
- **Altura limitada:** Debido a que, generalmente, el rotor está más cerca del piso, no pueden beneficiarse del viento más rápido a mayor altura, lo que limita su eficiencia en algunos casos.
- **Cambios de par y potencia:** Varían debido a la orientación de los álabes con respecto al viento. Esto puede mitigarse añadiendo palas, aunque esto suma la complejidad y el costo del aerogenerador.
- **Momentos de flexión elevados:** Incorporan un reto adicional de diseño por la aceleración centrífuga que se genera, particularmente en rotores de menor tamaño.

2.4. Aerodinámica del rotor Darrieus recto

El diseño de las aeroturbinas Darrieus tipo H contempla diversos aspectos geométricos. A continuación, se agrupa una serie de los parámetros principales junto con sus detalles en la Tabla 2.3 y algunos se indican en la Figura 2.11.

Tabla 2.3. Propiedades geométricas de los rotores H.

Variable	Medición	Especificación
D	Diámetro del rotor	Diámetro de la circunferencia descrita por los álabes.
R	Radio del rotor	Mitad del diámetro del rotor.
H	Altura del rotor	Si el rotor tiene un solo nivel vertical, esta distancia coincide con la longitud de los álabes (envergadura). Cuando hay múltiples niveles, se suman las alturas de cada uno.
A_c	Área de referencia del rotor	Superficie de la sección transversal del rotor (proyección en la dirección del flujo, área de barrido) que se obtiene como resultado del diámetro por la altura del rotor.
H_0	Distancia al suelo	Distancia vertical entre el suelo y la base de los álabes.
B	Número de álabes	Cantidad de álabes del rotor (normalmente 2, 3 o 4).
AG	Geometría del álabe	Regularmente corresponde a un perfil simétrico (por ejemplo, de la familia NACA de 4 dígitos).
c	Cuerda del álabe	Longitud entre el borde de ataque y el borde de salida del perfil.
σ	Solidez del rotor	Parámetro adimensional que indica el porcentaje de la aeroturbina cubierto por los álabes ($\sigma = B \cdot c/R$).
α_0	Ángulo de fijación de los álabes	Medido desde la tangente del trayecto descrito por el centro de presión de los álabes. Generalmente, se ajusta a cero para perfiles simétricos. Para álabes en movimiento, se estima como el ángulo de referencia.
D_T	Diámetro de la torre	Diámetro del eje o torre central del rotor.
T	Número de niveles	Cantidad de etapas verticales en el rotor.
h	Altura del nivel	Longitud de los álabes a la etapa vertical correspondiente.
λ	Ángulo de desplazamiento de los niveles	Puede ser cero (análogo a un rotor de un solo nivel), o tener otro valor para modificar la puesta en marcha del rotor.

Fuente: Wendler-Ernst (2014).

La variable que considera la posición durante la rotación es el **ángulo azimutal** ($\theta = \theta(t)$) y tomando como conveniencia en la que $\theta = 0^\circ$ corresponde al eje y positivo, como se muestra en la Figura 2.12.

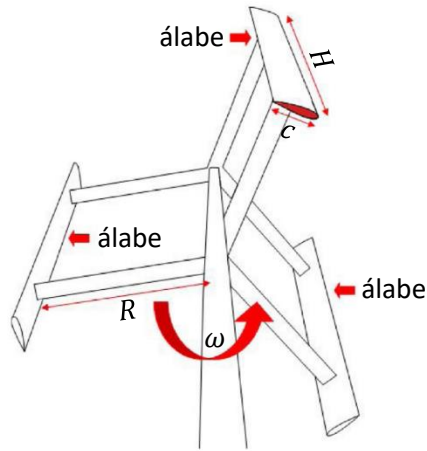


Figura 2.11. Dimensiones de diseño de una aeroturbina tipo H (Akbar & Mustafa, 2019).

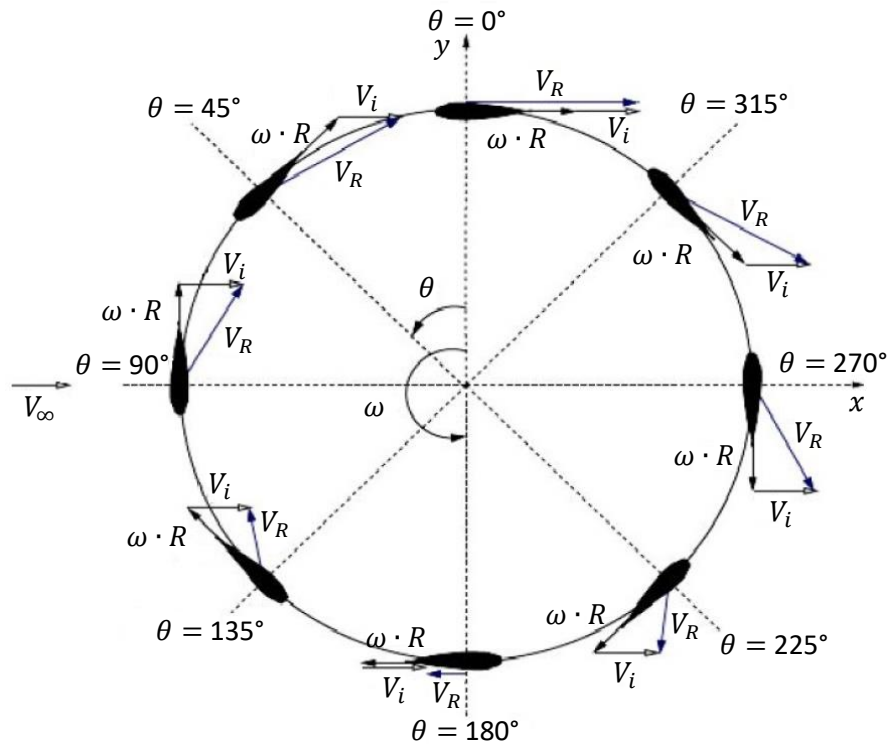


Figura 2.12. Triángulos de velocidades del ala en diferentes posiciones azimutales (Galetta, 2019).

La posición relativa y la inclinación de los álabes en relación con la corriente libre varían repetidamente en los VAWT; lo que crea triángulos de velocidad, ángulos y fuerzas aerodinámicas variables (Figura 2.12); afectando así la eficiencia de la aeroturbina. El ángulo de ataque, en consecuencia, cambia con la posición azimutal y en el tiempo ($\alpha = \alpha(\theta, t)$), ocasionando que la aerodinámica sea no estacionaria.

Los rotores de eólicos de eje vertical acostumbran a dividirse en dos mitades de circunferencia: una a barlovento ($0^\circ < \theta < 180^\circ$) y la otra a sotavento ($180^\circ < \theta < 360^\circ$).

La corriente del fluido circula por los álabes del rotor, las cuales tienen la forma de un perfil aerodinámico diseñada específicamente para producir par de torsión y potencia aprovechables. Como sucede en cualquier álabe, las componentes de velocidad cordal y normal, expresadas como V_c y $V_{i,n}$, respectivamente, pueden calcularse de:

$$V_c = V_t + V_{i,t} = \omega \cdot R + V_i \cos \theta \quad (2.5)$$

$$V_{i,n} = V_i \sin \theta \quad (2.6)$$

Donde V_i es la velocidad axial del flujo (es decir, la velocidad inducida) a través del rotor. La velocidad relativa resultante (V_R) que rodea un álabe en rotación es la suma vectorial de la velocidad de rotación de la pala y la velocidad local del viento. La velocidad relativa puede evaluarse a partir de las componentes de velocidad cordal y normal (Figura 2.13), a partir de:

$$V_R = \sqrt{V_{i,n}^2 + V_c^2} = \sqrt{(V_i \sin \theta)^2 + (\omega \cdot R + V_i \cos \theta)^2} \quad (2.7)$$

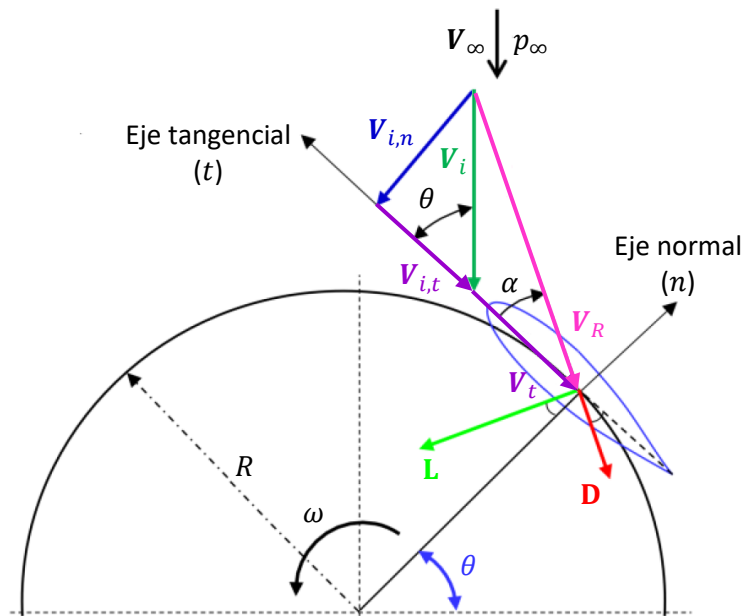


Figura 2.13. Triángulos de velocidades alrededor de un álabe de un rotor Darrieus (Dabachi, Rahmouni, Rusu, et al., 2020).

Al dividir la Ecuación (2.7) entre la velocidad de la corriente libre (V_∞) y recordando que $TSR = \omega \cdot R/V_\infty$, la expresión normalizada de la velocidad relativa es:

$$\frac{V_R}{V_\infty} = \sqrt{\frac{V_{i,n}^2 + V_c^2}{V_\infty^2}} = \sqrt{[(1 - a) \sin \theta]^2 + [TSR + (1 - a) \cos \theta]^2} \quad (2.8)$$

Donde a es el factor de inducción axial. La expresión entre α , θ , a y TSR ; puede deducirse a partir del triángulo de velocidades mediante:

$$\tan \alpha = \frac{V_{i,n}}{V_c} = \frac{V_i \sin \theta}{\omega \cdot R + V_i \cos \theta} = \frac{\frac{V_i}{V_\infty} \sin \theta}{\frac{\omega \cdot R}{V_\infty} + \frac{V_i}{V_\infty} \cos \theta} = \frac{(1-a) \sin \theta}{TSR + (1-a) \cos \theta} \quad (2.9)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{(1-a) \sin \theta}{TSR + (1-a) \cos \theta} \right] \quad (2.10)$$

Los perfiles aerodinámicos del rotor Darrieus tipo H experimentan un ángulo α variable en cada vuelta. El ángulo α tiene una correspondencia ligada con la razón de velocidades TSR y el ángulo θ , como lo advierte la Ecuación (2.10). Cuando la aeroturbina está en reposo, la corriente libre se acerca al rotor desde cualquier dirección, y θ puede variar entre 0° y 360° . A medida que la TSR crece, α decrece debido al aumento en la velocidad tangencial, implicando una mayor V_R en comparación con V_∞ (Mohankumar et al., 2023). La fluctuación de α con respecto a θ y la TSR se traza en la Figura 2.14.

De la justificación del triángulo de velocidades y la tendencia del ángulo de ataque en la mitad de corriente arriba (Ecuación (2.10) y Figura 2.14) sugiere que α es positivo, mientras que es negativo en la parte corriente abajo. La tendencia está influenciada por la TSR , debido a que cuando $V_t < V_\infty$, el triángulo se aplana y α disminuye. Cabe destacar que los álabes tienen cambios importantes en el ángulo α en el intervalo $135^\circ < \theta < 225^\circ$, mientras que en el rango $315^\circ < \theta < 45^\circ$ se distingue por ángulos cercanos a cero (Galetta, 2019).

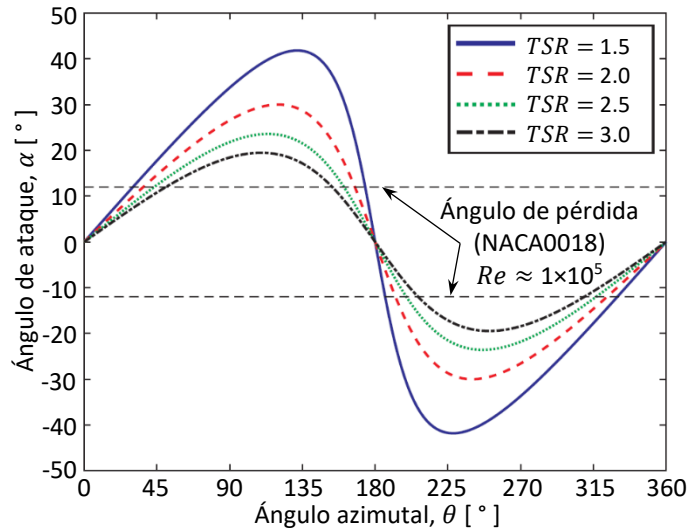


Figura 2.14. Ángulos de ataque con respecto a los ángulos azimutales de los álabes de la turbina eólica a relaciones de velocidad TSR de 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0; con factor de inducción axial cero (Z. Wang & Zhuang, 2017).

Los coeficientes de arrastre y sustentación pueden obtenerse adoptando distintos puntos de vista. En términos generales, se formulan como:

$$C_D = C_D(\alpha, Re) \quad (2.11)$$

$$C_L = C_L(\alpha, Re) \quad (2.12)$$

Como demostración, los coeficientes aerodinámicos experimentales del perfil NACA-0018 a un número de Reynolds (Re) de 5×10^5 se trazan en la Figura 2.15. Hay un aumento drástico en el arrastre cuando α supera los 15° y casi nula sustentación, y con estos factores el rotor Darrieus ofrecerá una disposición limitada para arrancar de manera autónoma. El par de arranque se ve aún más reducido debido a la separación de burbujas laminares, un comportamiento típico de los flujos a número de Reynolds bajos. A mayores valores de la TSR , tanto Re como α son más propicios para la formación de momento. Por consiguiente, la TSR es una componente clave en el rendimiento de las turbinas eólicas Darrieus (Mohankumar et al., 2023).

Con respecto a teoría de perfiles aerodinámicos para flujos subsónicos, cuando el Re y α están definidos, las fuerzas que intervienen en el perfil pueden estimarse a partir de valores aerodinámicos empíricos o experimentales. El arrastre actúa en dirección paralela a la velocidad relativa del viento, mientras que la sustentación es perpendicular a esta (Figura 2.16). Las componentes escalares del arrastre (D) y de la sustentación (L) pueden calcularse de:

$$D = \frac{1}{2} \rho \cdot c \cdot H \cdot V_R^2 \cdot C_D(\alpha, Re) \quad (2.13)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho \cdot c \cdot H \cdot V_R^2 \cdot C_L(\alpha, Re) \quad (2.14)$$

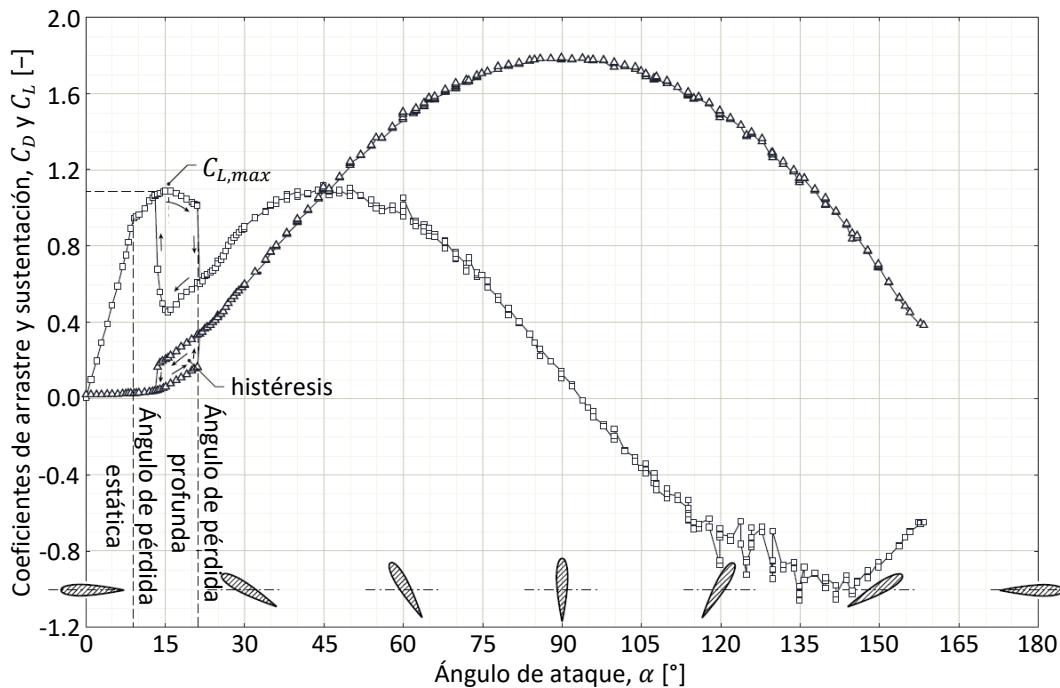


Figura 2.15. Gráficos de los coeficientes aerodinámicos de sustentación (\square) y arrastre (Δ) de un álabe NACA-0018 para un $Re = 5 \times 10^5$ (Bos, 2012).

La fuerza resultante aerodinámica (\mathbf{R}) puede descomponerse vectorialmente por medio de dos combinaciones propuestas, formuladas en la Ecuación (2.15):

$$\mathbf{R} = \mathbf{D} + \mathbf{L} = \mathbf{F}_t + \mathbf{F}_n \quad (2.15)$$

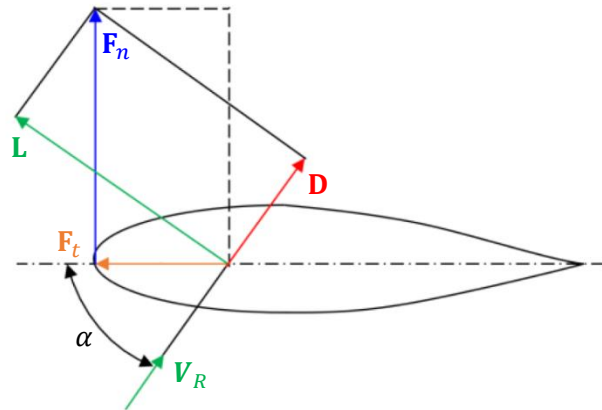


Figura 2.16. Esquema de fuerzas sobre un álabo de una turbina eólica vertical (Dabachi, Rahmouni, Rusu, et al., 2020).

Donde \mathbf{F}_t y \mathbf{F}_n son las componentes vectoriales de las fuerzas en dirección tangencial y normal, respectivamente, al movimiento circular de los álabes. Para estimar las componentes escalares de la fuerza tangencial (F_t) y normal (F_n) de la resultante mediante el ángulo de ataque, es mediante:

$$F_t = L \cdot \text{sen } \alpha - D \cdot \text{cos } \alpha \quad (2.16)$$

$$F_n = L \cdot \text{cos } \alpha + D \cdot \text{sen } \alpha \quad (2.17)$$

La visualización de los triángulos de velocidades y las fuerzas aerodinámicas en algunos ángulos azimutales puede apreciarse en la Figura 2.17. Cabe resaltar que \mathbf{F}_n es mayor que \mathbf{F}_t , lo cual es distintivo en las fuerzas aerodinámicas en los rotores eólicos del tipo H (Wendler-Ernst, 2014).

Asimismo, los coeficientes tangencial y normal se determinan a partir de los coeficientes de arrastre y sustentación, por:

$$C_t = C_L \cdot \text{sen } \alpha - C_D \cdot \text{cos } \alpha \quad (2.18)$$

$$C_n = C_L \cdot \text{cos } \alpha + C_D \cdot \text{sen } \alpha \quad (2.19)$$

El par de torsión suministrado por un álabo al eje del rotor (\mathbf{Q}_B) puede deducirse mediante la fuerza tangencial y el momento que actúa sobre el perfil (\mathbf{M}), descrito en la Ecuación (2.20). El momento, a menudo, se omite cuando es mucho menor que el otro término en la expresión.

$$\mathbf{Q}_B = \mathbf{R} \times \mathbf{F}_t + \mathbf{M} \quad (2.20)$$

La potencia instantánea de cada álabo entregada al eje, Ecuación (2.21), se obtiene por el producto punto de la velocidad de rotación y el par de torsión del rotor eólico. La potencia instantánea de la turbina eólica, Ecuación (2.22), se evalúa con la sumatoria de los momentos originados por los B álabes y las pérdidas aerodinámicas provocadas por los puntales de los perfiles y otros elementos (Wendler-Ernst, 2014). Lo anterior se manifiesta como:

$$\dot{W}_B = \mathbf{Q}_B \cdot \boldsymbol{\omega} = \omega(R \cdot F_t + M) \quad (2.21)$$

$$\dot{W}_T = \sum_{i=1}^B \dot{W}_{B,i} - \sum \text{p\u00e9rdidas} \quad (2.22)$$

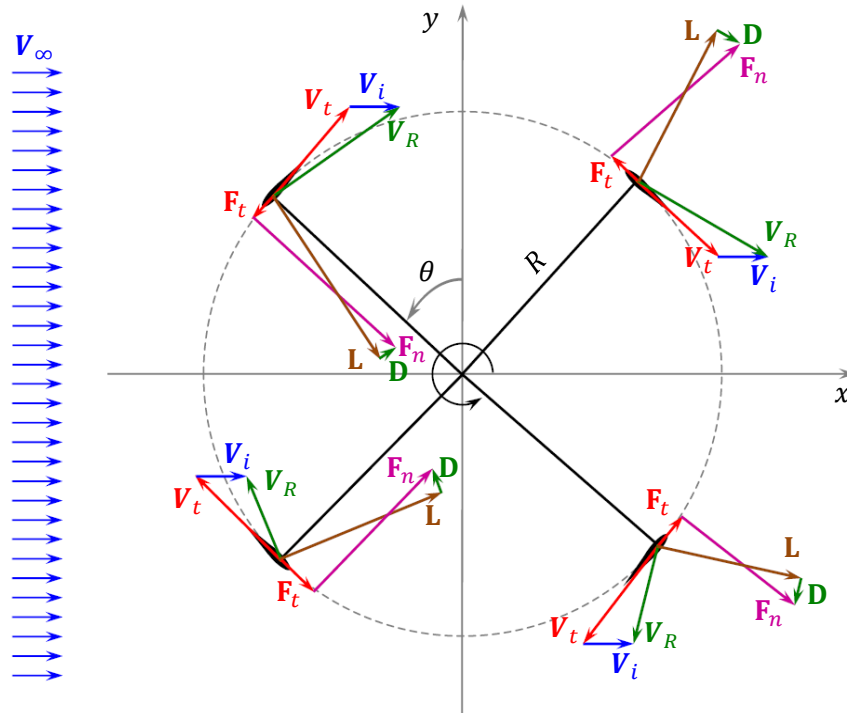


Figura 2.17. Tri\u00e1ngulos de velocidades y de fuerzas aerodin\u00e1micas en diversos \u00e1ngulos de rotaci\u00f3n de la aeroturbina (Wendler-Ernst, 2014).

El fen\u00f3meno de la entrada en p\u00e9rdida din\u00e1mica es particularmente relevante para los VAWT, tanto en su dise\u00f1o como durante su operaci\u00f3n. Este afecta las cargas de la turbina, el control y la din\u00e1mica del flujo en la estela. El movimiento de los \u00e1labes en estas aeroturbinas genera variaciones en las velocidades tangenciales y normales percibidas, lo que da lugar a un \u00e1ngulo de ataque variable y fuerzas din\u00e1micas fluctuantes. A valores de la $TSR < 4$, el \u00e1ngulo de ataque de los perfiles supera el \u00e1ngulo de p\u00e9rdida est\u00e1tica, lo que frecuentemente resulta en p\u00e9rdida din\u00e1mica. Adem\u00e1s, flujos turbulentos y la interacci\u00f3n v\u00f3rtice-\u00e1labe pueden inducir este fen\u00f3meno en las regiones de barlovento, sotavento e, incluso, en la regi\u00f3n posterior del rotor, dependiendo de las cargas del rotor y del valor de la TSR (D. A. M. De Tavernier, 2021).

Los efectos de la p\u00e9rdida din\u00e1mica en el funcionamiento de los VAWT incluyen (Zanon et al., 2015):

- **Incremento de fuerzas en las palas:** Produce oscilaciones notables en las cargas, reduciendo la vida \u00fatil por fatiga de las turbinas.
- **Disminuci\u00f3n del rendimiento:** Las variaciones de carga afectan directamente la potencia generada.
- **Impacto en las estrategias de control:** Especialmente en turbinas reguladas por p\u00e9rdida, donde las oscilaciones en las fuerzas dificultan el control.

- **Alteración del desarrollo de la estela:** Lo que puede perjudicar la eficiencia aerodinámica y la disposición de múltiples turbinas.
- **Aumento de ruido:** Asociado al desprendimiento de vórtices de gran tamaño y su interacción con los perfiles.

2.5. Estrategias generales para el diseño de aeroturbinas

A grandes rasgos, para la investigación y desarrollo de un aerogenerador de eje vertical puede agruparse en tres categorías e inclinarse por la más adecuada según las posibilidades y motivos del diseñador. Estos grupos se describen a continuación (Meana-Fernández, 2019) y se presentan en la Figura 2.18.

1. **Analíticos y numéricos:** Esencialmente se desarrollan a partir de ecuaciones o fenómenos que rigen el movimiento del elemento, con base a leyes y/o teorías que lo rigen, para después determinar una respuesta a esas relaciones.
2. **Dinámica de Fluidos Computacional (CFD):** Mediante la segmentación del dominio de flujo y la solución repetida, principalmente de las ecuaciones de continuidad y de momentum (Navier–Stokes) en cada elemento, puede inferirse el comportamiento aproximado que tendrá el aerogenerador probado dentro del fluido simulado.
3. **Experimentales:** Ejecución de pruebas, ya sea en ambientes controlados o in situ, de los prototipos físicos proyectados para la medición real de los parámetros de desempeño de la turbina eólica.

<p>Analíticos y numéricos</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Análisis dimensional ➤ Exergía ➤ Dinámico ➤ Disco actuador ➤ Blade Element Momentum (BEM) ➤ Tubo de corriente (streamtube) ➤ Cilindro actuador ➤ Modelos de vórtice ➤ Biomimética 	<p>Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)</p>
	<p>Experimentales</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Análisis modal operacional ➤ Mediciones de velocidad basadas en la presión ➤ Velocimetría de imagen de partículas (PIV) ➤ Anemometría de hilo caliente ➤ Pruebas en túnel de viento ➤ Pruebas en campo de prototipos

Figura 2.18. Estrategias de diseño aplicadas comúnmente en aerogeneradores de eje vertical (Meana-Fernández, 2019).

Aunque la estructura de un aerogenerador de eje vertical de álabes rectos es relativamente simple en comparación con uno de eje horizontal, los rasgos aerodinámicos son bastante complejos. La Figura 2.19 muestra los principales métodos teóricos agrupados en dos categorías principales. Hay tres modelos típicamente aerodinámicos que incluyen el de *momentum*, de *vórtice* y de *cascada* (los dos primeros métodos se utilizan típicamente). Estos esquemas son muy importantes para deducir los mejores parámetros de diseño y también para predecir el rendimiento del aerogenerador de eje vertical. La teoría del *momentum* es el método más importante para analizar las tipologías aerodinámicas del álabes, tanto para los aerogeneradores de eje horizontal como de eje vertical. Tiene tres tipos de teoría, incluido el de *momentum*, de elemento de pala y de *momentum* de elemento de pala (BEM). El modelo BEM es el más empleado. Basado en el modelo BEM, se fundamenta un modelo computacional aerodinámico, el de tubo de corriente (streamtube), solo utilizado para el aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus (Li, 2020).

2.6. Modelos basados en tubos de corriente

A lo largo del tiempo, se han propuesto múltiples modelos para predecir el desempeño energético y las cargas aerodinámicas de los rotores Darrieus. Cada uno presenta supuestos, limitaciones e imprecisiones. El procedimiento general para determinar el desempeño de una aeroturbina incluye los siguientes pasos (MohanKumar et al., 2023):

1. Determinar el ángulo de ataque local y la velocidad relativa correspondiente a la posición azimutal del perfil.
2. Calcular la velocidad inducida considerando la interacción álabe–estela.
3. Seleccionar el modelo matemático adecuado y las expresiones asociadas.
4. Evaluar las fuerzas tangenciales y normales sobre los álabes.
5. Incorporar características del perfil previas a la pérdida dinámica en diferentes números de Reynolds.
6. Considerar la relación de aspecto para incluir los efectos de merma en los extremos de los álabes.
7. Aplicar modelos de pérdida dinámica para captar los efectos no estacionarios.
8. Incluir modelos de curvatura del flujo para capturar el movimiento circular de los álabes.

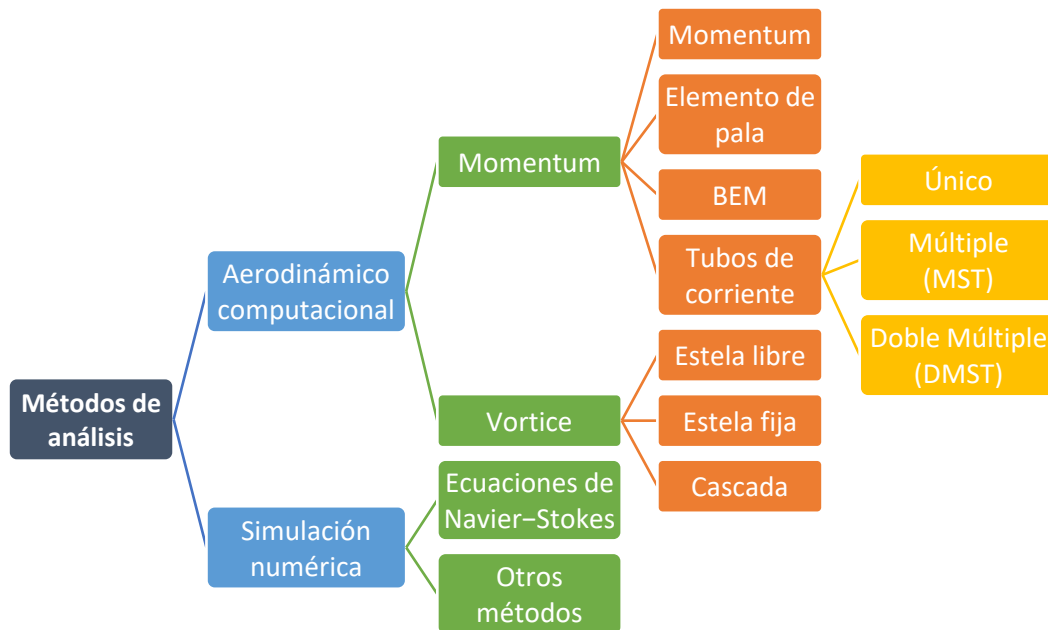


Figura 2.19. Principales métodos teóricos para los aerogeneradores de eje vertical de álabe recto (Li, 2020).

Los modelos aerodinámicos aplicados a las turbinas Darrieus de eje vertical se dividen en tres categorías principales: *momentum*, *vórtices* y *de cascada*. Los modelos de *momentum* han sido empleados en el cálculo aerodinámico de las turbinas Darrieus y manejados de diferentes maneras, pero el principio de estos es que, al destinar las fuerzas aerodinámicas en la dirección del flujo con los cambios de cantidad de movimiento, se obtendrá la velocidad inducida. El problema más importante de estos modelos es que no ofrecen una buena respuesta para solidez y *TSR* altas, ya que resuelven solo las ecuaciones de

momentum no es suficiente (Islam et al., 2008). En general, hay tres tipos de modelos de *momentum*: *tubo de corriente único*, *tubo de corriente múltiple* y *tubo doble de corriente múltiple*.

El primer intento de utilizar la teoría de *momentum* para estudiar los VAWT fue el **modelo de tubo de corriente único** propuesto por Templin (1974). Este modelo parte de la suposición de que la energía cinética del viento genera una fuerza de empuje en la dirección de la corriente (Ecuación (2.23)). La diferencia en la energía cinética entre el viento corriente arriba (V_∞) y corriente abajo (V_w) representa la potencia útil (P) extraída del viento (Ecuación (2.27)). La turbina se modela como un disco permeable, tal como se ilustra en la Figura 2.20, donde la energía cinética del viento se convierte en empuje (T) y par de torsión (Q) generados por los perfiles.

$$T = \dot{m}(V_\infty - V_w) \quad (2.23)$$

$$V_d = (1 - a)V_\infty \quad (2.24)$$

$$V_w = (1 - 2a)V_\infty \quad (2.25)$$

$$V_d = \frac{V_\infty + V_w}{2} \quad (2.26)$$

$$P = 2\rho \cdot V_\infty^3 \cdot a(1 - a)^2 \quad (2.27)$$

Para una comprensión más detallada del desarrollo de las ecuaciones empleadas, se recomienda consultar el Anexo A.2, donde se presenta la teoría clásica del *momentum* aplicada a turbinas eólicas. Este apartado expone los fundamentos matemáticos y físicos que respaldan el análisis del flujo de corriente a través del rotor, facilitando una base teórica esencial para la evaluación del desempeño aerodinámico de las aeroturbinas.

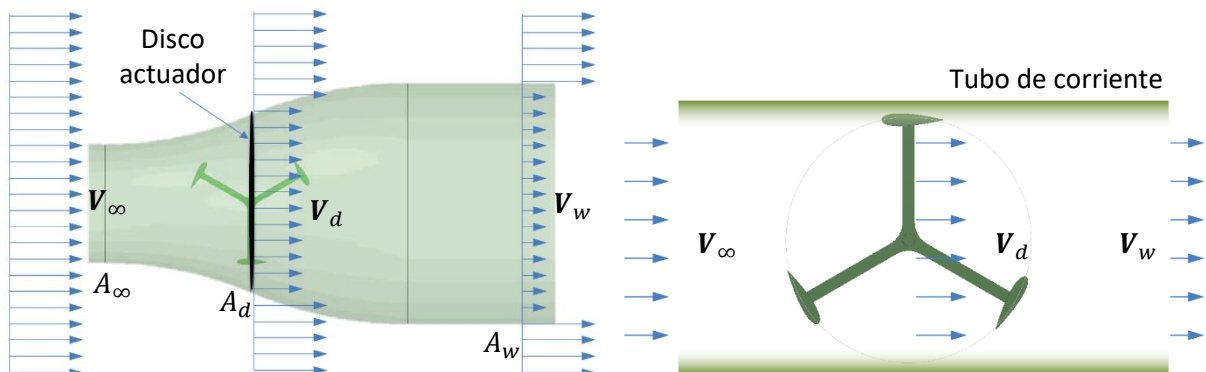


Figura 2.20. Representación de los modelos de disco actuador (izquierda) y de tubo de corriente único (derecha), según P. M. Kumar et al. (2017).

En este modelo, el rotor Darrieus representa un disco actuador dentro del tubo de flujo, lo que permite calcular sus características de rendimiento. Las suposiciones de la teoría del disco actuador, como el flujo corriente arriba irrotacional e incompresible y una velocidad uniforme en toda el área del disco, también se aplican al modelo de tubo de flujo único. Este enfoque fue pionero en incorporar el concepto de disco actuador en la modelización aerodinámica de las aeroturbinas Darrieus. De hecho, muchos de los modelos exitosos se basan en este fundamento.

El modelo considera que la velocidad corriente arriba V_∞ disminuye al pasar por el disco en proporción al factor de inducción (a), donde $a < 1$. Además, tiene en cuenta parámetros como la pérdida dinámica del perfil, solidez del rotor y la relación de aspecto de los álabes; lo que permite predecir el rendimiento de aeroturbinas con carga ligera. Sin embargo, a medida que aumentan la solidez y la relación de velocidad de punta (TSR), el modelo tiende a sobreestimar el rendimiento debido a la suposición de flujo uniforme en todo el disco (MohanKumar et al., 2023).

En el **modelo de tubo doble de corriente** (Figura 2.21), la superficie del actuador se reemplaza por dos discos actuadores en serie: uno para la parte corriente arriba y otro para la parte corriente abajo, con una fuerza de empuje equivalente. Además, se introduce un factor de inducción adicional (a') para el segundo disco actuador, Ecuaciones (2.28) y (2.29). La velocidad de salida del primer tubo de flujo se considera como la velocidad de entrada del segundo, que interviene en el desarrollo de la estela del primero (D. De Tavernier et al., 2022). Aunque este modelo es más sofisticado que el modelo de un solo disco, se supone que el flujo corriente abajo estará completamente desarrollado antes de pasar por el segundo disco.

$$V'_d = (1 - 2a)(1 - a')V_\infty \quad (2.28)$$

$$V'_w = (1 - 2a')(1 - 2a)V_\infty \quad (2.29)$$

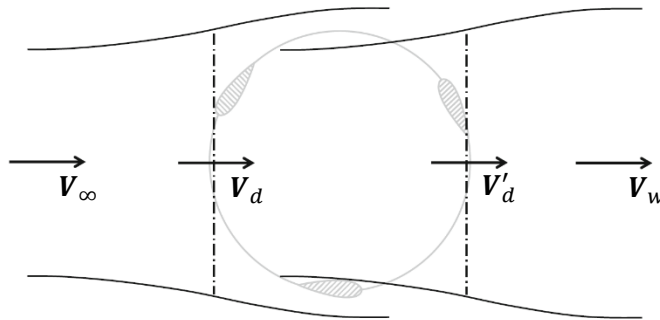


Figura 2.21. Esquema del modelo de tubo doble de corriente (D. De Tavernier et al., 2022).

Wilson y Lissaman (1974) mejoraron el modelo de un solo tubo de flujo descomponiendo el rotor en **tubos de corriente múltiples**, paralelos, adyacentes e independientes aerodinámicamente; como se muestra en la Figura 2.22. Las teorías de *momentum* y elemento de pala se aplican en cada tubo. La potencia y el par del rotor se evalúan promediando los valores de cada tubo. En este esquema, el flujo se considera no viscoso e incompresible para determinar la velocidad inducida. Sin embargo, inicialmente solo se consideraba la fuerza de sustentación en los cálculos.

Strickland (1975) introdujo una mejora al incorporar el arrastre aerodinámico en los cálculos, permitiendo una predicción más precisa del rendimiento general de rotores con baja carga. La principal diferencia entre los modelos de Wilson y Strickland radica en que el segundo considera explícitamente el impacto de las fuerzas de arrastre, mientras que el primero solo calcula la velocidad inducida usando la sustentación teórica.

El coeficiente de potencia para este modelo se calcula utilizando la Ecuación (2.30) (Mohammed et al., 2020):

$$C_P = \frac{\sum_1^{N_\theta} \left[\frac{B \cdot c}{2R} (TSR) \left(\frac{V_R}{V_\infty} \right)^2 (C_t) \right]}{N_\theta} \quad (2.30)$$

Donde N_θ representa el número de incrementos angulares $\Delta\theta$.

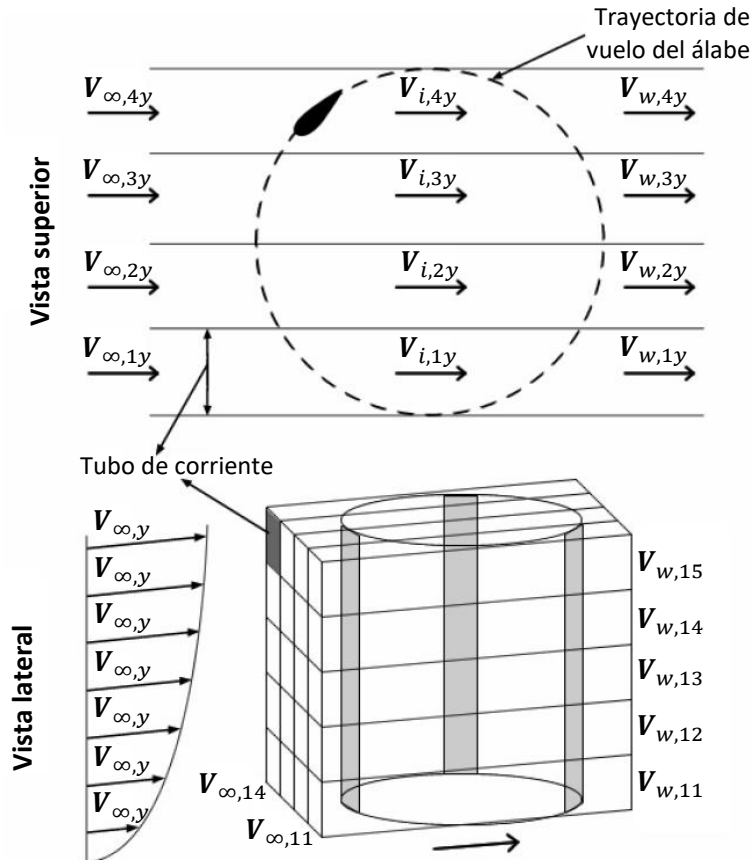


Figura 2.22. Esquema ilustrativo del modelo de tubos de corriente múltiples (Batista et al., 2013).

Aunque el modelo de tubos de corriente múltiples presenta ventajas significativas en comparación con el modelo de tubo único, también enfrenta diversas limitaciones. Con el objetivo de mejorar la precisión de los cálculos, Lapin (1975) propuso el concepto de discos actuadores dobles en tándem para turbinas Darrieus. Posteriormente, Paraschivoiu (1981) combinó los enfoques de tubos de corriente múltiples y dobles, desarrollando el denominado modelo de **tubo doble de corriente múltiple (DMST, por sus siglas en inglés de: Double Multiple Stream Tube)**, como se ilustra en la Figura 2.23. Este modelo permite predecir con mayor precisión el desempeño de las turbinas VAWT, mostrando una correlación más estrecha entre los resultados experimentales y teóricos (Islam et al., 2008).

El modelo DMST divide el área del rotor en un conjunto de tubos de corriente paralelos y adyacentes. Los cálculos se realizan de forma independiente para los hemisferios aguas arriba y aguas abajo, utilizando las teorías del elemento de pala y de conservación de momento para estimar las fuerzas aerodinámicas en los álabes. Esto implica una doble iteración para considerar los efectos de un segundo disco actuador en la región aguas abajo, representando un factor de inducción secundario. Este

enfoque mejora la precisión de las predicciones en comparación con el modelo de tubos múltiples original, ya que considera la interacción de la turbina con el flujo dos veces, como se observa en la Figura 2.23b.

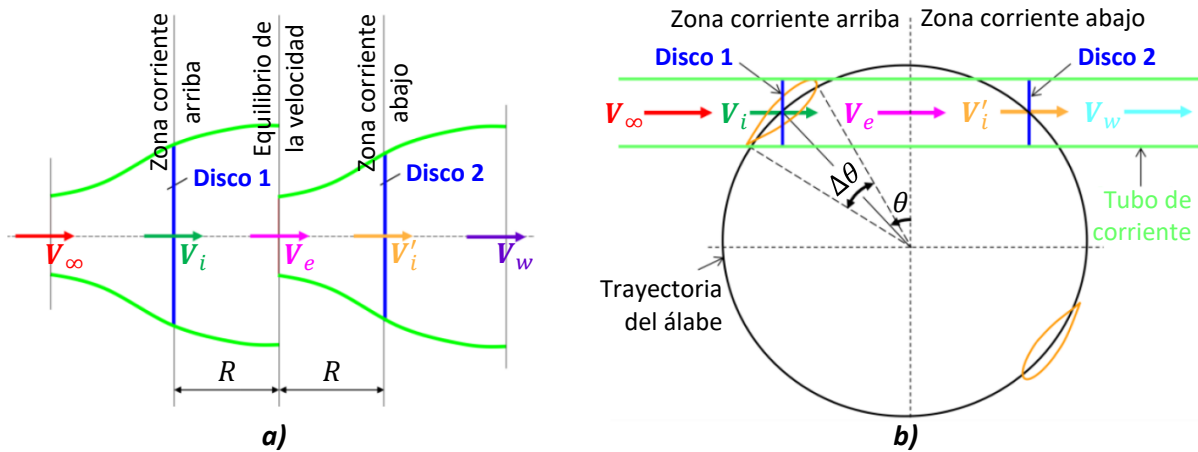


Figura 2.23. a) Esquema de discos actuadores en tándem; b) Representación esquemática del modelo DMST (Dabachi, Rahmouni, Rusu, et al., 2020).

Adicionalmente, el espacio ocupado por el rotor puede dividirse en varios tubos de corriente, de manera perpendicular a la dirección del flujo, como se muestra en la Figura 2.24.

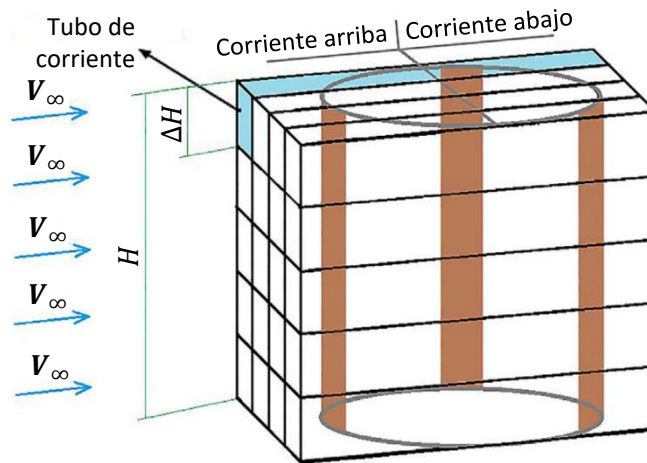


Figura 2.24. Representación de los tubos de corriente para la aeroturbina Darrieus tipo H en el modelo DMST (Moghimi & Motawej, 2020).

El perímetro del rotor se subdivide en $2N_{st}$ arcos de igual longitud (Figura 2.25), definidos por:

$$\Delta\theta = \frac{\pi}{N_{st}} \quad (2.31)$$

Donde N_{st} es el número total de tubos de corriente. Cada uno se delimita por un ángulo azimutal θ_{st} , que representa el punto medio de un arco del rotor, establecido entre los límites de los tubos de corriente $R(\theta_{st} \pm \Delta\theta/2)$. El área frontal de cada placa actuadora se calcula como:

$$A_{st} = \Delta H \cdot R \cdot \Delta\theta \cdot \text{sen } \theta_{st} \quad (2.32)$$

Aquí, ΔH es la longitud del elemento de pala en dirección de la envergadura, que se obtiene al dividir la altura total de la turbina (H) entre el número de divisiones verticales (N_H) (Figura 2.24).

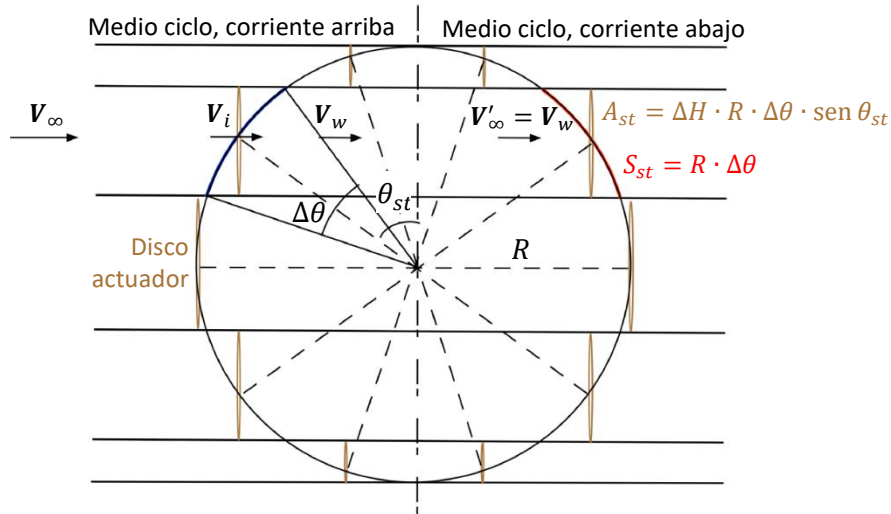


Figura 2.25. Configuración geométrica del modelo DMST con $N_{st} = 5$ (Ayati et al., 2019).

La fuerza de empuje instantánea (T_i), de una sola pala (cuando $\Delta H = H$), está definida por la ecuación en función de los coeficientes tangencial (C_t) y normal C_n (Beri & Yao, 2011). La **fuerza de empuje promediada en el tiempo** (T_{avg}) que ejerce un tubo de corriente por “B” álabes y dos veces por vuelta completa, está representada por:

$$T_{avg} = B \cdot T_i \cdot \frac{\Delta\theta}{\pi} \cdot 2 \quad (2.33)$$

Para el **coeficiente de empuje adimensional** (C_T), viene definido por:

$$C_T = \frac{T_{avg}}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 (H \cdot R \cdot \Delta\theta \cdot \text{sen } \theta)} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{B \cdot c}{2R} \right) \left(\frac{V_R}{V_\infty} \right)^2 \left(C_t \frac{\cos \theta}{\text{sen } \theta} - C_n \right) \quad (2.34)$$

El **momento de torsión instantáneo**, en una sola pala, está establecido por la ecuación definida en función del coeficiente tangencial. En consecuencia, el **par de torsión promedio** (Q_{avg}), en el rotor por “B” álabes, en una vuelta completa, puede definirse como:

$$Q_{avg} = B \cdot \sum_{i=1}^{2N_{st}} \left[\frac{\frac{1}{2} \rho \cdot V_R^2 \cdot (H \cdot c) \cdot C_t \cdot R}{2N_{st}} \right] \quad (2.35)$$

Los **coeficientes de par de torsión** (C_Q) y **de potencia** (C_P), están determinados como (Beri & Yao, 2011):

$$C_Q = \frac{Q_{avg}}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 (D \cdot H) \cdot R} = \left(\frac{N \cdot c}{D} \right) \sum_{i=1}^{2N_{st}} \left[\frac{\left(\frac{V_R}{V_\infty} \right)^2 \cdot C_t}{2N_{st}} \right] \quad (2.36)$$

$$C_P = C_Q \cdot TSR \quad (2.37)$$

Los coeficientes de par C_Q de la mitad aguas arriba y C'_Q de la mitad aguas abajo se combinan para obtener el coeficiente de potencia total C_P de la turbina.

2.7. Dinámica de Fluidos Computacional

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, acrónimo en inglés de: *Computational Fluid Dynamics*), es una disciplina dentro de la Mecánica de Fluidos que emplea computadoras y métodos numéricos para solucionar problemas relacionados con el movimiento de fluidos, así como otros fenómenos asociados (Fernández-Oro, 2012). Es un campo multidisciplinario ampliamente utilizado en diversas áreas de la ingeniería, tales como la mecánica, nuclear, química, eléctrica y civil. Además, la CFD tiene aplicaciones significativas en física, matemáticas, biología, medicina, nanotecnología y manufactura aditiva. Su naturaleza interdisciplinaria, representada en la Figura 2.26, implica que un mayor dominio de las materias asociadas por parte de los analistas de CFD no solo amplía su comprensión técnica, sino también mejora significativamente su proyección profesional (Rodríguez, 2019).

Los códigos para el análisis de la CFD se constituyen en tres elementos principales: *pre-procesador*, *solucionador* y *post-procesador*. La Figura 2.27 representa un esquema que ilustra la interacción que existe de los módulos para una exploración en la CFD.

El movimiento de los fluidos es una de las formas más complejas de movimiento natural. Las ecuaciones que gobiernan este fenómeno son altamente no lineales y la geometría compleja de la región de flujo dificulta obtener soluciones analíticas para la mayoría de los problemas en ciencia e ingeniería.

La turbulencia atmosférica tiene un impacto inherente en la operación de las aeroturbinas, ya que las fluctuaciones en el flujo afectan los álabes de las turbinas. Existen varias aproximaciones para modelar los flujos, como los modelos RANS (Reynolds–Averaged Navier–Stokes), LES (Large Eddy Simulation) y DES (Detached Eddy Simulation). El uso de modelos RANS, que proporcionan una descripción estadística del flujo, considera las variaciones turbulentas como fluctuaciones aleatorias alrededor de un valor promedio (Hu, 2018).

Las ecuaciones RANS se expresan como:

$$\rho \left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu \cdot S_{ij} - \rho \cdot \overline{u'_j \cdot u'_i}) \quad (2.38)$$

Donde los términos incluyen el flujo promedio y las fluctuaciones turbulentas. La conservación de la masa en un flujo promediado se describe mediante:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.39)$$

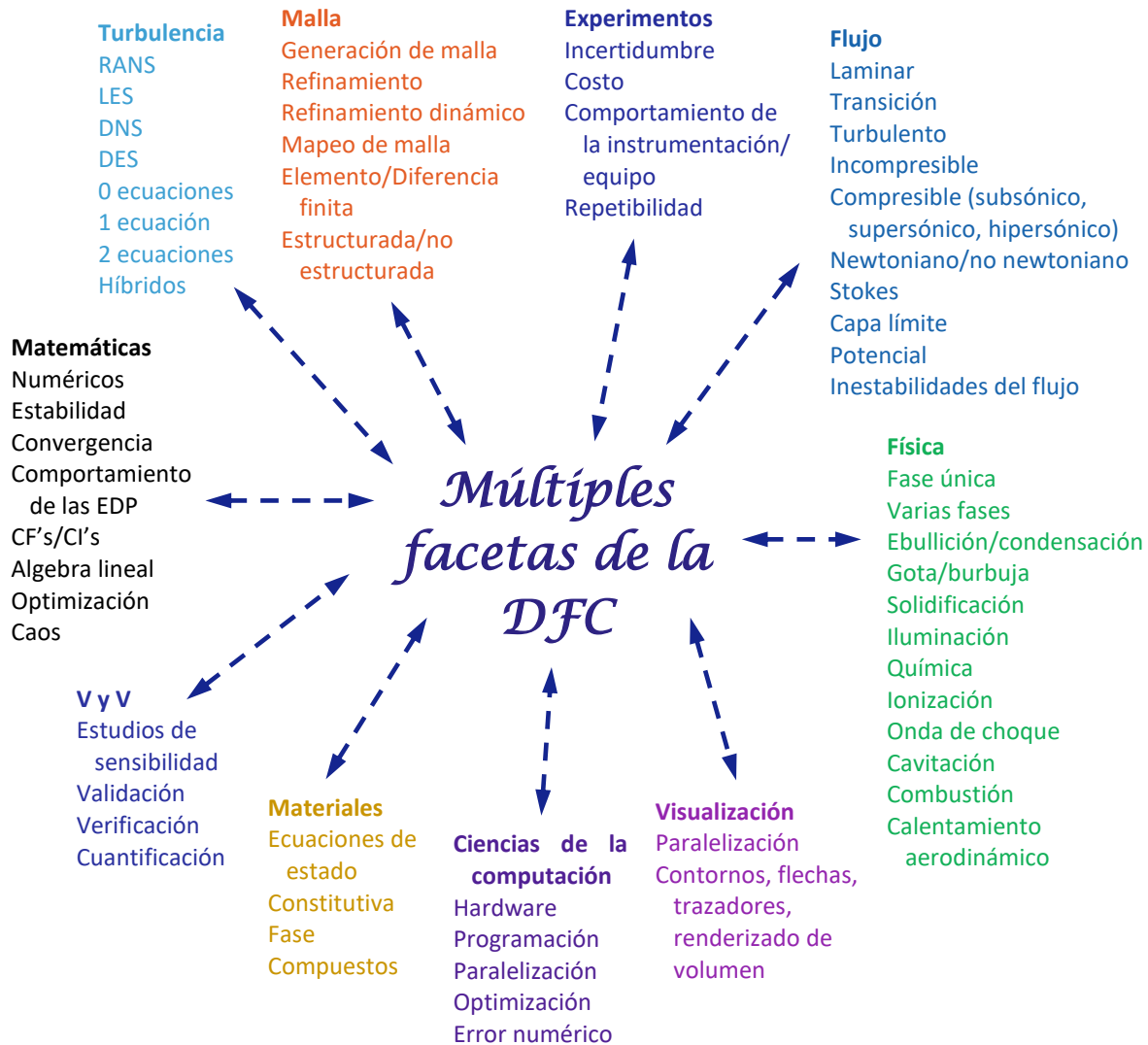


Figura 2.26. Alcance multidisciplinario de la CFD (Rodríguez, 2019).

Donde U_i es la velocidad promediada en el tiempo, u'_i es la velocidad fluctuante, μ es la viscosidad dinámica y S_{ij} es el tensor de deformación. Es importante notar que el término $\rho \cdot \overline{u'_j \cdot u'_i} = \rho \cdot \tau_{ij}$ se conoce como *tensor de esfuerzos de Reynolds*. Para modelar este término, se emplean dos enfoques principales: los *modelos de viscosidad turbulenta* y los *modelos de esfuerzos de Reynolds* (RSM, por sus siglas en inglés).

Los modelos RSM resuelven ecuaciones de transporte para términos individuales del esfuerzo de Reynolds y la tasa de disipación ($\bar{\epsilon}$) o la tasa de disipación específica (ω). Estos modelos son útiles para flujos turbulentos complejos, como flujos con curvatura pronunciada de las líneas de corriente (Hu, 2018).

En las ecuaciones RANS, existen 10 incógnitas: presión (1), componentes de velocidad (3) y componentes del tensor de esfuerzos de Reynolds (6). Sin embargo, solo se disponen de cuatro ecuaciones básicas, lo que hace necesario agregar ecuaciones adicionales para resolver las incógnitas. Para abordar esta limitación, se han desarrollado diferentes modelos de turbulencia, como los descritos por Sanderse et al. (2011), entre ellos:

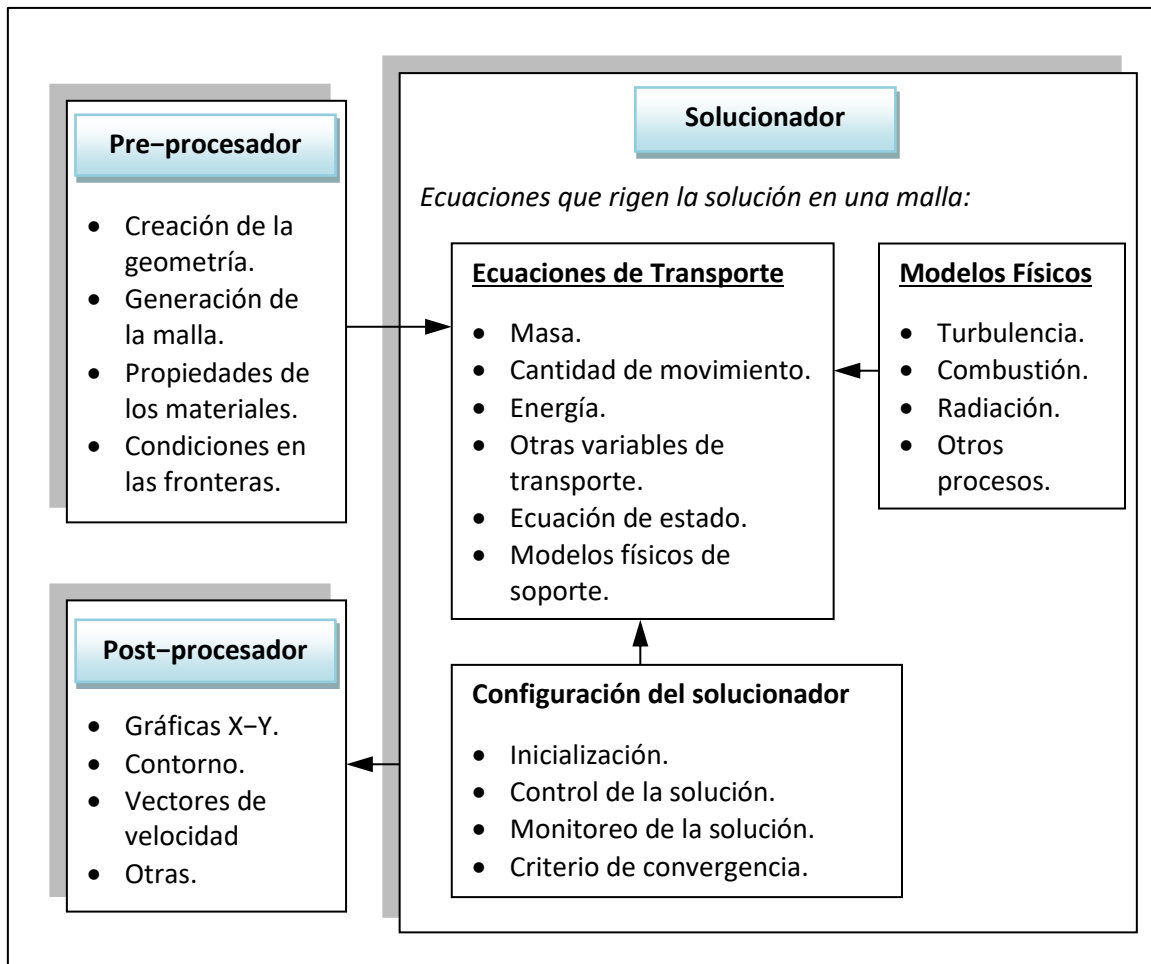


Figura 2.27. Funciones de interconectividad de los tres elementos principales dentro del esquema de análisis de la CFD (Tu et al., 2018).

1. **Una ecuación:** Como el modelo de Spalart-Allmaras, resuelven ecuaciones de transporte para la viscosidad turbulenta ($\mu = f(\tilde{\nu})$). Son menos sensibles en la proximidad de paredes y se usan principalmente en aplicaciones aerodinámicas con separaciones leves.
2. **Dos ecuaciones:** Incluyen los modelos $k - \varepsilon$ y $k - \omega$, que resuelven ecuaciones para dos cantidades turbulentas, la energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación turbulenta (ε). Aunque los modelos $k - \varepsilon$ tradicionales no son ideales para flujos con grandes gradientes de presión, las versiones mejoradas, como el modelo de grupo de renormalización ($k - \varepsilon$) y el modelo realizable ($k - \varepsilon$), ofrecen mejor desempeño. Los modelos $k - \omega$, especialmente el SST ($k - \omega$), son populares para análisis aerodinámicos tridimensionales y muestran fuertes correlaciones con resultados experimentales.

3. **Modelos híbridos:** Como la simulación de remolinos grandes desacoplados (DES), combinan la precisión de LES en regiones de separación con la eficiencia de RANS en capas límite. Estos modelos son útiles para abordar flujos altamente transitorios y desprendimientos de vórtices.

Cada modelo tiene aplicaciones específicas y limitaciones. Los modelos de una ecuación son ideales para problemas simples, pero carecen de precisión en flujos complejos. Los modelos de dos ecuaciones proporcionan un buen equilibrio entre precisión y costo computacional, mientras que los híbridos como DES destacan en flujos complejos y transitorios, aunque son computacionalmente más costosos (Hu, 2018).

El uso de la Dinámica de Fluidos Computacional ha proporcionado resultados relevantes en ingeniería. Se han desarrollado numerosos softwares comerciales y de código abierto, como FLUENT, CFX, STAR-CCM+, NUMECA, TAU, SU2 y OpenFOAM. Además, los avances en gráficos por computadora han permitido el desarrollo de herramientas para el preprocesamiento y posprocesamiento en simulaciones de CFD, como GRAPHER, ICEM-CFD y POINTWISE.

El método CFD es ampliamente aplicable y considerablemente adaptable. Permite resolver problemas complejos con geometrías intrincadas, condiciones de frontera desafiantes, múltiples incógnitas y flujos no lineales. Comparado con los experimentos físicos, CFD es relativamente económico y ofrece flexibilidad y controlabilidad elevados. Asimismo, puede generar datos de manera exhaustiva, lo que facilita un análisis integral de los problemas. Sus aplicaciones se extienden a industrias como la aeroespacial, transporte, construcción naval, meteorología, oceanografía, hidráulica y petroquímica (T. Wang et al., 2023a). También se espera que continúe desempeñando un papel importante en la academia y la industria.

2.8. Capa límite

La Figura 2.28 presenta una placa plana en un flujo que se acerca con velocidad uniforme V_∞ . Cuando el flujo toca la placa en su borde de ataque, un punto de estancamiento S se crea. Debido a la condición de no deslizamiento, el fluido tiene velocidad cero en la superficie sólida. Dado que la velocidad del flujo va de cero a su valor de la corriente libre V_∞ sobre un espesor muy pequeño en la región de estancamiento, la placa experimenta el esfuerzo cortante más alto en esta área. A partir del punto de estancamiento, como se señala en la Figura 2.28, una capa límite laminar comienza a crecer en la superficie de la placa en dirección del flujo. El efecto de la viscosidad está colindado dentro de la frontera laminar con distribuciones de alto esfuerzo cortante y vorticidad (máximo en la pared y cero en el borde de la capa límite). Puede notarse que incluso para un flujo turbulento de corriente libre, la capa límite que se forma en el punto de estancamiento es laminar (por ejemplo, la visualizada en la superficie de succión de un perfil aerodinámico (Sultanian, 2016).

A partir de cierta distancia en la dirección x , la **capa límite laminar** se convierte en una **capa límite turbulenta**, la cual se divide en cuatro regiones principales (Çengel et al., 2021):

1. **Subcapa viscosa:** Es una región muy estrecha junto a la pared donde los efectos viscosos predominan. En esta zona, el perfil de velocidad es casi lineal y el flujo presenta líneas de corriente prácticamente paralelas.
2. **Capa de amortiguamiento:** Adyacente a la subcapa viscosa, en esta región los efectos turbulentos comienzan a manifestarse, aunque los efectos viscosos siguen siendo predominantes.

3. **Capa de traslape:** En esta zona, los efectos turbulentos se vuelven más importantes, aunque aún no son totalmente dominantes.
4. **Capa turbulenta externa:** Es la región donde los efectos turbulentos, caóticos y aleatorios superan completamente a los efectos viscosos, definiendo el comportamiento del flujo.

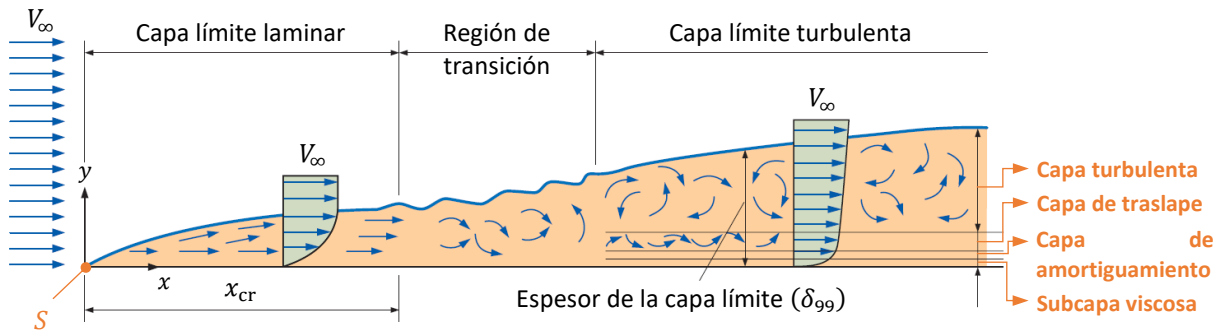


Figura 2.28. Expansión de la capa límite externa en una placa plana, adyacente a la superficie (Çengel et al., 2021).

El **grosor de la capa límite** (δ_{99}) se describe como la distancia y desde la superficie de una pared hasta donde la velocidad del flujo alcanza el 99% de la velocidad de la corriente libre ($V = 0.99V_{\infty}$). El flujo se separa en dos regiones (Çengel et al., 2021):

1. **Capa límite:** Zona donde predominan los efectos viscosos, y las variaciones en la velocidad son significativas debido a la proximidad a la superficie.
2. **Flujo irrotacional:** Región donde la fricción es prácticamente nula y la velocidad permanece sin variación.

2.8.1. Número de Reynolds para placas planas

La magnitud del esfuerzo cortante que desarrolla un fluido en la superficie de una placa depende del tipo de flujo dentro de la capa límite, por lo que es importante encontrar la ubicación de x_{cr} , donde el flujo laminar comienza a producir turbulencias. El número de Reynolds puede aplicarse para hacer esto, ya que tanto la inercia como las fuerzas viscosas juegan un papel relevante en la formación de la capa límite. En el caso de flujo sobre una placa plana, el número de Reynolds puede establecerse con base a la **longitud característica "x"**, determinada por la distancia corriente abajo desde el frente de la placa (como referencia, el punto de estancamiento, Figura 2.28 (Hibbeler, 2021)). Por consiguiente:

$$Re_x = \frac{V_{\infty} \cdot x}{\nu} = \frac{\rho \cdot V_{\infty} \cdot x}{\mu} \quad (2.40)$$

A partir de pruebas experimentales, el flujo laminar comienza a desordenarse aproximadamente a $Re_x = 1 \times 10^5$ (flujo en transición), pero puede ser tan alto como $Re_x = 3 \times 10^6$ (flujo turbulento). El valor específico cuando esto sucede es significativamente sensible a la rugosidad de la superficie de la placa, la uniformidad del flujo y cualquier cambio de temperatura o presión que ocurra a lo largo de la superficie de la placa (Hibbeler, 2021). La magnitud del número de Reynolds crítico usualmente utilizado es (Çengel et al., 2021):

$$Re_{x,cr} = \frac{V_{\infty} \cdot x}{\nu} = 5 \times 10^5 \quad (2.41)$$

2.8.2. Coeficiente de fricción

El coeficiente de fricción para el flujo laminar sobre una placa plana puede calcularse de manera teórica mediante la resolución numérica de las ecuaciones de conservación de masa y la cantidad de movimiento. Sin embargo, en el caso de flujo turbulento, debe obtenerse experimentalmente y relacionarse a través de correlaciones empíricas (Çengel & Cimbala, 2018).

En la práctica, el interés principal suele centrarse en la fuerza de arrastre ejercida sobre la superficie de la placa, la cual puede calcularse utilizando el coeficiente de fricción promedio. No obstante, en ciertas aplicaciones, es importante analizar la fuerza de arrastre en posiciones específicas de la superficie. Para estos casos, resulta necesario determinar el valor local del coeficiente de fricción, identificado mediante el subíndice x . Con esta perspectiva, se dispone de correlaciones que permiten calcular tanto el coeficiente de fricción local como el promedio para una placa plana, bajo condiciones de flujo laminar, turbulento o combinado (Çengel & Cimbala, 2018) Una vez que se han obtenido los valores locales a lo largo de la superficie, el coeficiente de fricción promedio para la placa puede obtenerse mediante la integración de:

$$C_f = \frac{1}{L} \int_0^L C_{f,x} dx \quad (2.42)$$

Con base a lo anterior, el espesor de la capa límite y el coeficiente de fricción local en la posición x específica para el flujo laminar sobre una placa pueden calcularse mediante:

$$\delta_{99} = \frac{4.91x}{Re_x^{1/2}} \quad C_{f,x} = \frac{0.664}{Re_x^{1/2}} \quad (Re_x = 5 \times 10^5) \quad (2.43)$$

Y para flujo turbulento están indicadas por:

$$\delta_{99} = \frac{0.38x}{Re_x^{1/5}} \quad C_{f,x} = \frac{0.059}{Re_x^{1/5}} \quad (5 \times 10^5 < Re_x < 1 \times 10^7) \quad (2.44)$$

El coeficiente de fricción promedio para toda la placa se obtiene mediante la integración de las expresiones locales para el espesor de la capa límite y el coeficiente de fricción local. Este cálculo se realiza sustituyendo las Ecuaciones (2.43) y (2.44) en la Ecuación (2.42) y llevando a cabo las integraciones correspondientes, que dan como resultado las siguientes relaciones:

$$\text{Laminar:} \quad C_f = \frac{1.33}{Re_L^{1/2}} \quad (Re_x < 5 \times 10^5) \quad (2.45)$$

$$\text{Turbulento:} \quad C_f = \frac{0.74}{Re_L^{1/5}} \quad (5 \times 10^5 < Re_x < 1 \times 10^7) \quad (2.46)$$

2.9. Tratamientos cerca de la pared en la CFD

En las proximidades de una pared sólida, los efectos viscosos predominan en una región delgada conocida como capa límite. En condiciones de flujo turbulento completamente desarrollado, esta capa

límite se subdivide en tres regiones principales: la *subcapa viscosa*, la *región logarítmica* y la *capa exterior*. Las dos primeras conforman la denominada *región interior* de la capa límite, donde los efectos viscosos son más relevantes.

Para distinguir entre las diferentes subcapas de la capa límite, se emplea el parámetro adimensional y^+ , el cual se expresa como:

$$y^+ = \frac{\rho \cdot u_\tau \cdot y}{\mu} \quad (2.47)$$

Donde u_τ es la llamada **velocidad de fricción**, que se calcula de la siguiente ecuación:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.48)$$

Siendo τ_w el esfuerzo cortante en la pared. La velocidad de fricción se utiliza para adimensionalizar la velocidad del flujo, dando lugar al parámetro u^+ , dado por:

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (2.49)$$

La **subcapa viscosa** es una región extremadamente delgada de la capa límite, definida por la condición $y^+ < 5$. Dentro de esta subcapa, se asume que el esfuerzo cortante permanece sin cambios y equivalente al valor en la pared, como se muestra en la Figura 2.29. Aquí, los efectos viscosos dominan sobre los efectos inerciales, lo que da lugar un comportamiento predominantemente laminar. En esta región, se obedece la relación:

$$\tau(y) = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \cong \tau_w \quad (2.50)$$

Integrando las expresiones y considerando las Ecuaciones (2.47) a (2.49), se deduce de manera directa que se cumple la relación:

$$u^+ = y^+ \quad (2.51)$$

En flujo laminar, no ocurre una transición hacia el régimen turbulento, por lo que sólo se considera la existencia de la subcapa viscosa.

La **subcapa logarítmica** se extiende en el rango aproximado de $30 < y^+ < 300$. En el extremo inferior de esta región, existe una transición difusa entre la subcapa viscosa y la logarítmica, conocida como **capa de amortiguamiento**, donde los esfuerzos cortantes viscosos y los esfuerzos de Reynolds tienen magnitudes comparables. Para establecer un límite más definido entre estas regiones, es común adoptar un valor intermedio $y^+ = 11.225$ (aunque en algunos caos se aplica 11.63), tal como se ilustra la Figura 2.29. Este valor también corresponde al punto de intersección entre la **ley lineal** de la subcapa viscosa, definida por $u^+ = y^+$, y la **ley logarítmica**, que describe el comportamiento de la velocidad en la subcapa logarítmica y se expresa con la siguiente relación:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad (2.52)$$

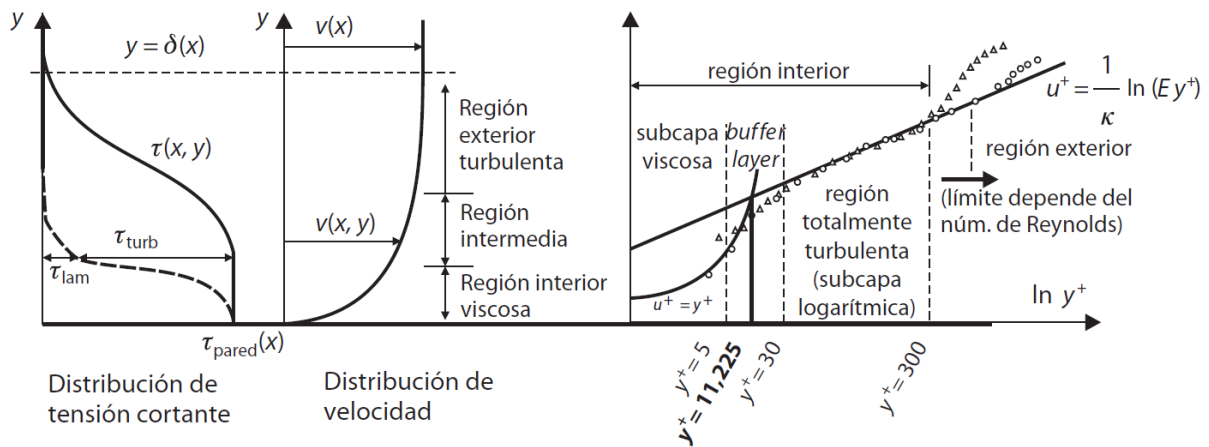


Figura 2.29. Diferentes regiones en la capa límite utilizados en la CFD (Fernández-Oro, 2012).

Donde $\kappa = 0.41$ y $E = 9.793$ son las constantes de von Kármán, aplicables a flujos turbulentos sobre superficies lisas bajo condiciones de números de Reynolds elevados. En la subcapa logarítmica, los esfuerzos de Reynolds dominan sobre los esfuerzos viscosos, marcando la transición hacia un régimen turbulento más establecido.

Por otro lado, la **capa externa**, se extiende para valores de $y^+ > 300$ o, en algunos casos, $y^+ > 500$. Esta región corresponde típicamente abarca desde aproximadamente el 20% de la total de la capa límite hasta el borde externo de la misma. En esta zona, los efectos turbulentos son completamente predominantes, y las interacciones viscosas son despreciables.

2.9.1. Cálculo de y en función de y^+ deseado

La distribución espacial de los nodos computacionales debe tenerse muy en cuenta que la ubicación de y^+ es transcendental, particularmente debido a los diferentes comportamientos dentro del flujo turbulento. Esto es relevante si se desean cálculos precisos de arrastre y sustentación, así como resultados precisos para superficies que involucran un esfuerzo de pared demarcado, remolinos, superficies giratorias, turbomáquinas, transferencia de calor, etc. (Rodríguez, 2019).

Debido a que son varias ecuaciones en este proceso y es importante mostrar que se usan n ecuaciones independientes para resolver n variables desconocidas, por comodidad, la Tabla 2.4 enumera las ecuaciones y las incógnitas necesarias para determinar y en función del valor deseado de y^+ .

Según las características del flujo, es decisión propia, a priori, el valor de y^+ que se desea para poder calcular y . Algunas son las siguientes (Rodríguez, 2019):

- $y^+ = 0.05$ para el primer nodo computacional en el cálculo para DNS en flujo del canal a $Re = 3\ 300$.
- $y^+ = 1$ para el primer nodo computacional. Esta guía es recomendada por Fluent y generalmente se usa en la mayoría de los modelos RANS y LES.
- $y^+ = 5$ para el primer nodo computacional si el modelo $k - \omega$ se emplea.

- $y^+ = 7$ para reconocer dónde termina la capa de amortiguamiento.
- $y^+ = 30$ para determinar dónde termina la capa de amortiguación.
- Máximo y^+ (o de interés) para asegurarse de que se aplica correctamente la ecuación de capa.

Tabla 2.4. Pasos para seguir en el cálculo de y para una y^+ dada.

	Ecuación	Incógnita	
1	$Re_x = \frac{V_\infty \cdot x}{\nu}$	Re_x	(2.53)
2	$C_{f,x} = \frac{0.664}{Re_x^{1/2}}$ (laminar)	C_f	(2.54)
	$C_{f,x} = \frac{0.059}{Re_x^{1/5}}$ (turbulento)		
3	$\tau_w = C_f \frac{\rho \cdot v_\infty^2}{2}$	τ_{pared}	(2.55)
4	$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$	u_τ	(2.56)
5	$y = \frac{y^+ \cdot \nu}{u_\tau}$	y	(2.57)

Fuente: Rodríguez (2019).

Con respecto al procedimiento para establecer las *capas de resolución (inflation layers)* en la discretización cerca de la pared dentro de la aplicación de mallado, se recomienda consultar el Anexo A.3. En esta sección, se presentan las estrategias y consideraciones para la configuración apropiada de esta región de la malla, permitiendo una captura adecuada de los efectos de la capa límite y mejorando la precisión en la modelación del flujo aerodinámico.

2.9.2. Consideraciones para el mallado en regiones cercanas a la pared

Puesto que el uso de funciones de pared es relacionar las variables de flujo con el primer punto de la malla computacional, eliminando así el requisito de resolver la estructura en el medio, el límite inferior de y^+ en este punto debe colocarse con cuidado para que no caiga en la subcapa viscosa. En tal caso, la malla debe disponerse de modo que los valores de y^+ en todos los puntos de integración adyacentes a la pared se consideren solo ligeramente por encima del límite recomendado, comúnmente entre 20 y 30. Esto ofrece la mejor oportunidad para resolver la parte turbulenta de la capa límite. Además de verificar el límite inferior de y^+ , es importante que el límite superior de y^+ también se investigue durante el cálculo computacional. Por ejemplo, un flujo con un número de Reynolds moderado tiene una capa límite que se extiende hasta y^+ entre 300 y 500. Si el primer punto de integración se coloca en un valor de $y^+ = 100$, entonces esto ciertamente producirá una solución deteriorada debido a una resolución insuficiente para la región. La resolución adecuada de la capa límite generalmente requiere al menos de 8 a 10 puntos nodales de malla en la capa, y se recomienda realizar un análisis posterior de la solución CFD para determinar si se logra el grado de resolución o si el cálculo del flujo se realiza posteriormente con una malla más fina. Esto se puede lograr trazando la relación entre la difusión

turbulenta y la difusión molecular (debido a la viscosidad molecular) que es generalmente alta dentro de la capa límite (Tu et al., 2018).

2.9.3. Estrategias de mallado en regiones cercanas a la pared para modelos de turbulencia con número de Reynolds bajo

Un comportamiento universal cerca de la pared en un rango práctico de y^+ puede no ser viable en todas partes en un flujo como el hallado en flujos con número de Reynolds bajo. En tales circunstancias, el concepto de función de pared se rompe y su uso dará lugar a errores importantes. La alternativa es resolver completamente el flujo a través de la pared, lo que se puede lograr mediante modelos de turbulencia de bajo número de Reynolds, pero debe tenerse en cuenta que el costo de la solución es alrededor de un orden de magnitud mayor que cuando se utilizan funciones de pared porque de los puntos nodales de malla adicionales. Con la intención de resolver la subcapa viscosa dentro de la capa límite turbulenta, y^+ en el primer nodo adyacente a la pared debe establecerse preferiblemente cerca de la unidad (es decir, $y^+ = 1$). Sin embargo, un y^+ más alto es aceptable siempre que esté bien dentro de la *subcapa viscosa* ($y^+ = 4$ o 5). Dependiendo del número de Reynolds, debe asegurarse de que haya entre 5 y 10 puntos nodales de malla entre la pared y la ubicación donde y^+ es igual a 20 que se encuentra dentro de la región cercana a la pared afectada por la viscosidad para resolver la velocidad media y cantidades turbulentas. Lo más probable es que esto dé como resultado entre 30 y 60 puntos nodales de cuadrícula dentro de la capa límite para lograr una resolución adecuada de la capa límite (Tu et al., 2018).

2.10. Rosa de vientos

La valoración del recurso eólico que estima su intensidad en un sitio planificado que determina la producción de energía anual más alta para el diseño de las turbinas son muy importantes en su instalación. El resultado de la evaluación del recurso eólico son las condiciones del viento y la producción anual de energía en un terreno.

La estimación del recurso eólico en un lugar proyectado es delicada en términos de la instalación de aerogeneradores para que operen de manera eficaz y determina la producción de energía anual más alta para el diseño de las aeroturbinas. El resultado de la evaluación del recurso eólico son las condiciones del viento y la producción de energía anual en un terreno determinado. Para valorar el potencial del sitio, de preferencia debe ubicarse una estación meteorológica correctamente en el sitio donde los parámetros de viento propios de la ubicación puedan medirse como representativo de todo el sitio o, en su defecto, conseguir los datos de alguna página web técnica confiable para que en el momento de utilizar las sufras no haya una subestimación del verdadero potencial de energía eólico del área de estudio. Los principales parámetros de medición son la velocidad del viento, la dirección del flujo, la temperatura, la humedad relativa y la presión barométrica. Después de recopilar las cifras, el procesamiento se lleva a cabo mediante el uso de software adecuado (por ejemplo: WRPLOT, WindPRO, WAsP, etc.). Estas guías son muy importantes para determinar la viabilidad del proyecto.

Debido a que la dirección del viento es un elemento importante en la ubicación de un aerogenerador y si la mayor parte de la energía aprovechable del viento proviene de una determinada orientación, es importante evitar cualquier obstrucción del flujo. La trayectoria del viento predominante facilita una guía para el diseño de una turbina eólica. La correlación entre la dirección y la intensidad del viento es importante: si sopla el 70% del tiempo suavemente desde el suroeste, pero el 30% con fuerza desde el noroeste, entonces, a pesar de la prevalencia de los vientos del suroeste, el número de sistemas de

conversión de la energía eólica deberían estar alineados para una mejor captura con los vientos del noroeste (Jaffe & Taylor, 2018).

Para garantizar el uso más eficaz de un aerogenerador, debe estar desplegado al viento con mayor potencial energético. La rosa de vientos es una gráfica circular polar generada a partir del análisis de la evaluación del recurso eólico. Es un método para describir la orientación y velocidad del viento registradas en un sitio en particular, e indica la frecuencia de incidencia y el porcentaje de tiempo que el viento sopla en ciertos rangos de velocidad en una dirección, o sector, dado. Usualmente, los datos se subdividen aún más para mostrar la probabilidad en función de la dirección y la velocidad, representados por segmentos de bandas en diferentes colores. La gráfica se divide en 8, 12, 16 (N, NNE, NE, etc.) o hasta 36 porciones y cada circunferencia concéntrica representa la frecuencia, iniciando desde cero en el centro y acrecentándose en cada anillo exterior. La longitud de cada radio alrededor de los aros está relacionada con la frecuencia del viento que sopla desde una dirección en especial por unidad de tiempo (Earnest & Rachel, 2019).

Por ejemplo, en la Figura 2.30, para cada dirección de la brújula, la longitud de la cuña señala la probabilidad de que el viento provenga en una dirección específica con la velocidad indicada por el color. Entonces, el viento en el sitio de interés en promedio sopla del oeste (W) 21% del tiempo y en esa dirección (W) con velocidades entre 6 m/s a 8 m/s suceden alrededor del 6%. La suma de la información en una rosa de vientos en todas las direcciones brinda una estimación aproximada de la distribución de frecuencia de la velocidad del viento.

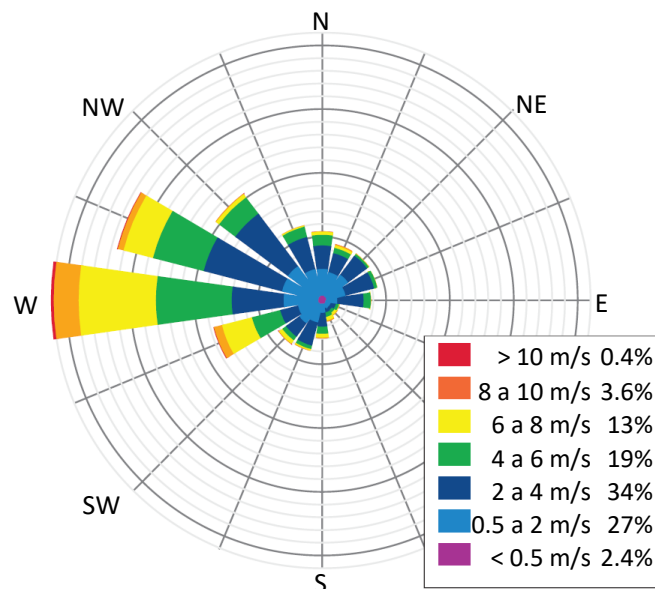


Figura 2.30. Representación de la gráfica de una rosa de vientos para un sitio elegido. Los círculos concéntricos representan incrementos del 5% de probabilidad de que el viento provenga cierta dirección con la velocidad en un intervalo específico (Jaffe & Taylor, 2018).

Además, existen variantes de la rosa de vientos indicando otro tipo de información más específica para la zona de interés, que pueden ser las que se aprecian en la Figura 2.31 y se especifican a continuación (Rao, 2019):

1. El porcentaje de tiempo en el cual viene el viento desde un rumbo en especial.

2. El producto de este porcentaje y la velocidad media del viento en una dirección da la intensidad promedio de los espectros del viento.
3. Multiplicar este porcentaje por el cubo de la velocidad del viento permite estimar la energía disponible en diferentes direcciones.

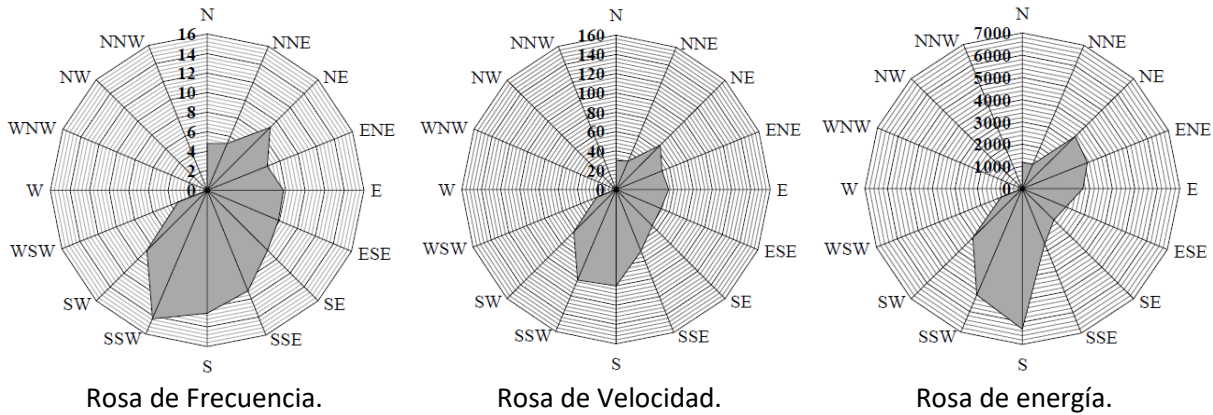


Figura 2.31. Rosas de viento que muestran las distribuciones de frecuencia, velocidad y energía en diferentes direcciones (Rao, 2019).

2.11. Sistemas biomiméticos

La *biomimética* proviene del término griego *biomimesis*, que significa "imitar la biología, la naturaleza o los organismos vivos" (en inglés, se conoce como *biomimetics* o *biomimicry*) (Bhushan, 2018). El término *biomimetics* fue introducido por Otto Schmitt en 1957, durante su investigación doctoral, donde diseñó un dispositivo físico que asemejaba la acción eléctrica de un nervio. Otra palabra relativa que se utiliza para este concepto es "*biónica*", introducida por Jack Steele en 1960, que combina las palabras biología, tecnología y electrónica. Se interpreta como la creación de productos, dispositivos y procesos por medio del uso de materiales y procesos que se encuentran en la naturaleza. Recientemente, la biónica se conoce como la combinación de la robótica y el reemplazo o mejora de materia viva, tejidos, partes del cuerpo y órganos. Otra palabra utilizada es "*biognosis*", que se refiere a la investigación científica de la vida.

En su forma más básica, la biomimética consiste en el diseño y desarrollo de materiales, estructuras y sistemas inspirados en las características y procesos presentes en organismos y sistemas biológicos. El concepto de biomimética surge de la comprensión de que los microbios, las plantas y los animales han evolucionado continuamente para hacer frente a los retos ambientales y de otro tipo. Los desafíos de diseño asociados con la visión, movimiento en diversos entornos, control de la temperatura y la detección de depredadores y/o presas ya se han resuelto de innumerables formas a lo largo de millones de años de evolución, lo que brinda grandes oportunidades para el desarrollo de materiales biomiméticos y bioinspirados. La diversidad de formas y funciones de los seres vivos es tal que han desarrollado soluciones para la mayoría de los desafíos que enfrentan los seres humanos en la actualidad. ¡Solo hay que buscar esas soluciones! (Primrose, 2020).

El campo de la biomimética es altamente multidisciplinario, como se muestra en la Figura 2.32. Integra el análisis de funciones, estructuras y principios biológicos de diversos elementos del entorno, realizado por biólogos, físicos, químicos y científicos de materiales. En el ámbito de la ingeniería, la biomimética ha demostrado ser una fuente invaluable de innovación y transformado numerosos campos

tecnológicos. La capacidad de la biomimética para mejorar la eficiencia, reducir costos y minimizar el impacto ambiental ha llevado a su adopción en diversas industrias, incluyendo la aeroespacial, la robótica, la medicina y la energía renovable (Nasretdinova et al., 2021).

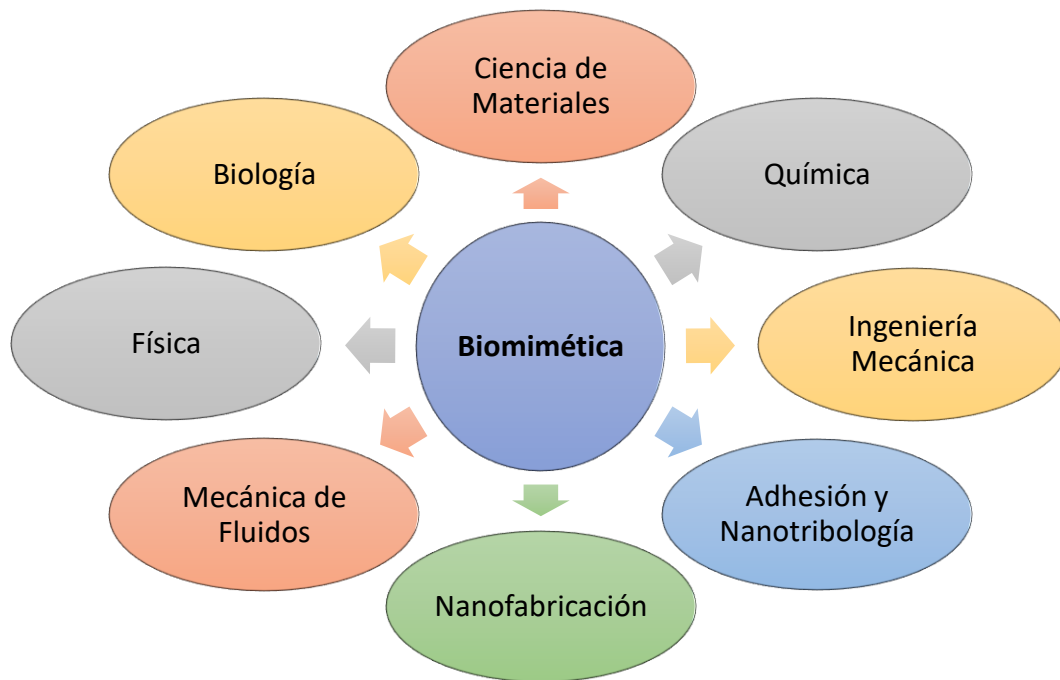


Figura 2.32. Áreas del conocimiento de las que se apoya la biomimética (Bhushan, 2018).

En tiempos recientes, la biomimética ha sido integrada en diversos campos de la ingeniería y la tecnología (Figura 2.33), demostrando su versatilidad y potencial innovador. En algunos ejemplos de su aplicación incluyen:

- El diseño del tren bala Shinkansen, en Japón, fue inspirado por la forma del pico del pájaro martín pescador. Este diseño redujo el ruido y aumentó la eficiencia aerodinámica, permitiendo que el tren viaje a altas velocidades sin causar explosiones sónicas al salir de los túneles (Linić et al., 2021).
- Los geckos son conocidos por su capacidad para adherirse a superficies verticales y lisas gracias a las estructuras microscópicas en sus patas. Estas estructuras están formadas por millones de pelos diminutos llamados "setae", que generan fuerzas de van der Waals permitiendo una adhesión reversible y fuerte. Los investigadores han replicado este mecanismo para desarrollar adhesivos reutilizables y altamente eficientes. Estos adhesivos tienen aplicaciones en robótica, electrónica y medicina (Sikdar et al., 2022).
- La tecnología de agujas inspiradas en el aguijón de las abejas y los mosquitos ha llevado al desarrollo de agujas hipodérmicas que causan menos dolor, mejorando la experiencia del paciente durante las inyecciones y extracciones de sangre. Estas agujas biomiméticas están diseñadas para minimizar la fuerza de inserción y reducir la deformación del tejido, emulando las características geométricas y dinámicas de los aguijones de insectos. Pueden reducir la fuerza de inserción en un 60% y la deformación del tejido en un 48% (Gidde et al., 2023).



Figura 2.33. Ejemplos encontrados en el medio ambiente estudiados por la biomimética (Bhushan, 2018).

- Las superficies autolimpiantes inspiradas en la hoja de loto han revolucionado múltiples campos, incluyendo la medicina y la construcción. La hoja de loto posee una superficie con estructuras microscópicas que repelen el agua y la suciedad, manteniéndose siempre limpia. Este principio ha sido adaptado para crear recubrimientos autolimpiantes para ventanas, paneles solares y dispositivos médicos, reduciendo la necesidad de limpieza y mantenimiento (Dalawai et al., 2020).
- La ventilación natural observada en los termiteros ha sido aplicada en el diseño de edificios modernos para mejorar la eficiencia energética. El Eastgate Centre, en Zimbabue, es un ejemplo emblemático de cómo la biomimética puede reducir significativamente los costos de climatización mediante un diseño inspirado en la estructura de los nidos de termitas (Wei et al., 2023).
- Los organismos bioluminiscentes, como las medusas y los hongos, han inspirado la creación de sistemas de iluminación eficientes y sostenibles. Estas tecnologías utilizan reacciones químicas similares a las observadas en la naturaleza para producir luz con un consumo de energía muy bajo, ofreciendo alternativas ecológicas a la iluminación convencional. Un ejemplo específico es el uso de bacterias luminescentes marinas para producir sistemas de iluminación vivos, que no requieren electricidad y generan una cantidad mínima de contaminación y emisiones de CO₂ (Jose et al., 2021).
- La estructura y el funcionamiento de las alas de aves rapaces, como las águilas, han influido en el desarrollo de perfiles que optimizan la aerodinámica y la eficiencia en el consumo de combustible. Estas alas, capaces de cambiar su forma en vuelo para adaptarse a diferentes condiciones aerodinámicas, que implementan cambios en su envergadura, curvatura y ángulo de ataque, permiten un control más preciso y eficiente sobre la maniobrabilidad y el rendimiento aerodinámico de la aeronave (Hoffmann et al., 2023).

La ballena jorobada (*Megaptera novaeangliae*) es reconocida como la más acrobática de su especie (Figura 2.34) debido a su capacidad para realizar giros con ángulos de ataque superiores a los 40°. Esta notable maniobrabilidad está directamente relacionada con su estrategia de alimentación. Estas ballenas consumen grandes cantidades de plancton, arenque y capelín, para lo cual requieren técnicas complejas que incluyen habilidades avanzadas de viraje, deslizamiento en el agua y buceo (González & Hinojosa, 2019). Un método particularmente efectivo empleado por las ballenas jorobadas es la alimentación por embestida, caracterizado por un estilo de nado a una velocidad aproximada de 2.6 m/s y ángulos de ataque que oscilan entre los 30° y 90°.

Otro método utilizado por las ballenas jorobadas se conoce como alimentación por burbujeo (Figura 2.35). Dada su lentitud, estas ballenas no pueden atrapar y consumir peces a través de un proceso de persecución directa. En su lugar, emplean una técnica única basada en la creación de burbujas. Al desplazarse siguiendo una trayectoria en espiral mientras generan burbujas de manera simultánea, una ballena jorobada (o un grupo de ellas) puede dirigir un banco de peces hacia la superficie del océano, donde lleva a cabo el ataque al banco (Alizadeh, 2022). El radio de giro juega un papel importante en la efectividad de esta técnica, ya que un radio más pequeño permite concentrar una mayor cantidad de presas dentro de la red de burbujas, aumentando potencialmente la eficiencia del método.



Figura 2.34. Ballena jorobada (Abate, 2019).

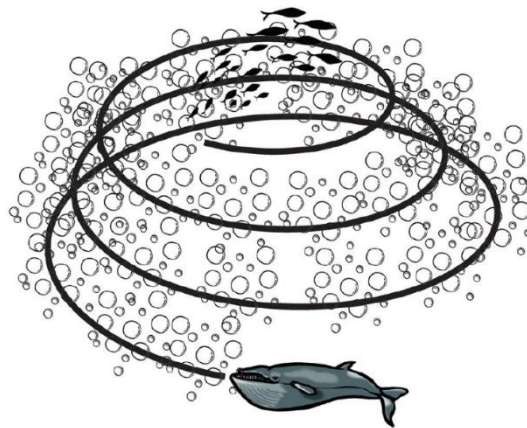


Figura 2.35. Técnica de alimentación mediante redes de burbujas de una ballena jorobada (Alizadeh, 2022).

Las protuberancias en las aletas de las ballenas jorobadas pueden interpretarse físicamente como generadores de vorticidad, lo que les permite transportar una mayor cantidad de energía entre las capas de fluido cercanas a las aletas. Este intercambio de energía favorece el desarrollo de una capa límite turbulenta, la cual es más resistente al flujo reverso en comparación con una capa límite laminar. Tal resistencia contribuye a retrasar la entrada en pérdida que experimentarían las aletas en ausencia de las protuberancias en el borde de ataque (van Nierop et al., 2008), lo que, a su vez, permite generar fuerzas aerodinámicas significativamente mayores.

La Figura 2.36 ilustra el concepto de tubérculos en las aletas dorsales de una ballena jorobada, proporcionando un modelo conceptual que podría servir como inspiración para el diseño de perfiles aerodinámicos mediante la aplicación de principios de biomimética.

El principio detrás de las protuberancias continúa siendo objeto de investigación. Sin embargo, estudios previos sugieren que estas funcionan como generadores de vórtices, al producir estructuras que

vuelven a energizar la capa límite, retrasando así la separación del flujo (Bolzon et al., 2016). El flujo entrante se desvía y acelera significativamente hacia los valles entre las protuberancias, donde se desarrollan vórtices que generan estructuras que giran en sentidos opuestos (Figura 2.37). Estos vórtices sustituyen el fluido de baja inercia por uno de mayor ímpetu, lo que produce un retraso en la separación del flujo.

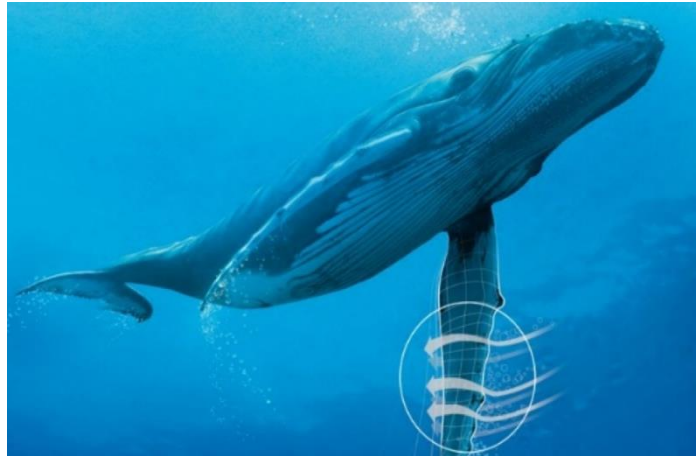


Figura 2.36. Tubérculos en las aletas dorsales de una ballena jorobada (González & Hinojosa, 2019).

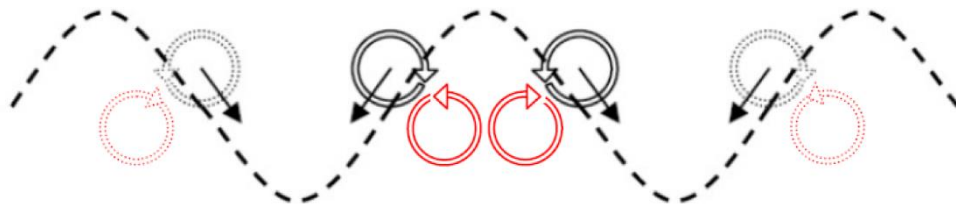


Figura 2.37. Representación esquemática de la migración de vórtices hacia los valles entre protuberancias (Abate, 2019).

Custodio (2012) planteó que el incremento en la sustentación, atribuido a la incorporación de protuberancias en los perfiles, está relacionado con la migración de los vórtices que rotan opuestamente hacia los valles, donde su fusión origina regiones de baja presión en la superficie de succión. En el régimen posterior a la entrada en pérdida, un aumento en el ángulo de ataque intensifica la generación de vórtices, lo que se traduce en una mejora de la fuerza de sustentación.



CAPÍTULO III.

METODOLOGÍA

“Permite que las cosas difíciles te hagan más duro”

Soichiro Honda

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

Los pasos aplicados en esta investigación se diseñaron para abordar los objetivos planteados en torno al análisis y modificación del desempeño aerodinámico de aeroturbinas de eje vertical Darrieus tipo H, mediante la implementación de principios biomiméticos en los perfiles aerodinámicos NACA-0018 (Figura 3.1). Este enfoque integra herramientas como simulaciones numéricas de dinámica de fluidos computacional (CFD) y el modelo de Tubo Doble de Corriente Múltiple (DMST), además de análisis estadísticos y probabilísticos basados en datos meteorológicos del área de estudio.

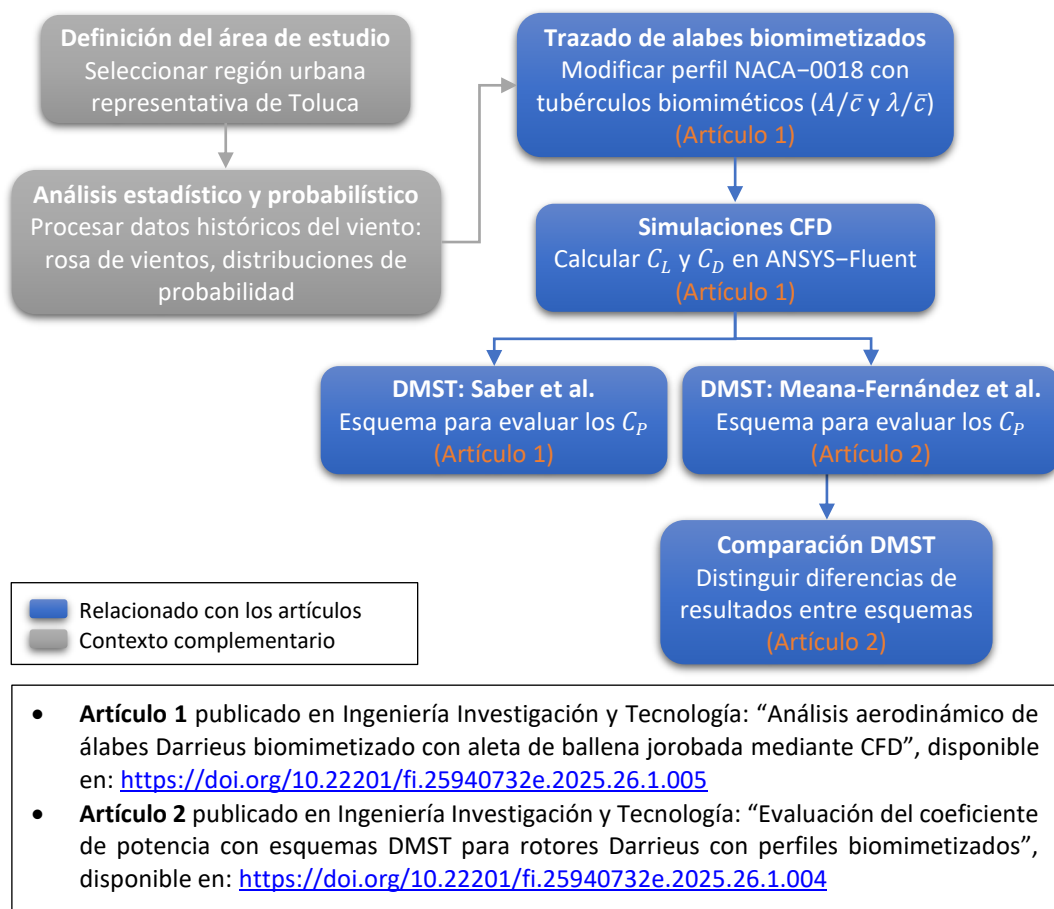


Figura 3.1. Diagrama de bloques empleada en el análisis de modificaciones biomiméticas en perfiles aerodinámicos NACA-0018 (elaboración propia).

La secuencia de cada etapa se representa en la Figura 3.1, donde se muestra las fases desde la definición del área de estudio hasta la comparación de resultados. Además, se indica la relación entre cada una y los artículos científicos publicados, destacando cómo cada investigación contribuye al desarrollo del estudio. En general, el *Artículo 1* aborda el diseño biomimético de los álabes, su evaluación mediante simulaciones numéricas de dinámica de fluidos computacional (CFD) y el cálculo de los coeficientes de potencia (C_p) para un método basados en el Tubo Doble de Corriente Múltiple (DMST); mientras que el *Artículo 2* amplía el análisis mediante la comparación de dos esquemas DMST. De esta manera, el estudio implementado permite un análisis integral de la adopción de la

biomimetización en los álabes del rotor en el desempeño aerodinámico de aeroturbinas de eje vertical tipo Darrieus rectas.

Las etapas principales del estudio se mencionan en las siguientes secciones.

3.1. Definición del área de estudio

Para evaluar el potencial eólico en un entorno representativo, se seleccionó la localidad de San Nicolás Tolentino, ubicada en el municipio de Toluca, Estado de México. Esta zona se encuentra en las proximidades del Aeropuerto Internacional de Toluca, aproximadamente en la latitud 19.35° y longitud -99.57° , como se representa en la Figura 3.2.

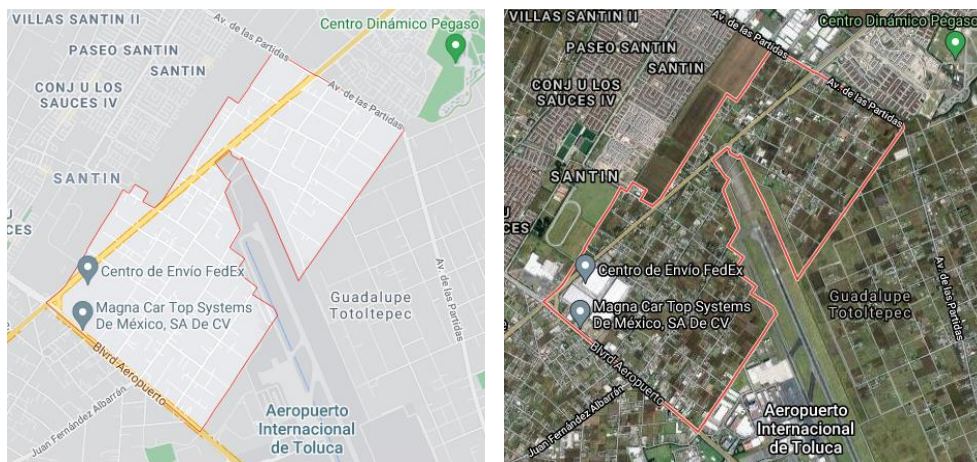


Figura 3.2. Ubicación de la zona de estudio en Google Maps, destinada al análisis de las características del viento para el desarrollo del prototipo de la aeroturbina (elaboración propia).

La elección de esta región se fundamenta en:

1. **Disponibilidad de datos meteorológicos confiables:** La zona cuenta con registros continuos de velocidad y dirección del viento desde 1985 hasta enero de 2021, obtenidos a una altura de 10 metros sobre el nivel del suelo, realizadas a partir de estimaciones mediante bases de datos meteorológicas globales, como las proporcionadas por la NASA a través de su sistema MERRA-2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2). Este sistema permite inferir características del viento a partir de parámetros atmosféricos como la presión, la temperatura, la humedad relativa y la estabilidad atmosférica, utilizando modelos numéricos avanzados de reanálisis. Los datos de la NASA son particularmente útiles cuando las mediciones directas son limitadas, ya que permiten modelar la velocidad del viento en distintas alturas mediante perfiles logarítmicos y ecuaciones de estratificación atmosférica. En combinación con los registros locales, estas herramientas permiten una caracterización más robusta del potencial eólico en la zona de estudio.
2. **Entorno urbano con baja interferencia estructural:** La zona no presenta obstáculos significativos, como edificios altos que puedan generar perturbaciones en el flujo de viento. Esto favorece condiciones más representativas para la instalación y evaluación de aerogeneradores de eje vertical.
3. **Viabilidad para la implementación de aerogeneradores de baja potencia:** La región seleccionada posee características adecuadas para el desarrollo de sistemas de generación

eólica descentralizada, proporcionando una alternativa viable para aplicaciones en áreas urbanas.

El análisis de esta área permitirá evaluar la adaptabilidad y eficiencia de los aerogeneradores de eje vertical tipo Darrieus en un contexto urbano real, considerando las condiciones de viento predominantes.

3.2. Análisis estadístico y probabilístico de los datos meteorológicos

El análisis estadístico y probabilístico de los datos meteorológicos del área de estudio es relevante para caracterizar el comportamiento del viento y determinar su viabilidad para la instalación de aerogeneradores de eje vertical. Para ello, se emplearon herramientas especializadas que permitieron procesar, visualizar y modelar la información elegida.

Para elaborar la *rosa de vientos*, se utilizó el software libre WRPLOT®, una herramienta sencilla y conveniente que permite representar la distribución direccional del viento en el área de estudio. Para su uso, los archivos con los parámetros de medición fueron adaptados al formato requerido por el software. La Figura 3.3a muestra la rosa de vientos generada, donde se observa que las corrientes de aire predominantes provienen del **norte (N)**, **nornoreste (NNE)** y **sursuroeste (SSW)**. Las magnitudes de velocidad más frecuentes oscilan entre **1 y 3 m/s**.

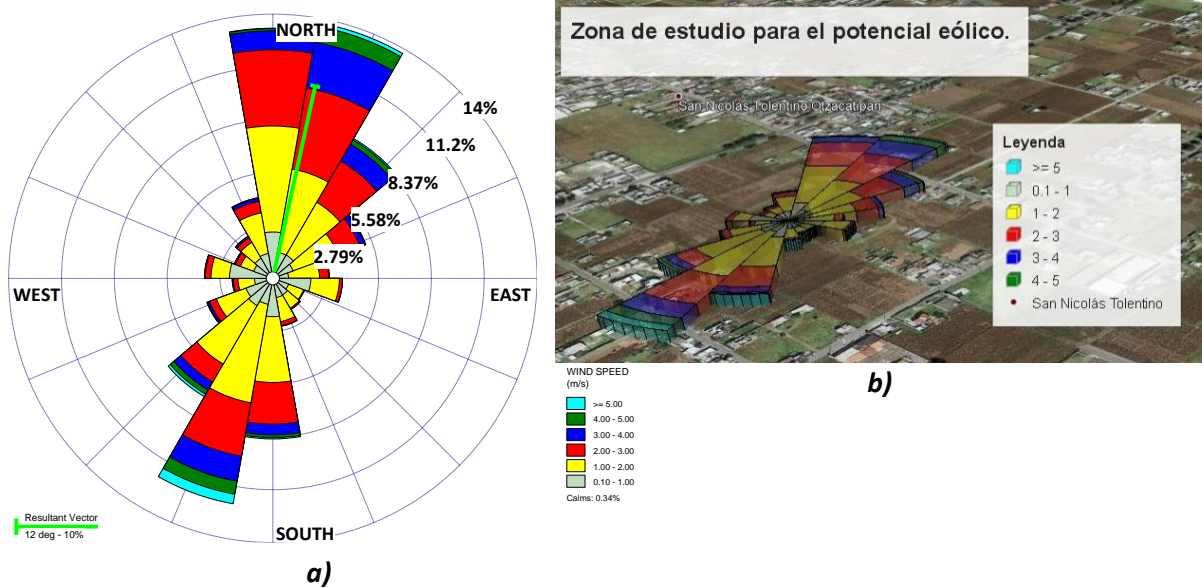


Figura 3.3. a) Rosa de vientos para la zona de estudio (elaborada en WRPLOT®); b) Visualización de la rosa de vientos en Google Earth® (elaboración propia).

Una característica destacada de WRPLOT® es su capacidad para integrar los datos en Google Earth®, lo que facilita la visualización geoespacial del comportamiento del viento en el sitio de estudio, como se muestra en la Figura 3.3b. Esto permite una planificación más precisa de la evaluación de posibles restricciones ambientales.

Antes de realizar el análisis estadístico, fue necesario filtrar los datos de velocidad del viento para excluir valores de 0 m/s, que no aportan al potencial eólico, y eliminar valores atípicos derivados de

posibles errores de medición en la estación meteorológica. Posteriormente, se determinó el rango de velocidades del viento en la zona de estudio, obteniéndose los siguientes valores:

- Velocidad mínima: 0.1 m/s
- Velocidad máxima: 8.63713 m/s

Para facilitar la representación gráfica de la distribución de velocidades, se estableció un total de 22 intervalos para el análisis. El incremento de cada rango se calculó mediante la ecuación:

$$\text{Incremento} = \frac{\text{Valor máximo} - \text{Valor mínimo}}{\text{Número de intervalos}} = \frac{8.63713 - 0.1}{22} = 0.3880 \approx 0.4 \quad (3.1)$$

Para evitar valores con múltiples cifras decimales en los extremos de los intervalos, se redondeó el incremento a 0.4 m/s. A partir de esta división, se construyó un histograma de frecuencias absolutas, que permite visualizar la distribución de los datos medidos, como se representa en la Figura 3.4.

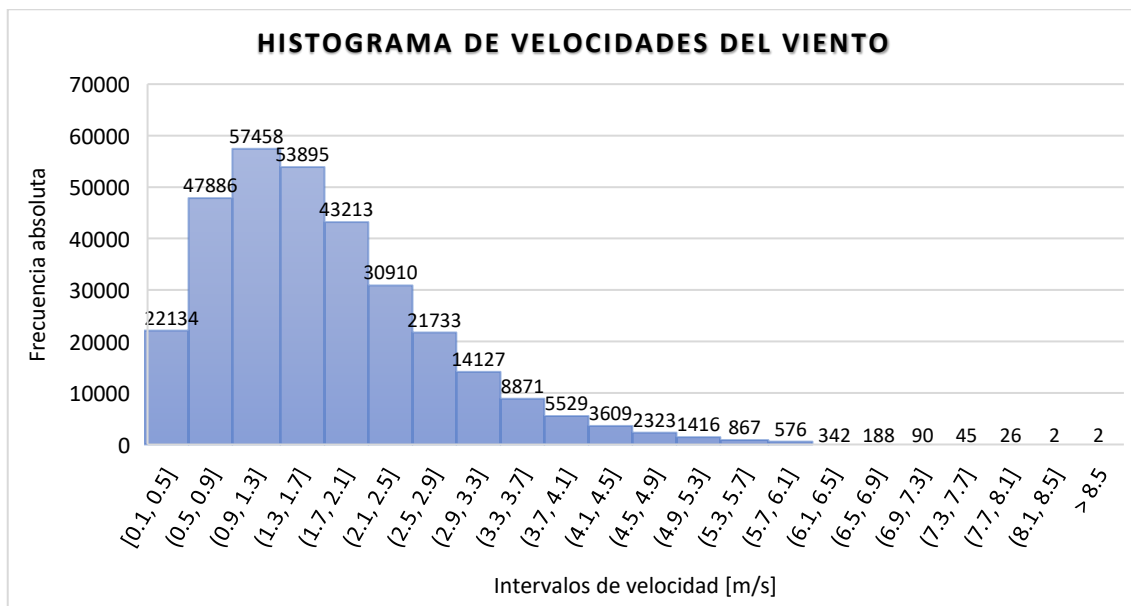


Figura 3.4. Histograma para los datos de la velocidad del viento en San Nicolas Tolentino (elaboración propia).

Con los datos procesados, se procedió a modelar la distribución de las velocidades del viento mediante funciones de densidad de probabilidad (PDFs). Para ello, se empleó Matlab®, una herramienta potente para el análisis estadístico y modelado probabilístico. Su versatilidad permite ajustar los datos a diferentes distribuciones y evaluar su precisión a través de indicadores estadísticos.

En la Tabla 3.1, se presentan los valores de la velocidad promedio, raíz del error cuadrático medio (RMSE), logaritmo de verosimilitud (log-likelihood) y la densidad de potencia eólica derivada de las funciones de densidad de probabilidad (PDFs).

Tras un análisis comparativo de los ajustes estadísticos, se determinó que las distribuciones que mejor representan los datos del viento son la Weibull y la Gamma. Sin embargo, se observó que ambas tienden a sobrestimar el potencial eólico en la región de estudio. Debido a que la distribución Gamma

presenta un menor error en la estimación de la densidad de potencia eólica, se consideró como la más adecuada para representar la variabilidad del viento en San Nicolás Tolentino.

Tabla 3.1. Indicadores de ajuste para distintas PDF's de la zona de estudio.

Parámetro	Datos	Rayleigh	Normal	Weibull	Gamma	Lognormal
Velocidad media [m/s]	1.6905	1.7537	1.6905	1.6946	1.6905	1.7523
RMSE	-	0.0565	0.0691	0.0315	0.0329	0.0409
Logaritmo de verosimilitud		-425 641	-456 240	-419 125	-417 176	-432 503
Densidad de potencia [W/m ²] $\left(\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho \cdot V^3 \cdot f\right)$	4.3790	4.7390	4.6994	5.0356	4.9403	7.5022

Fuente: Elaboración propia.

Para una descripción de los conceptos clave sobre variables continuas aleatorias, las funciones de distribución de probabilidad empleadas y el proceso efectuado en Matlab® para el análisis de los datos de velocidad del viento en el área de estudio, se recomienda consultar los Anexos A.4, A.5 y A.6; donde se explican estos aspectos y su aplicación en el presente trabajo.

3.3. Diseño biomimético de los álabes

La configuración geométrica de los álabes modificados se estableció en la implementación de protuberancias cosenoidales en el borde de ataque de los perfiles aerodinámicos, inspiradas en los tubérculos presentes en las aletas dorsales de la ballena jorobada. Para el presente estudio, se seleccionó el perfil aerodinámico NACA-0018 como base para la biomimetización. Este perfil es ampliamente utilizado en aerogeneradores de eje vertical tipo Darrieus debido a su simetría, estabilidad estructural y capacidad de operar en condiciones de flujo turbulento con ángulos de ataque variables.

La elección de este perfil responde a los siguientes criterios:

- Su aplicación en rotores tripala rectos tipo Darrieus, característicos por operar en entornos urbanos y semiurbanos.
- Su rendimiento aerodinámico aceptable en un amplio rango de *TSR*.
- Su viabilidad para ser modificado mediante técnicas biomiméticas sin comprometer su integridad estructural.

Las modificaciones en el borde de ataque del álabe se efectuaron mediante la incorporación de protuberancias cosenoidales, cuya geometría fue definida a partir de dos parámetros clave:

1. **Amplitud de las protuberancias (A/\bar{c}):** Se expresa como un porcentaje de la cuerda promedio (\bar{c}) del perfil y representa la altura máxima de las ondulaciones en el borde de ataque, medida a partir de la línea media donde se ubica la cuerda promedio (álabe sin modificar).

2. **Longitud de onda (λ/\bar{c}):** Se define como la distancia entre dos picos consecutivos de las ondulaciones.

La Ecuación (3.2) fue implementada a la geometría de las protuberancias cosenoidales en el álabe, relacionada con la siguiente expresión:

$$c(z) = \bar{c} - A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} z\right) \quad (3.2)$$

Donde $c(z)$ representa la desviación de la curvatura en el borde de ataque, \bar{c} la cuerda promedio o la del perfil sin modificar, A es la amplitud de la protuberancia, λ es la longitud de onda y z es la posición a lo largo de la cuerda del perfil (dirección de la envergadura o altura del álabe).

La modelación de los perfiles aerodinámicos modificados se realizó mediante la aplicación CAD (SpaceClaim) dentro de ANSYS-Fluent. Se crearon nueve combinaciones geométricas, variando los parámetros de A/\bar{c} (0.05, 0.1 y 0.2) y λ/\bar{c} (1, 2 y 4). Para un análisis más detallado del proceso y las configuraciones evaluadas, se puede consultar en Marín-Aguilar et al. (2025a).

3.4. Simulación numérica mediante CFD

El análisis aerodinámico de los perfiles se llevó a cabo mediante simulaciones numéricas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) utilizando el software ANSYS-Fluent. Esto permitió evaluar la influencia de los tubérculos en el desempeño de los álabes, examinando los coeficientes de sustentación (C_L) y arrastre (C_D), en función del ángulo de ataque (α).

El procedimiento seguido en esta etapa se basó en la metodología descrita en Marín-Aguilar et al. (2025a), donde se detallan las estrategias de simulación, los parámetros físicos empleados y la configuración del solucionador numérico para capturar con precisión los efectos aerodinámicos de las modificaciones biomiméticas. Asimismo, en dicho estudio se analizan las diferencias en los coeficientes aerodinámicos entre los perfiles modificados y el álabe liso, proporcionando una evaluación comparativa del desempeño de las geometrías propuestas.

Para información adicional sobre las condiciones en las fronteras de entrada y salida, en particular en lo referente a la intensidad de la turbulencia y la relación de viscosidad turbulenta, se recomienda consultar el Anexo A.7, donde se detallan estos aspectos.

3.5. Aplicación del modelo DMST

Para evaluar el desempeño global del rotor tripala tipo Darrieus recto, se implementó el modelo de Tubo Doble de Corriente Múltiple (DMST, por sus siglas en inglés), el cual permite estimar los coeficientes de potencia (C_p) de la turbina eólica en función de la relación de velocidad en la punta (TSR). Este modelo es ampliamente utilizado en la simulación de aeroturbinas de eje vertical, ya que ofrece un balance entre precisión y recursos computacionales, al modelar el comportamiento aerodinámico del rotor bajo un enfoque semiempírico. Para este estudio, se emplearon dos variantes del modelo DMST, con el propósito de comparar sus predicciones y evaluar sus diferencias en la estimación del rendimiento aerodinámico del rotor biomimetizado.

El primer método, propuesto por Saber et al. (2018), se caracteriza por un ajuste más detallado del factor de inducción axial (a), el cual se obtiene mediante un proceso iterativo intensivo para su validación. Este esquema proporciona estimaciones más conservadoras, pero también más precisas del C_p , lo que permite una evaluación minuciosa del efecto de los tubérculos en los álabes. Este método fue adoptado en el primer artículo (Marín-Aguilar et al., 2025a) para comparar diferentes configuraciones de parámetros de las protuberancias y determinar su influencia en la eficiencia de la turbina eólica.

El segundo método, basado en el esquema de Meana-Fernández et al. (2018), introduce una formulación simplificada del DMST, donde el factor de inducción axial (u) se ajusta de manera menos rigurosa, lo que permite obtener estimaciones más rápidas del C_p . Este esquema fue incorporado en el segundo artículo (Marín-Aguilar et al., 2025b) y se comparó con los resultados obtenidos mediante el esquema de Saber et al. (2018), con el fin de identificar las diferencias en la predicción de los C_p en función de la TSR de las aeroturbinas.

Los hallazgos obtenidos en esta etapa permitieron validar la superposición de las protuberancias cosenoidales en el diseño de los álabes del rotor de eje vertical, sirviendo como base para mejorar la eficiencia aerodinámica del sistema.

3.6. Comparación de los modelos DMST

Para evaluar la precisión y uso de los métodos DMST en la estimación de los C_p , se realizó una comparación entre los esquemas propuestos por Saber et al. (2018) y Meana-Fernández et al. (2018). Este análisis permitió determinar el efecto de cada modelo en la predicción de la eficiencia aerodinámica del rotor tripala tipo Darrieus recto biomimetizado y su sensibilidad ante variaciones geométricas en los álabes.

La comparación entre ambos métodos se realizó a través de las siguientes etapas:

1. Cálculo de los C_p para cada configuración geométrica de los perfiles empleando ambos modelos DMST.
2. Análisis de la variación de los C_p con respecto de la TSR , identificando discrepancias en las predicciones de cada modelo.
3. Evaluación de la sensibilidad de los modelos ante cambios geométricos, considerando variaciones en la amplitud (A/\bar{c}) y la longitud de onda (λ/\bar{c}) de las protuberancias cosenoidales.

Los modelos fueron examinados con base en los siguientes criterios:

- **Precisión en la estimación del C_p :** Se identificaron diferencias en las predicciones de ambos métodos en ciertas condiciones de la TSR .
- **Impacto de la TSR en la dispersión de los resultados:** Se analizó cómo la TSR afecta la fiabilidad de cada método en la estimación del C_p .

Los hallazgos de este análisis se presentan con mayor detalle en Marín-Aguilar et al. (2025b), donde se discuten las diferencias en el rendimiento aerodinámico según el modelo DMST empleado.



CAPÍTULO IV.

RESULTADOS

“Hay cualidades que conducen al éxito:
Coraje, la capacidad de soñar y perseverar”

Soichiro Honda

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Este capítulo presenta y analiza los resultados obtenidos en la investigación, destacando su relevancia en el avance del conocimiento en el campo de la energía eólica. En particular, se examina el efecto de la biomimetización en los álabes del rotor tipo Darrieus recto de eje vertical, evaluando su desempeño aerodinámico mediante simulaciones numéricas y modelos analíticos. Los análisis y comparaciones realizados han sido estructurados cuidadosamente para responder a los objetivos establecidos en esta tesis, permitiendo una valoración del efecto de las modificaciones geométricas en la eficiencia del rotor.

Como parte del compromiso con la comunidad científica, los hallazgos de este estudio han sido publicados en una revista indexada y revisadas por pares, asegurando la validez, fiabilidad y relevancia de los resultados en el ámbito académico y tecnológico. En este capítulo, se establece la relación entre los resultados obtenidos y las publicaciones científicas derivadas del proyecto, destacando cómo cada contribución ha sido fundamental para alcanzar los objetivos propuestos y ampliar el conocimiento en diseño aerodinámico y mejora de turbinas eólicas de eje vertical.

4.1. Revista Ingeniería Investigación y Tecnología (Artículo 1)

- **Título:** Análisis aerodinámico de álabes Darrieus biomimetizado con aleta de ballena jorobada mediante CFD.
- **Resumen:** La inserción de tubérculos en el borde de ataque de un perfil NACA-0018, inspirándose en la anatomía de las aletas dorsales de la ballena jorobada, se realizó mediante la adaptación de un perfil cosenoidal. Para ello, se ajustaron la amplitud y el período respecto a la cuerda promedio del perfil, como parte de una estrategia pasiva para el control del flujo. Con el fin de estimar el comportamiento aerodinámico de los perfiles modificados, se realizaron simulaciones numéricas. Posteriormente, se comparó su rendimiento para implementarlos en un rotor tripala para un aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus tripala recto (también conocido como tipo H). Los álabes propuestos fueron analizados mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD) con un enfoque basado en las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el esquema de Reynolds (RANS, por sus siglas en inglés). Las gráficas de los coeficientes de arrastre y sustentación en función del ángulo de ataque revelaron que la presencia de los tubérculos influye en el rendimiento de los perfiles, especialmente el coeficiente de arrastre. Al examinar los coeficientes de potencia con el esquema denominado «Tubo Doble de Corriente Múltiple (DMST)», se identificó una variación del coeficiente de potencia en la aeroturbina para los casos analizados para distintos valores de la relación de velocidad en la punta (*TSR*). Se presentó un incremento en la eficiencia entre 5.42 % y 9.57 % (propuesta destacada), mientras que existió una disminución cercana a 40 % (propuesta desfavorable) en comparación con el rotor con álabes sin modificar. En consecuencia, la incorporación de los tubérculos puede ser una estrategia viable para mejorar el desempeño aerodinámico del aerogenerador.
- **Estado:** Publicado.
- **DOI:** <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2025.26.1.005>

4.2. Revista Ingeniería Investigación y Tecnología (Artículo 2)

- **Título:** Evaluación del coeficiente de potencia con esquemas DMST para rotores Darrieus con perfiles biomimetizados.
- **Resumen:** La eficiencia aerodinámica de los aerogeneradores de eje vertical, especialmente del tipo Darrieus, es transcendente para maximizar su rendimiento energético. Este estudio evalúa perfiles aerodinámicos NACA-0018 orientado en la implementación de protuberancias biomimetizadas en el borde de ataque, inspiradas en las aletas dorsales de la ballena jorobada, conocidas por sus maniobras hidrodinámicas destacadas. Se recurrió a dos metodologías basadas en la teoría del Tubo Doble de Corriente Múltiple (DMST, por sus siglas en inglés). Se examinó y comparó el desempeño para rotores tripala rectos (tipo H). Se modificó el perfil aerodinámico con una función cosenoidal en el borde frontal y se realizaron simulaciones numéricas con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para determinar los coeficientes de arrastre y sustentación de los álabes individuales. Posteriormente, se aplicó la teoría del DMST para estimar los coeficientes de potencia (C_p) y evaluar la eficiencia del rotor. Los resultados mostraron variaciones en los C_p al emplear los dos esquemas DMST, destacándose diferencias apreciables en las gráficas $C_p - TSR$. Un método simplifica el modelado del flujo y ajusta el factor de inducción axial de manera menos rigurosa, resultando en estimaciones mayores del C_p . El otro método ofrece estimaciones más conservadoras y probablemente más precisas debido a una determinación más exhaustiva del factor de inducción axial. Aunque ambas metodologías presentan un patrón de comportamiento coherente en general, se identificaron diferencias sutiles cuando el TSR supera el 0.75, haciéndose notables cuando el TSR sobrepasa 1.75 con variaciones que alcanzan y superan 18%. Estos hallazgos fomentan el avance en la comprensión y aplicación práctica de los métodos DMST en la aerodinámica de aeroturbinas, proporcionando conocimientos valiosos para futuras investigaciones y desarrollos en este campo.
- **Estado:** Publicado.
- **DOI:** <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2025.26.1.004>

4.3. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en este estudio aportan información interesante derivada de la biomimetización en el desempeño de una turbina eólica de eje vertical Darrieus tipo H. Por medio del análisis de los coeficientes aerodinámicos (C_L y C_D), el cálculo de los coeficientes de potencia (C_p) y la comparación de modelos DMST; fue posible determinar cómo las modificaciones geométricas afectan la eficiencia del rotor.

El análisis numérico mediante CFD y DMST permitió identificar configuraciones que maximizan o penalizan el rendimiento de la turbina. En particular, se observó que ciertas combinaciones de amplitud (A/\bar{c}) y la longitud de onda (λ/\bar{c}) en los perfiles contribuyen a reducir el coeficiente de arrastre (C_D) y mejorar el coeficiente de sustentación (C_L), lo que se traduce en una mayor eficiencia en la conversión de energía eólica.

Asimismo, la comparación entre los modelos de Saber et al. (2018) y Meana-Fernández et al. (2018) reveló diferencias en la estimación del C_p , especialmente en valores elevados de la TSR . Estas divergencias destacan la importancia de elegir el método de valoración adecuado según las condiciones de operación del aerogenerador, avalando así predicciones más realistas del rendimiento del rotor.

Los coeficientes aerodinámicos son indicadores fundamentales que describen la eficiencia de un perfil aerodinámico. Mientras que el C_D mide la resistencia del perfil al flujo de aire, el C_L cuantifica la fuerza perpendicular generada. La evolución de estos coeficientes en función del ángulo de ataque (α) permite distinguir configuraciones geométricas que modifican el desempeño del rotor.

Los resultados de las simulaciones muestran que los perfiles biomimetizados pueden ofrecer ventajas aerodinámicas en ciertos intervalos de ángulo de ataque. Específicamente, los álabes modificados tienden a reducir el arrastre y mantener o mejorar la sustentación en comparación con el perfil convencional, lo que resulta benéfico para la aeroturbina, ya que experimenta una amplia gama de ángulos de ataque durante su rotación.

La reducción del C_D observada en los álabes biomimetizados implica una menor resistencia aerodinámica, lo que puede traducirse en mayor eficiencia energética y menor desgaste de los componentes mecánicos del aerogenerador. El mantenimiento o incremento del C_L garantiza que los álabes biomimetizados generen suficiente sustentación para mantener la rotación del rotor, incluso en condiciones de viento turbulento.

Las diferencias en magnitud de los coeficientes aerodinámicos, aunque pequeñas, tienen un impacto técnico relevante. Estas variaciones pueden traducirse en incrementos de potencia de decenas o incluso centenas de watts, dependiendo del tamaño del aerogenerador y del número de unidades instaladas en una zona.

Es importante destacar que las simulaciones numéricas fueron realizadas bajo condiciones controladas, diseñadas para replicar lo más fielmente posible las condiciones reales de operación de los álabes. No obstante, factores ambientales y características específicas del sitio de instalación pueden influir en el rendimiento real de los perfiles modificados. Por ello, se recomienda la realización de pruebas experimentales complementarias que permitan validar los resultados obtenidos en las simulaciones y garantizar la viabilidad de la implementación de estos diseños en aplicaciones reales.

El coeficiente de potencia (C_p) es un parámetro clave en el análisis del desempeño de una turbina eólica, ya que representa la eficiencia en la conversión de la energía cinética del viento en energía mecánica útil. Los resultados obtenidos indican que la geometría de los tubérculos en el borde de ataque influye en el rendimiento del rotor. Al analizar las diferentes combinaciones A/\bar{c} y λ/\bar{c} , se identificaron patrones que determinan la eficiencia del sistema:

- Las configuraciones con $A/\bar{c} = 0.2$ y $\lambda/\bar{c} = 2$ y $A/\bar{c} = 0.2$ y $\lambda/\bar{c} = 4$ mostraron el mejor desempeño en comparación con el rotor con perfiles estándar. Esto supone que una combinación de mayor amplitud y longitud de onda mejorará la captación de energía, aunque con un límite donde los beneficios pueden disminuir.
- La combinación $A/\bar{c} = 0.1$ y $\lambda/\bar{c} = 1$ presentó una reducción del C_p para $TSR > 1$, lo que revela que ciertos diseños pueden generar efectos adversos si no se escogen adecuadamente los parámetros geométricos.

Para valorar la precisión y manejo de los métodos DMST, se compararon los modelos propuestos por Saber et al. (2018) y Meana-Fernández et al. (2018). Los resultados exhibieron diferencias sutiles en los C_p , las cuales se incrementan con el aumento de la TSR . Las observaciones generales fueron las siguientes:

- Para TSR bajas (< 0.75), ambos modelos predicen valores del C_p similares, con una variación menor al 2%, tomando como referencia el esquema de Saber et al. (2018).
- En el intervalo de $0.75 < TSR < 1.5$, el modelo de y Meana-Fernández et al. (2018) presentó valores mayores del C_p entre un 2% y 10% respecto al modelo de Saber et al. (2018), lo que apunta hacia una revisión más detallada del factor de inducción axial.
- Para TSR elevadas (> 1.5), la diferencia entre ambos modelos se amplificó hasta alcanzar una divergencia del 87.5%.

En términos generales, esta comparación subraya la relevancia de elegir el método de evaluación adecuado según el régimen de operación de la turbina y la precisión requerida en la obtención C_p .

Los hallazgos obtenidos en este estudio tienen implicaciones directas en el diseño de turbinas eólicas de eje vertical tipo Darrieus recto, demostrando que la incorporación de modificaciones biomiméticas en los perfiles aerodinámicos puede aumentar la eficiencia y productividad del rotor, haciendo que estas turbinas sean más competitivas y viables para aplicaciones en entornos urbanos y residenciales.

De los resultados, manifiestan que la eficiencia de la turbina eólica es sensible a la elección de la geometría de las protuberancias, lo que advierte que un análisis más extensivo a mayores velocidades del viento podría identificar configuraciones aún más eficientes. Sin embargo, el presente estudio se centró en evaluar el efecto de las modificaciones geométricas basadas en tubérculos de la aleta de la ballena jorobada para velocidades de viento bajas, característico de gran parte del territorio mexicano.

Es importante continuar investigando y ver otras combinaciones de arreglos geométricos en los álabes para asegurar que los beneficios observados en las simulaciones se traduzcan en mejoras reales en el rendimiento. Pruebas experimentales adicionales y análisis en condiciones de operación más diversas serán esenciales para validar estos hallazgos y desarrollar diseños de aeroturbinas más eficientes y adaptables.



CONCLUSIONES

“El éxito representa el 1% de tu trabajo que es resultado del 99% de eso que es llamado fracaso”

Soichiro Honda

CONCLUSIONES

El análisis numérico realizado en ANSYS–Fluent permitió obtener las gráficas de los coeficientes de sustentación y arrastre de cada perfil aerodinámico considerado, cuyos datos fueron posteriormente incluidos en los modelos DMST para obtener el rendimiento de las aeroturbinas. Esta perspectiva no solo facilitó la determinación cuantitativa de los coeficientes aerodinámicos, sino que también permitió un análisis cualitativo de los efectos generados por las modificaciones geométricas en el borde de ataque de los álabes.

Los resultados revelaron que la incorporación de tubérculos modificó el patrón de flujo alrededor del álabes, generando mejoras en la eficiencia aerodinámica, reflejadas en incrementos del coeficiente de potencia (C_p) en combinaciones geométricas específicas. En particular, se encontraron los siguientes hallazgos:

- Para la configuración $A/\bar{c} = 0.2$ $\lambda/\bar{c} = 4$, en el rango $0.25 < TSR < 1.75$, se notaron incrementos en el C_p entre 5.42% y 6.71% (Saber et al., 2018) y entre 5.39% y 6.73% (Meana-Fernández et al., 2018), en comparación con el rotor estándar.
- Para $TSR = 2$, con la misma combinación ($A/\bar{c} = 0.2$ $\lambda/\bar{c} = 4$), se distinguieron incrementos máximos de 9.57% (Saber et al., 2018) y 7.31% (Meana-Fernández et al., 2018), respecto al rotor sin modificar.
- Con base en la hipótesis planteada, si bien se buscaba un aumento uniforme del 10% en todo el intervalo de la TSR , en ciertos casos se observaron mejoras máximas de hasta 19.92% (Saber et al., 2018) y 13.46% (Meana-Fernández et al., 2018), particularmente con la configuración $A/\bar{c} = 0.2$ $\lambda/\bar{c} = 2$ para una $TSR = 2$.
- En la configuración $A/\bar{c} = 0.1$ $\lambda/\bar{c} = 1$, para $TSR < 1$, la mejora en el desempeño fue inferior al 1%, mostrando un comportamiento similar al del rotor con álabes convencionales. No obstante, cuando $TSR > 1$, la diferencia en el C_p comenzó a disminuir progresivamente, llegando a ser de -39.76% (Saber et al., 2018) y -24.21% (Meana-Fernández et al., 2018) en $TSR = 2$, lo que indica una clara desventaja en este régimen de operación.

En la comparación de los modelos DMST, tomando como referencia el de Saber et al. (2018), se identificaron las siguientes diferencias:

- Para la $TSR < 0.75$, ambos esquemas presentan estimaciones similares del C_p , con una variación menor al 2%, denotando que en este rango las diferencias entre los métodos de cálculo son insignificantes.
- En el intervalo $0.75 < TSR < 1.5$, el modelo de Meana-Fernández et al. (2018) empezó a mostrar valores mayores del C_p entre 2% y 10 %, lo que apunta que su ajuste del factor de inducción axial es menos restrictivo.
- Para $TSR > 1.5$, la diferencia entre ambos modelos se amplifica, alcanzando hasta 87.5% en $TSR = 2$. Esto advierte que el modelo de Meana-Fernández et al. (2018) tiende a proporcionar valores más altos en el rendimiento del rotor en regímenes de operación de velocidad relativa elevada, mientras que el modelo de Saber et al. (2018) ofrece estimaciones más conservadoras y probablemente más precisas.

Los resultados obtenidos en esta investigación destacan un aspecto clave: aunque no se evidenciaron mejoras significativas en los coeficientes de sustentación y arrastre debido a la velocidad de viento baja

utilizada en las simulaciones, sí se observó un incremento en el coeficiente de potencia. Este aumento, al escalar en mayor tamaño y/o número de turbinas instaladas, representa una mejora sustancial en la captación de energía eólica sin requerir modificaciones estructurales complejas en este tipo de aerogeneradores de eje vertical.

En síntesis, la biomimetización mediante la implementación de protuberancias inspiradas en los tubérculos de las aletas dorsales de la ballena jorobada en un perfil aerodinámico NACA-0018, implementado a un rotor Darrieus recto tripala, demuestra la viabilidad de incorporar elementos pasivos de control de flujo para maximizar (lo más posible) la eficiencia del rotor sin alterar significativamente su geometría original. Estas modificaciones permiten ajustar el coeficiente de potencia, logrando tanto incrementos como reducciones en función de las condiciones de operación del sistema.

Trabajo Futuro

Los resultados de este estudio han permitido identificar líneas de investigación que pueden contribuir al desarrollo y diseño de aeroturbinas de eje vertical tipo Darrieus. Estas no solo ampliarán la comprensión de la inspiración de la naturaleza en el desempeño aerodinámico, sino que también facilitarán la implementación de estrategias de mejora y validación experimental. Las áreas de oportunidad propuestas son:

- **Validación experimental de los modelos DMST:** Se recomienda realizar pruebas experimentales para contrastar las predicciones obtenidas con los modelos DMST empleados en este estudio. En particular, es relevante indagar el comportamiento del coeficiente de potencia en regímenes de *TSR* elevados, donde se identificaron variaciones notables entre los esquemas de Saber et al. (2018) y Meana-Fernández et al. (2018). Estas pruebas permitirán ajustar los métodos de cálculo y mejorar la precisión de las simulaciones numéricas.
- **Exploración de nuevas configuraciones geométricas de tubérculos:** Si bien este estudio se centró en un conjunto específico de configuraciones geométricas, es posible que existan combinaciones geométricas más eficientes. Se recomienda investigar:
 - **Nuevas disposiciones de protuberancias en los álabes**, incluyendo variaciones en su distribución y orientación.
 - **Modificaciones aerodinámicas complementarias**, como el uso de dispositivos de control de flujo adicionales o perfiles híbridos que combinen características de diferentes familias de perfiles aerodinámicos para mejorar la estabilidad del flujo y la captación de energía.
- **Evaluación del desempeño bajo condiciones ampliadas de funcionamiento:** El análisis se enfocó en una velocidad baja del viento, característica de muchas regiones del territorio mexicano. Para estimar el potencial de las adaptaciones biomiméticas en un espectro más amplio de condiciones de operación, se propone:
 - **Análisis del desempeño a velocidades de viento mayores.**
 - **Evaluación en turbinas de mayor escala**, explorando la viabilidad de implementar estas modificaciones en aerogeneradores comerciales y su impacto en la generación de energía a gran escala.
- **Validación en entornos experimentales y pruebas en túneles de viento:** Para consolidar las observaciones obtenidas en este estudio, es sustancial realizar pruebas en túneles de viento y en condiciones reales de operación. Esto permitirá:
 - **Confirmar la efectividad de las modificaciones biomiméticas** bajo condiciones de flujo de viento no ideales.

- **Comparar los resultados de las simulaciones numéricas con datos experimentales**, reduciendo la incertidumbre en la predicción del rendimiento del rotor.
- **Mejorar los modelos de simulación CFD y DMST**, ajustando los parámetros en función de mediciones experimentales, asegurando su práctica en el diseño de aeroturbinas comerciales.

La implementación de estas áreas de oportunidad contribuirá al avance en el diseño de turbinas eólicas biomimetizadas, permitiendo el desarrollo de sistemas de conversión de energía eólica más eficientes, confiables y adaptables a diversas condiciones de funcionamiento.



ANEXOS

“Disfrutar de tu trabajo es esencial. Si tu trabajo se convierte en una expresión de tus propias ideas, seguramente lo disfrutarás”

Soichiro Honda

ANEXOS

A.1. Caracterización de los aerogeneradores de eje horizontal y tendencias

Un HAWT es el tipo más común de aerogenerador en la actualidad (Figura A.1). Su eje de rotación está orientado de manera paralela a la dirección del viento. El eje principal, la transmisión, el generador, los frenos y los actuadores, junto con el transformador en algunos diseños, están alojados en una estructura llamada góndola o carcasa, que se sitúa en la parte superior de una torre (Figura A.2).



Figura A.1. Aerogenerador de eje horizontal de gran escala (Las longitudes aproximadas de la torre y de cada álabe son 270 y 90 metros, respectivamente) (Kaldellis & Boulogiorgou, 2022).

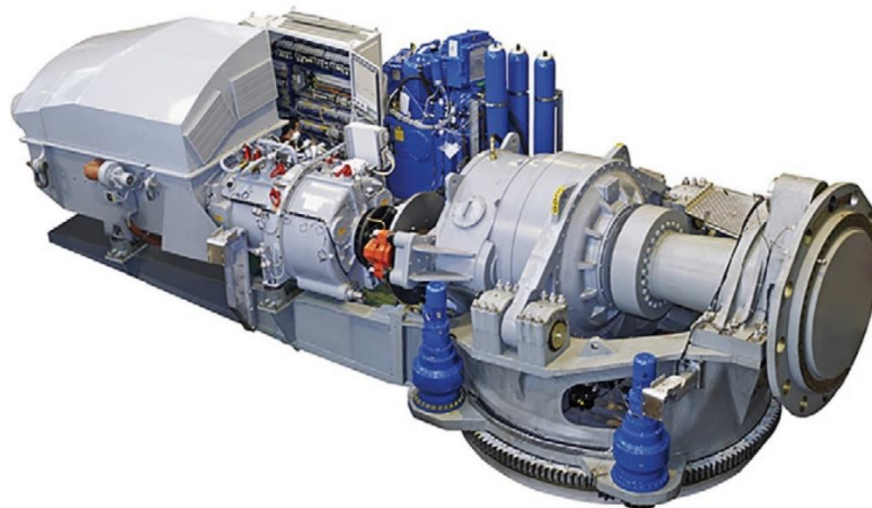


Figura A.2. Tren de potencia completo de un aerogenerador DeWind 8.2 (Stavarakakis & Pouliezos, 2022).

Las principales componentes de un HAWT (Figura A.3) son las siguientes:

- **Torre:** Soporta los álabes a una altura suficiente para aumentar su exposición a vientos más rápidos. Las torres de los aerogeneradores grandes pueden alcanzar alturas de hasta 250 metros sobre su base. Estas torres están fabricadas principalmente en acero, ya que deben soportar fuerzas de corte y flexión considerables.
- **Álabes o palas:** Capturan la energía cinética del viento. Suelen estar fabricadas con materiales como poliéster reforzado con fibra de vidrio o madera epoxi. La longitud de las palas puede variar desde 5 metros hasta más de 100 metros. Normalmente, se fabrican como una unidad sólida para mejorar su resistencia estructural. Sin embargo, investigaciones recientes sugieren que la posibilidad de dividir las palas en secciones podría facilitar su transporte e instalación.
- **Buje:** Está conectado al eje de baja velocidad de la transmisión, y los álabes se montan sobre este. Su ángulo de inclinación puede ajustarse mediante actuadores para optimizar la captura de energía.
- **Mecanismo de orientación (yaw):** Este mecanismo rota la góndola para alinear las palas hacia el viento, maximizando la exposición de estas.
- **Transmisión:** Conecta las palas de rotación lenta con el generador de alta velocidad.
- **Generador:** Está montado en el eje de velocidad alta de la transmisión y convierte la energía mecánica de los álabes en energía eléctrica.
- **Freno de disco:** Se utiliza para evitar que las palas giren cuando las condiciones del viento no son adecuadas para la generación de electricidad o para mantenimiento del aerogenerador.
- **Transformador:** Eleva la tensión de salida del generador para su distribución a la red eléctrica.
- **Controladores:** Integran el aerogenerador con la red eléctrica y regulan la energía generada. También protegen al aerogenerador de condiciones extremas, como fallos en la red o tormentas.

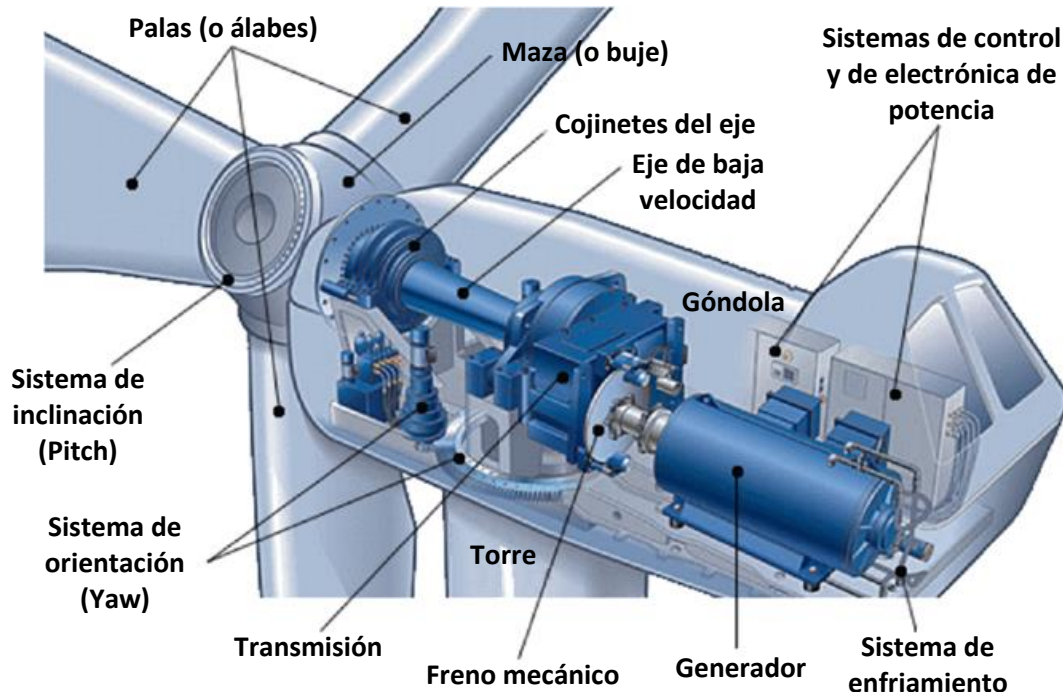


Figura A.3. Principales componentes de un aerogenerador de eje horizontal (HAWT) (Tchakoua et al., 2013).

En la década de los ochenta, el diámetro del rotor, en general, era inferior a 30 metros, y la altura de la torre no superaba los 50 metros. Sin embargo, en tiempos recientes, hay turbinas eólicas en funcionamiento con diámetros de hasta 250 metros. Esto implica que la altura máxima de los álabes puede superar el borde de la capa límite atmosférica, que se sitúa entre los 200 y 300 metros (Figura A.4) (Liebreich, 2017). El aumento de las dimensiones de los rotores desde 1980 se representa en la Figura A.5, donde el centro de cada circunferencia indica el diámetro en la escala vertical, y los círculos simbolizan las proporciones reales.

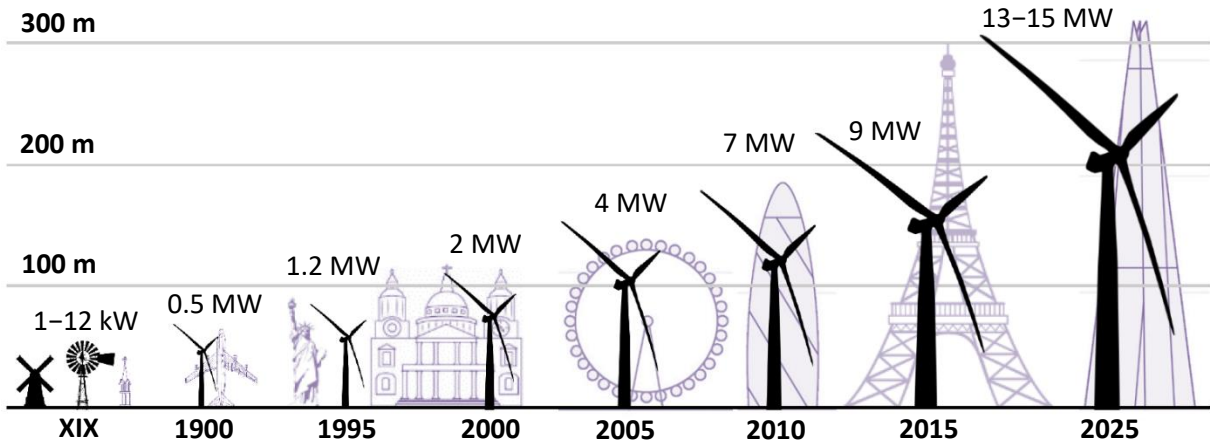


Figura A.4. Evolución del tamaño y de la capacidad de los HAWT a través del tiempo (Liebreich, 2017).

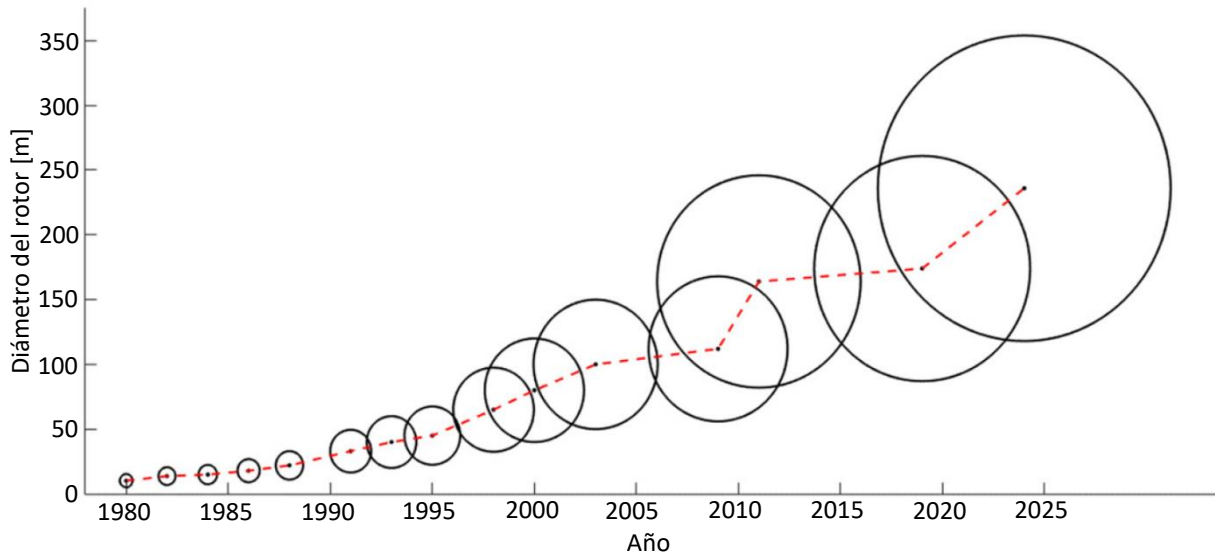


Figura A.5. Crecimiento del tamaño del rotor de los HAWT desde 1980 (Jamieson & Morgan, 2022).

A.2. Teoría del *momentum*

Un concepto esencial en el estudio de un campo de flujo estacionario (independiente del tiempo) es la ***línea de corriente***, la cual es un camino imaginario en la que, cada punto a lo largo de la línea, el vector velocidad es tangente a dicha línea. Consecuentemente, la velocidad normal a una línea de corriente es cero.

Otro término relevante en flujo estacionario es el **tubo de corriente**, que es una zona del campo compuesta por líneas de corriente. Acorde a su definición, no permite el ingreso o salida de flujo a través de su superficie. En consecuencia, el flujo masico es el mismo en cualquier área transversal del tubo. La Figura A.6 representa un tubo de corriente que incluye un HAWT.

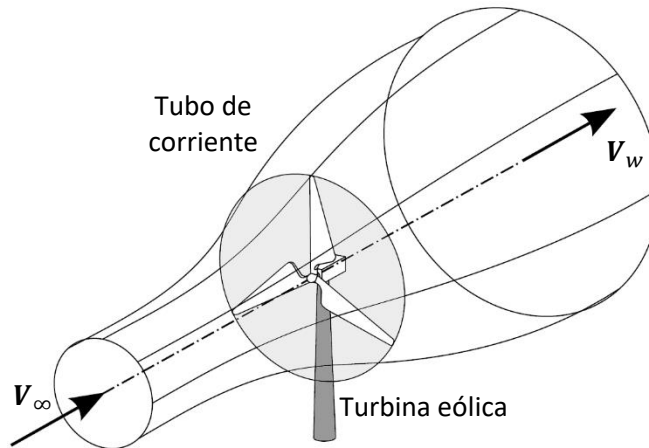


Figura A.6. Esquema del tubo de corriente para un aerogenerador (Schaffarczyk, 2020).

En la Figura A.7, la aeroturbina se sustituye por un **disco actuador**. Las hipótesis realizadas al manejar la **teoría del disco actuador** se sintetizan en los siguientes incisos (Corke & Nelson, 2018):

- a) El flujo estacionario y el fluido no viscoso e incompresible.
- b) El disco actuador conforma los álabes del rotor y obtiene energía de la corriente del fluido.
- c) El disco actuador genera una discontinuidad de presión.
- d) El flujo es uniforme en el disco y la estela.
- e) El disco no trasmite ningún vórtice al flujo.

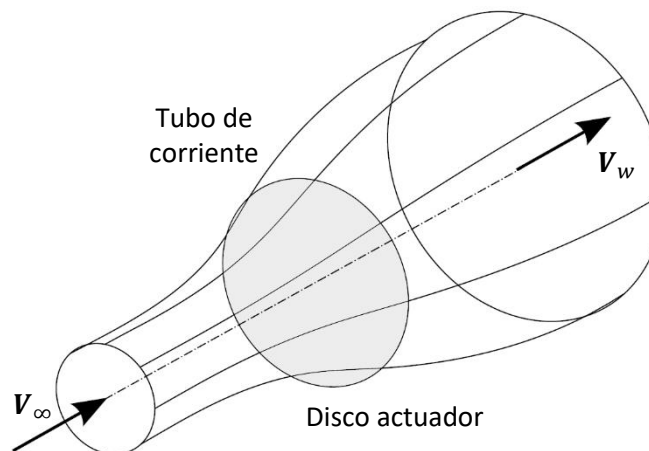


Figura A.7. Disco actuador en un aerogenerador (Schaffarczyk, 2020).

El objetivo de un rotor eólico es obtener energía de un fluido (agua o aire), que acontece en el disco actuador, manifestándose como un descenso en la presión estática en el disco actuador. Derivado de la noción del tubo de corriente, el flujo másico no varía a través del disco actuador. Por consiguiente, por el principio de Bernoulli, la pérdida en la presión sucede en el disco actuador repercute en una disminución de velocidad en el tubo de corriente. Como el flujo másico es constante, esto induce a que

la extensión de la sección transversal del tubo crezca continuamente, corriente abajo del disco actuador (Figura A.7), hasta que la presión estática se restablezca al valor de la corriente libre. El comportamiento de las características del flujo en el tubo de corriente se expone en la Figura A.8.

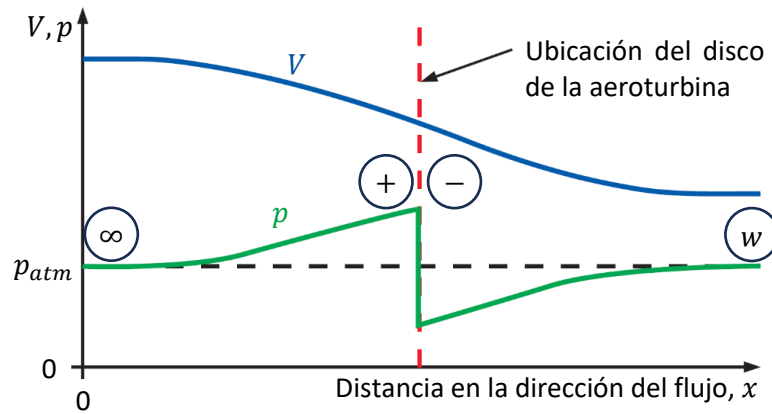


Figura A.8. Representación gráfica de la velocidad promedio y la presión estática del tubo de corriente, incluyendo en el disco actuador (Kanoğlu et al., 2020).

Supóngase dos volúmenes de control que envuelven al disco actuador (uno grande y otro pequeño), ejemplificados en la Figura A.9. El tubo de corriente visualizarse como un "conducto" imaginario a través del cual fluye el aire hacia el rotor. El volumen de control menor abarca la aeroturbina, donde $A^+ = A^- = A_d$, ya que, asumiendo que el rotor se asemeja a un disco, el volumen es muy delgado cuando tiende a cero. Corriente arriba a partir del disco actuador, los rasgos del flujo no se ven alteradas por el disco. La velocidad del fluido y la presión estática corresponden a las de la corriente libre, y se expresan como V_∞ y p_∞ . En lo que atañe al tubo de corriente, la sección transversal se denota como A_∞ .

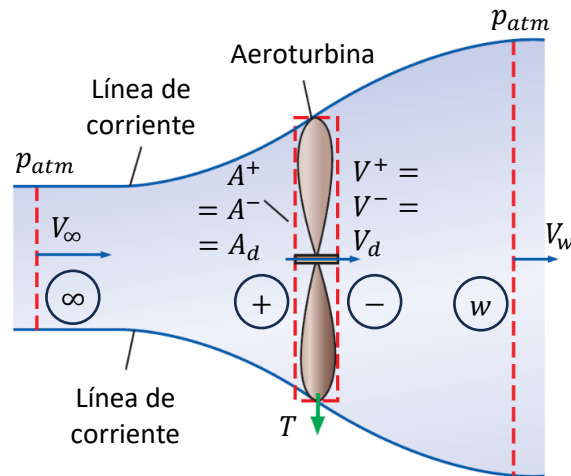


Figura A.9. Volúmenes de control establecidos por un tubo de corriente para el concepto del rendimiento ideal en un rotor eólico (Kanoğlu et al., 2020).

La conservación de la masa se mantiene en todo el tubo de corriente. Las secciones relevantes dentro del tubo son bastante antes y después del disco actuador, y en el rotor. Entonces, en el tubo de corriente en estas tres áreas precisa que:

$$\dot{m} = (\rho \cdot A \cdot V)_{\infty} = (\rho \cdot A \cdot V)_d = (\rho \cdot A \cdot V)_w \quad (\text{A.1})$$

Donde los subíndices d y w se relacionan con el disco actuador y a la región muy alejada de la estela (wake), respectivamente, y ρ es la densidad del fluido. Para superposiciones de aeroturbinas, es razonable decir que el flujo es incompresible, es decir, la densidad no cambia. De este modo, la ecuación de continuidad se reduce a:

$$(A \cdot V)_{\infty} = (A \cdot V)_d = (A \cdot V)_w \quad (\text{A.2})$$

Debido a que las distancias corriente arriba y corriente abajo están adecuadamente alejadas del disco, entonces $p_{\infty} = p_w = p_{\text{atm}}$, lo que significa que no hay fuerza de presión en el volumen de control grande, además, de que las velocidades de entrada y salida son uniformes a V_{∞} y V_w , respectivamente. Sustituyendo la Ecuación (A.1) en la conservación de la cantidad de movimiento, se obtiene que la diferencia en el *momentum* axial es causada exclusivamente por el flujo que abandona el tubo de corriente, es decir:

$$T = \dot{m}(V_{\infty} - V_w) = \rho \cdot V_d \cdot A_d(V_{\infty} - V_w) \quad (\text{A.3})$$

Donde T es la fuerza de reacción en el rotor.

La Figura A.8 muestra cómo el flujo dentro del tubo de corriente hay un descenso en la presión al atravesar el disco actuador (volumen de control pequeño). La presión en ambos lados del disco se denota como p^+ y p^- , mientras que la velocidad del flujo en el disco es invariable y se representa como V_d . De la ecuación de Bernoulli, empleando secciones transversales corriente arriba y antes del disco actuador, se tiene:

$$p_{\infty} + \frac{1}{2}\rho \cdot V_{\infty}^2 = p^+ + \frac{1}{2}\rho \cdot V_d^2 \quad (\text{A.4})$$

De manera equivalente, después del del disco actuador hasta una distancia considerable corriente abajo, de la ecuación de Bernoulli:

$$p^- + \frac{1}{2}\rho \cdot V_d^2 = p_{\infty} + \frac{1}{2}\rho \cdot V_w^2 \quad (\text{A.5})$$

Del volumen de control grande indicado en la Figura A.9, la diferencia en el *momentum lineal* es producida por el flujo que sale del tubo de corriente. Si bien la presión en la salida del tubo es la atmosférica (p_{∞}), la velocidad del flujo V_w disminuye por la expansión del tubo de corriente. El área transversal en la salida del tubo se expresa como A_w .

La sumatoria de las fuerzas en la dirección x (axiales) que se ejercen a través del volumen de control es correspondiente a la variación en el *momentum* axial dentro del volumen de control. Dado que el rotor obtiene energía del flujo, lo que provoca una disminución en la presión, la fuerza axial actuando sobre el volumen de control puede expresarse como una fuerza de empuje T , y al emplear la relación de conservación de momento lineal sobre el volumen de control que abarca el disco actuador, se tiene:

$$p^+ \cdot A_d - p^- \cdot A_d = T = (p^+ - p^-)A_d \quad (\text{A.6})$$

Al igualar las Ecuaciones (A.4) y (A.5), y reestructurado los términos, puede deducirse que la diferencia de presión en el disco actuador es:

$$p^+ - p^- = \frac{1}{2}\rho(V_\infty^2 - V_w^2) \quad (\text{A.7})$$

Por lo tanto, la fuerza de empuje T sobre el disco actuador puede ser escrita como:

$$T = \frac{1}{2}\rho \cdot A_d(V_\infty^2 - V_w^2) \quad (\text{A.8})$$

Al igualar y reducir las Ecuaciones (A.3) y (A.8), se obtiene una correspondencia entre las velocidades en la corriente libre (V_∞), el disco actuador (V_d) y la estela (V_w), a saber:

$$V_d = \frac{1}{2}(V_\infty + V_w) \quad (\text{A.9})$$

De esta forma, puede verse que la velocidad promedio del flujo que pasa por un rotor eólico ideal la media entre las velocidades corriente arriba y abajo.

Una medida que proporciona cómo ha cambiado la velocidad del flujo, desde su valor inicial, al acercarse en el disco actuador es el **factor de inducción axial** (a), determinado por:

$$a = \frac{V_\infty - V_d}{V_\infty} \quad (\text{A.10})$$

Por consiguiente, la velocidad en el disco actuador (V_d) puede definirse en función del factor de inducción axial:

$$V_d = V_\infty(1 - a) \quad (\text{A.11})$$

Al combinar las Ecuaciones (A.9) y (A.11), puede obtenerse la velocidad en la estela (V_w) en términos del factor a :

$$V_w = V_\infty(1 - 2a) \quad (\text{A.12})$$

Las Ecuaciones (A.11) y (A.12) expresan que la pérdida de velocidad axial se divide en dos partes: una corriente arriba del disco actuador y la otra corriente abajo en la estela cuando la presión estática se recupera ($p_w = p_\infty = p_{atm}$).

Al sustituir las Ecuaciones (A.11) y (A.12) en la Ecuación (A.3), y reordenando, se obtiene una relación para la fuerza de empuje (T) en función de la velocidad de la corriente libre (V_∞), el área del disco actuador (A_d) y el factor de inducción axial (a), dada por:

$$T = 2\rho \cdot A_d \cdot V_\infty^2 \cdot a(1 - a) \quad (\text{A.13})$$

El **coeficiente de empuje** (C_T), que es una medida adimensional de la fuerza de empuje en relación con las propiedades del flujo, se determina como:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho \cdot A_d \cdot V_\infty^2} \quad (\text{A.14})$$

Al sustituir la Ecuación (A.13) en la Ecuación (A.14), se produce una expresión para el C_T que depende de a . Es decir:

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (\text{A.15})$$

La potencia entregada de la corriente del flujo hacia el disco actuador es el resultado de la fuerza de empuje (T) multiplicada por la velocidad percibida en el disco actuador (V_d), expresada como:

$$P = T \cdot V_d \quad (\text{A.16})$$

Sustituyendo las Ecuaciones (A.11) y (A.13) en la Ecuación (A.16), y reduciendo, se tiene la potencia captada por el disco actuador que depende del factor de inducción axial:

$$P = 2\rho \cdot A_d \cdot V_\infty^3 \cdot a(1 - a)^2 \quad (\text{A.17})$$

El **coeficiente de potencia** (C_p), se especifica como el cociente entre la potencia que dispone el rotor (P) y la disponible en el flujo del fluido:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho \cdot A_d \cdot V_\infty^3} \quad (\text{A.18})$$

Al reemplazar P , de la Ecuación (A.17), con la Ecuación (A.17) y simplificando, el C_p dependerá de a . Es decir:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (\text{A.19})$$

Para obtener el máximo posible de los coeficientes C_T y C_p se deriva en relación con a , e igualando a cero. Esto es:

$$\frac{dC_T}{da} = \frac{d}{da} [4a(1 - a)] = 4 - 8a = 0 \quad (\text{A.20})$$

De esta manera, se obtiene que $a = 1/2$ y el coeficiente de empuje máximo es $C_{T,max} = 1$.

Con respecto al coeficiente de potencia:

$$\frac{dC_p}{da} = \frac{d}{da} [4a(1 - a)^2] = 12a^2 - 16a + 4 = (3a - 1)(a - 1) = 0 \quad (\text{A.21})$$

Donde las raíces a la Ecuación (A.21) son $a = 1/3$ o $a = 1$. Cuando el factor de inducción axial es uno, la potencia extraída por el disco actuador es cero. Por lo tanto, para alcanzar el coeficiente de potencia máximo ($C_{p,max}$), el factor de inducción axial es $1/3$. De la Ecuación (A.19), se obtiene:

$$C_{P,max} = 4 \left(\frac{1}{3}\right) \left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 = \frac{16}{27} \approx 0.5926 \quad (\text{A.22})$$

Este valor de $C_{P,max}$ muestra la **eficiencia máxima que puede lograr una aeroturbina** ($\approx 59.26\%$), denominado **límite de Betz–Joukowski**. Todos los rotores eólicos reales tienen una eficiencia máxima inferior a este valor debido a las simplificaciones que se hicieron en este razonamiento ideal, además de las pérdidas irreversibles que no se tomaron en cuenta (Kanoğlu et al., 2020).

Cuando $a = 1/3$, la sección transversal corriente arriba equivale $(2/3)A_d$, que se expande hasta $2A_d$ en la región de la estela. Esto sugiere que si una turbina eólica ideal funcionara a $(2/3)V_\infty$ y $(8/9)C_T$ en el disco actuador estaría generando la máxima cantidad de energía. Al pasar $a = 1/2$, $C_T = 1.0$ (máximo) y $V_w = 0$. La Figura A.10 muestra las gráficas de las Ecuaciones (A.12), (A.15) y (A.19). La Ecuación (A.12) está normalizada con respecto a V_∞ .

De la Ecuación (A.2), al utilizar la Ecuación (A.12) y reordenado, la expresión resultante es:

$$\frac{A_\infty}{A_w} = 1 - 2a \quad (\text{A.23})$$

La Ecuación (A.23) revela que la fracción A_∞/A_w se vuelve negativa cuando $a > 0.5$. En este intervalo, la teoría del *momentum* ya no es aplicable. Este fenómeno se denomina **estado de estela turbulenta**. La Figura A.11 expone las condiciones de funcionamiento del rotor eólico y sus respectivos coeficientes de empuje. Algunos estudios han expuesto que el alcance de la estela turbulenta surge a partir de $a = 0.4$, que está en la vecindad del estado de eficiencia máxima ($a = 1/3$) (T. Wang et al., 2023b).

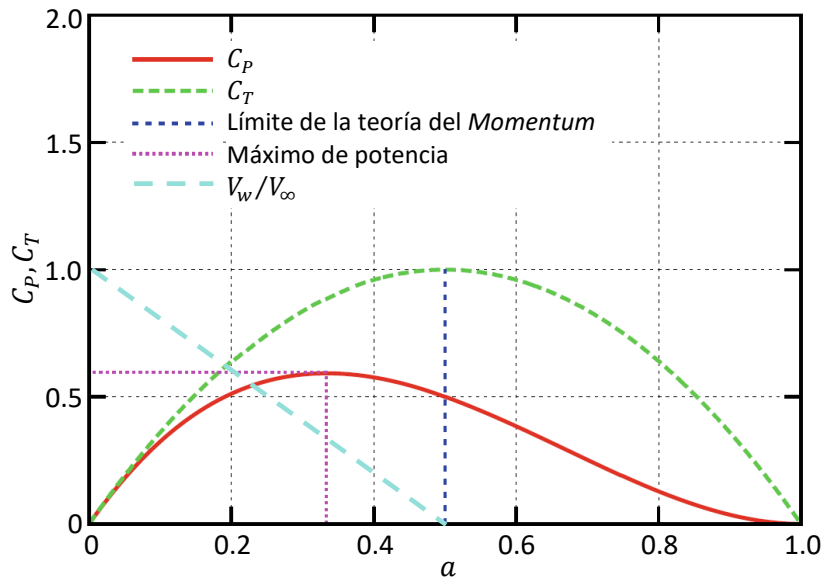


Figura A.10. Gráficas de C_T , C_P y V/V_∞ con respecto al factor de inducción axial (a) (Schaffarczyk, 2020).

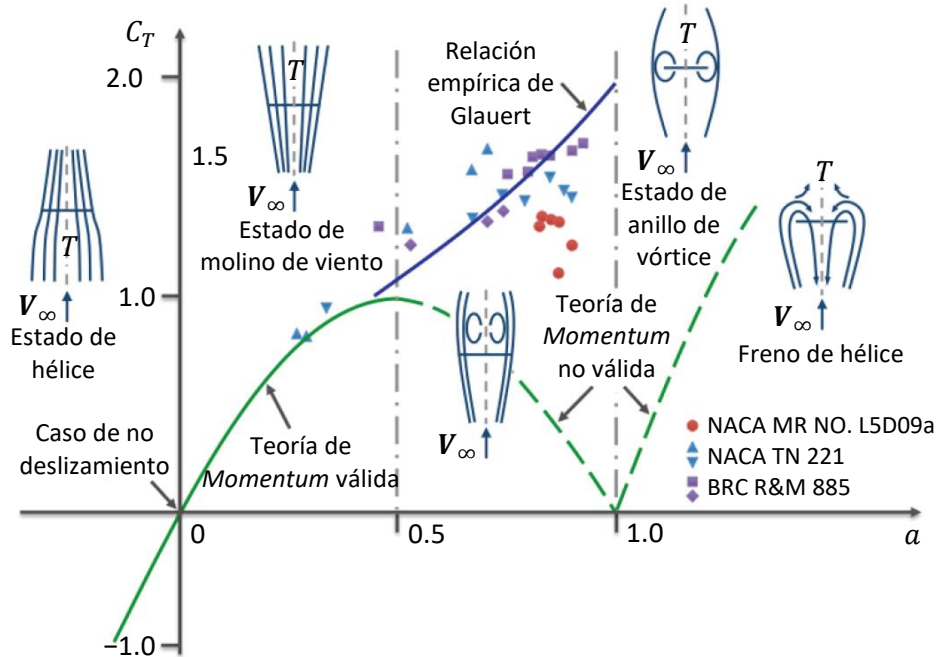


Figura A.11. Comportamiento de los coeficientes de empuje experimentales y teóricos (Sebastian, 2012).

Las aeroturbinas regularmente funcionan en el estado de **molino de viento**, con valores de $0 \leq a \leq 0.5$. Cuando $a < 0$, el rotor trabajará como un **propulsor**, generando fuerza a barlovento o a favor del viento (es decir, $C_T < 0$) que añade energía a la estela.

Cuando el rotor maneja relaciones de velocidad en la punta significativamente superiores al proyectado, las partes de los álabes que están en la periferia del radio del rotor pueden entrar en el **estado de estela turbulenta**. De la Figura A.11 (datos derivados de aeroturbinas, autogiros y helicópteros), la fuerza de empuje se intensifica con el factor de inducción axial en el estado de estela turbulenta, caso contrario como lo establece la Ecuación (A.15).

Cuando $a > 1$, se dice que está en **estado de anillo de vórtices**, circunstancia que distingue a los helicópteros en un descenso motorizado (lento), donde el rotor invierte la dirección del flujo. Este fenómeno se conoce como **estado de freno de hélice**, donde se incorpora potencia al flujo para producir un empuje a sotavento (a favor del viento) en el rotor (Spera, 2009).

La Ecuación (A.15) deja de ser válida en el estado de estela turbulenta. Para resolver este inconveniente, los investigadores han hecho correlaciones experimentales del coeficiente de empuje para velocidades inducidas elevadas. Estas fórmulas incluyen (T. Wang et al., 2023b):

Glauert:
$$C_T = 0.89 - 0.44a + 1.56a^2 \quad (a > 0.4) \quad (A.24)$$

Wilson:
$$C_T = 0.578 + 0.96a \quad (a > 0.38) \quad (A.25)$$

De Vries y Den Blanken:
$$C_T = 0.53 + 1.07a \quad (a > 0.4) \quad (A.26)$$

Anderson: $C_T = 0.425 + 1.39a \quad (a > 0.326)$ (A.27)

La Figura A.12 señala la correspondencia entre la teoría del *momentum* con factores de inducción bajos y valores experimentales con rotores a factores de inducción altos. Una fórmula de correlación empírica cubre ambos rangos del factor de inducción axial de la siguiente manera (Spera, 2009):

$$a = 0.27C_T + 0.10C_T^3 \quad (a > 0.4)$$
 (A.28)

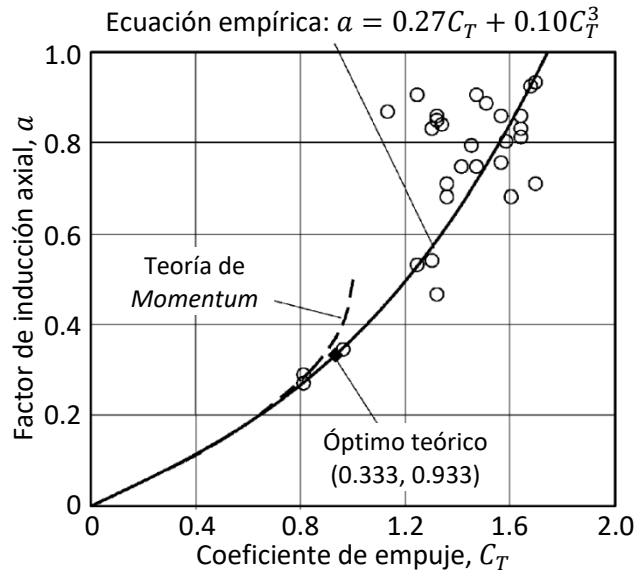


Figura A.12. Relación entre el coeficiente de empuje y el factor de inducción axial utilizando una ecuación empírica basada en datos experimentales (Spera, 2009).

La velocidad en la periferia del rotor (V_t) con respecto a la del viento (V_∞), es un variable de evaluación para el coeficiente de potencia y, en consecuencia, la energía entregada por el aerogenerador. Si los álabes del rotor giran muy lento y la velocidad del flujo es rápida, una fracción importante del flujo puede atravesar los espacios entre los álabes, sin interactuar con estos elementos. En cambio, si el rotor gira demasiado veloz y la velocidad del flujo es lenta, la corriente puede alejarse de la aeroturbina, lo que provoca una pérdida de energía por la turbulencia y formación de vórtices. Por ende, es fundamental que haya una correspondencia dinámica entre las velocidades de la turbina eólica y del viento para maximizar la captación de energía (Mathew & Philip, 2012).

La fracción entre la velocidad periférica del rotor (V_t) y la velocidad del viento V_∞ se especifica como la **relación de velocidad en la punta** o *TSR* (por sus siglas en inglés, Tip Speed Ratio), también denotada con la letra griega lambda (λ), expresada como:

$$TSR = \frac{V_t}{V_\infty} = \frac{\omega \cdot R}{V_\infty}$$
 (A.29)

Donde V_t es la velocidad tangencial del álabe en el radio de la aeroturbina, ω es la velocidad angular del rotor y R es su radio.

El par (o momento) de torsión Q generado por la turbina eólica, puede calcularse de la siguiente relación:

$$P = Q \cdot \omega \quad \rightarrow \quad Q = \frac{P}{\omega} \quad (\text{A.30})$$

El cociente entre el par originado por la aeroturbina (Q) y el momento teórico por la corriente libre sin perturbar se le denomina **coeficiente de momento** (C_Q), definido como:

$$C_Q = \frac{Q}{\frac{1}{2} \rho \cdot A_d \cdot V_\infty^2 \cdot R} \quad (\text{A.31})$$

De la Ecuación (A.18), al sustituir la Ecuación (A.30) queda:

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho \cdot A_d \cdot V_\infty^3} = \frac{Q \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho \cdot A_d \cdot V_\infty^3} \quad (\text{A.32})$$

Al hacer la división de la Ecuación (A.32) entre la Ecuación (A.31), resulta ser:

$$\frac{C_P}{C_Q} = \frac{\omega \cdot R}{V_\infty} = TSR \quad (\text{A.33})$$

El coeficiente de potencia varía según las diversas geometrías y arreglos de rotores. Las gráficas representativas del C_Q en relación con la TSR se representa en la Figura A.13, mientras que las correspondiente al C_P se muestran en la Figura A.14. Para cada diseño, existe un valor óptimo de la TSR en el que la conversión de energía es la mejor y el C_P es máximo. Usualmente, las turbinas eólicas de eje vertical pueden tener máximos de rendimiento menores y giran más despacio en comparación con las de eje horizontal. El límite superior para el C_P de un rotor eólico es el *límite de Betz–Joukowski*. De la Figura A.14, los HAWT tripala cuentan con en el mayor C_P entre las diferentes clasificaciones; por esta razón, los aerogeneradores modernos normalmente emplean este arreglo.

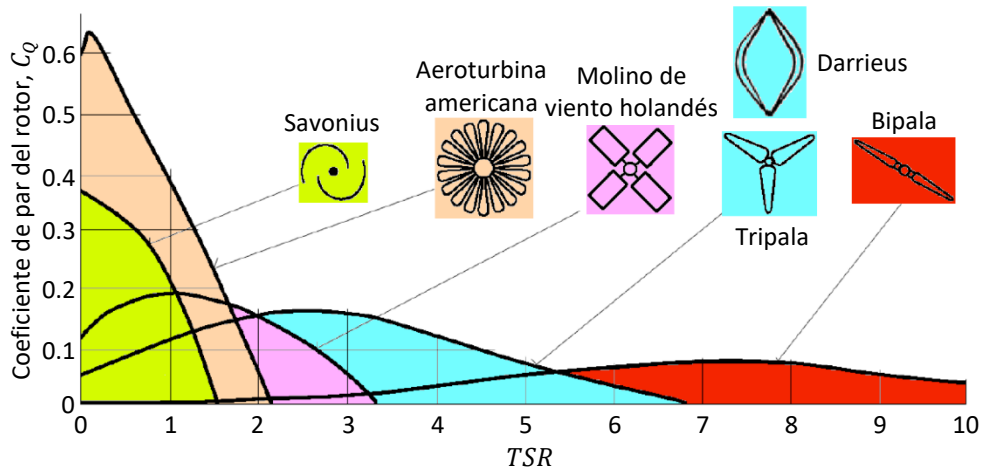


Figura A.13. Coeficientes de momento con respecto a la relación de velocidad en la punta (Fernández-Díez, 1993).

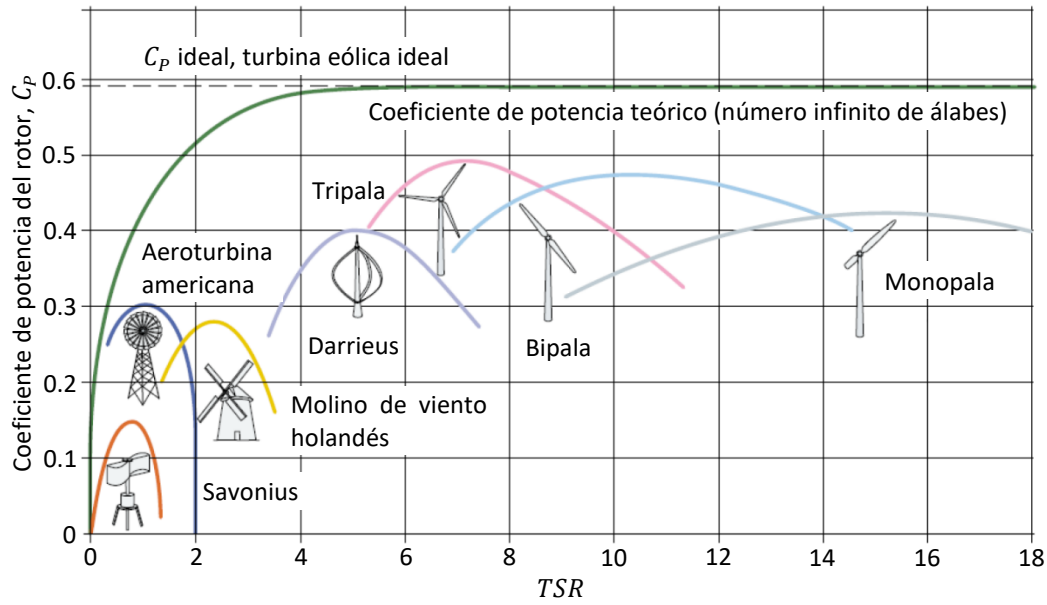


Figura A.14. Coeficientes de potencia con respecto a la relación de velocidad en la punta (Ajayi, 2012).

A.3. Discretización de la malla cerca de la pared

Para poder capturar los gradientes cerca de la superficie, es necesario hacer una división más fina de los elementos que conformaran la malla. Para esto, a veces los programas basados en la CFD ofrecen herramientas de mallado para poder hacer esta tarea, de manera guiada, por medio de la especificación de ciertos parámetros. Una opción es definir la *altura de la primera capa* (y_H), el *número de capas* (N) y la *razón de crecimiento geométrico* (G).

Frecuentemente, el *espesor de la capa límite* δ_{99} se procura que este dentro de estas capas finas, llamadas *capas de resolución (inflation layers)*, como lo visualizado en la Figura A.15. En consecuencia, debe establecerse la manera de configurar la división de las celdas. La *altura total* (y_T) sería el espesor de la *capa límite* (δ_{99}).



Figura A.15. Esquema que entrelaza la relación entre el espesor de la capa límite y las capas de resolución (Wimshurst, 2021).

Para la *altura de la primera capa* (y_H) va de la mano con el parámetro y^+ (según se haya fijado) y el valor de "y" (evaluado con los pasos de la Figura A.16) es la distancia al centroide de la primera celda a la pared; en consecuencia, la altura de la celda viene a estar dada por el doble de la longitud "y", es decir: $y_H = 2y$ (Figura A.16). Al tener una malla inicial, hay que verificar la validez de esta, porque la altura es una buena estimación (por las relaciones empíricas) y mediante una inspección por CFD puede hacerse la modificación, en caso de ser inevitable. Es decir, si el objetivo es que $y^+ = 1$ y la prueba

previa indica que $y^+ = 2.2$, por consiguiente, sería oportuno disminuir la distancia en un factor aproximado de 2.2 para rectificar el valor deseado de y^+ (Fluid Mechanics 101, 2021).



Figura A.16. Ilustración entre la distancia “ y ” al centroide de la celda y la distancia “ y_H ” relativa con la altura de la capa, medidas a partir de la pared del sólido (Wimshurst, 2021).

La *tasa de crecimiento* (G) establece la proporción entre la altura de dos celdas consecutivas. Cuando $G > 1$, las celdas aumentan de tamaño a medida que se apartan de la pared. Entonces, el espesor total (y_T) queda en función del número de capas de resolución (N) y de la razón de crecimiento (G), como (Figura A.17):

$$y_T = y_H + y_H G + y_H G^2 + y_H G^3 + \dots + y_H G^{N-1} \quad (\text{A.34})$$

Simplificando, puede adoptarse la notación de suma:

$$y_T = \sum_{k=0}^{N-1} y_H G^k \quad (\text{A.35})$$

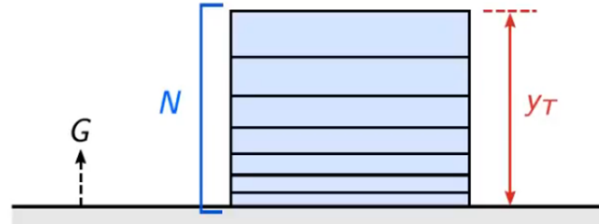


Figura A.17. Representación de la altura total y la razón de crecimiento entre cada capa (Wimshurst, 2021).

La Ecuación (A.35) representa la fórmula de una serie geométrica, que puede reemplazarse por la identidad que la describe. Reemplazando y_T por δ_{99} , adquiere la siguiente forma:

$$\delta_{99} = y_H \frac{1 - G^N}{1 - G} \quad (\text{A.36})$$

La Ecuación (A.36), en esta forma, es complicada resolverla directamente para G , además de viene implícita una segunda variable (N). Para flujos aerodinámicos que manejan el modelado de turbulencia de Navier–Stokes con el promedio de Reynolds (RANS), los ingenieros de CFD comúnmente proponen “ N ” de 15 a 30 capas de resolución para el grosor de la capa límite (Fluid Mechanics 101, 2021). Otro criterio es, con fundamento a los recursos encontrados en la red (foros/discusiones), como primeras conjeturas (Wimshurst, 2021) puede precisarse el valor de “ N ”, en función de y^+ , como:

- $N > 10$ si la altura de la primera celda es $y^+ \sim 30$.

- $N > 25$ si la altura de la primera celda es $y^+ \sim 1$.

Quedando como incógnita la razón de crecimiento (G) en la Ecuación (A.36). Modificando esta relación para que quede igualada a cero y así poder obtener sus raíces, resulta del siguiente modo:

$$y_H \frac{1 - G^N}{1 - G} - \delta_{99} = 0 \quad (\text{A.37})$$

Donde la solución puede determinarse mediante algún algoritmo de métodos numéricos, por ejemplo, Bisección o Newton–Raphson. La tasa de crecimiento (G) debe ser mayor que 1 y, lo más factible, es que sea menor que 2. Consecuentemente, un valor inicial entre 1.01 y 2 puede escogerse para delimitar la raíz en el método iterativo para la búsqueda de raíces.

La solución de la Ecuación (A.37) da la máxima tasa de crecimiento (G) para que equipare la altura de las capas de resolución a δ_{99} . Por lo regular, este parámetro se encuentra entre 1.05 y 1.3 (Wimshurst, 2021) y, con base a la calidad observada, puede ser necesario reducir este valor.

Haciendo un razonamiento más a fondo de la Ecuación (A.37), existe otra forma de obtener el parámetro “ N ”, estableciendo el valor de “ G ” a uno congruente, por medio del siguiente proceso para despejar a “ N ”.

De la Ecuación (A.36), despejando a G^N :

$$\delta_{99} = y_H \frac{1 - G^N}{1 - G} \quad \Rightarrow \quad \frac{\delta_{99}}{y_H} (1 - G) - 1 = -G^N \quad \Rightarrow \quad G^N = 1 - \frac{\delta_{99}}{y_H} (1 - G) \quad (\text{A.38})$$

Aplicando logaritmos naturales, en ambos lados, y sus propiedades:

$$\ln[G^N] = \ln \left[1 - \frac{\delta_{99}}{y_H} (1 - G) \right] \quad \Rightarrow \quad N \cdot \ln[G] = \ln \left[1 - \frac{\delta_{99}}{y_H} (1 - G) \right] \quad (\text{A.39})$$

Despejando a “ N ”, la relación queda como:

$$N = \frac{\ln \left[1 - \frac{\delta_{99}}{y_H} (1 - G) \right]}{\ln[G]} \quad (\text{A.40})$$

Según lo recomendado por Wimshurst (2021), “ G ” fluctúa entre 1.05 y 1.3, dependiendo de la calidad de malla y del análisis de sensibilidad es la selección de este valor para obtener el número de capas de resolución (N) conveniente.

Al incorporar capas de resolución, un aspecto a considerar es que la transición entre la última capa de resolución y de la malla del flujo libre que las envuelve no cause un cambio significativo en el volumen de las celdas de ambas regiones en contacto. Especialmente para simulaciones de remolinos grandes (LES) debido a que la viscosidad de la subred es proporcional al volumen de la celda. En consecuencia, variaciones súbitas en el volumen de la celda traen consigo alteraciones inesperadas en la viscosidad de la subred, lo que puede inducir errores y variabilidad (Fluid Mechanics 101, 2021).

Para darse una idea si estas capas de resolución son adecuadas, al observar la transición entre la última celda y de la corriente libre, su volumen de ambas debe ser muy similar (Figura A.18), en caso contrario un ajuste sería necesario como el incrementar el número de capas (N).

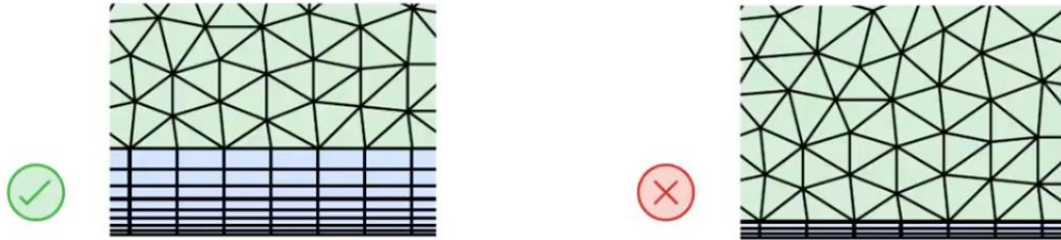


Figura A.18. Comparación entre una transición adecuada y deficiente observando la transición de volumen de la última celda de resolución y de la primera que conforma el flujo libre (Wimshurst, 2021).

Una manera de discernir la transición entre volúmenes es contrastar la altura de la capa de inflación terminal con la malla adyacente al flujo libre. La altura de la capa final (y_F) está dada por:

$$y_F = y_H \cdot G^{N-1} \quad (\text{A.41})$$

Otro modo de obtener los parámetros “ N ” y “ G ”, ligado a la transición suave entre las dos regiones de malla (Figura A.19), es igualando las áreas (aproximadamente) entre los elementos de la última capa de resolución (A_F) y la primera franja que pertenece al flujo libre (A_I). Suponiendo una malla bidimensional con elementos mayoritariamente triangulares, las áreas de cada elemento de los estratos son:

$$A_I = \frac{x \cdot h}{2} \quad (\text{A.42})$$

$$A_F = x \cdot y_F = x \cdot (y_H \cdot G^{N-1}) \quad (\text{A.43})$$

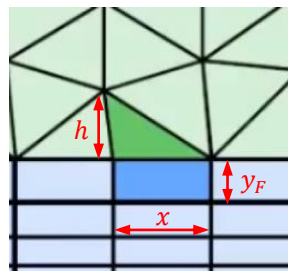


Figura A.19. Representación de la semejanza entre las áreas de la última capa de resolución y la primera franja donde inicia el dominio de la corriente libre (Wimshurst, 2021).

Igualando las áreas:

$$A_I = A_F \quad \Rightarrow \quad \frac{x \cdot h}{2} = x \cdot y_H \cdot G^{N-1} \quad \Rightarrow \quad h = 2 \cdot y_H \cdot G^{N-1} \quad (\text{A.44})$$

Para elementos rectangulares, en la malla de la corriente libre, h vendría a ser:

$$h = y_H \cdot G^{N-1} \quad (\text{A.45})$$

De la Ecuación (A.45), aplicando propiedades de los logaritmos y despejando a G^N :

$$h = 2 \cdot y_H \cdot \frac{G^N}{G} \quad \Rightarrow \quad G^N = \frac{h \cdot G}{2 \cdot y_H} \quad (\text{A.46})$$

Sustituyendo G^N en la Ecuación (A.36), realizando operaciones y simplificaciones para despejar a G :

$$\delta_{99} = y_H \frac{1 - \frac{h \cdot G}{2 \cdot y_H}}{1 - G} \quad \Rightarrow \quad G = \frac{\delta_{99} - y_H}{\delta_{99} - \frac{h}{2}} \quad (\text{A.47})$$

Para el número de capas (N), de la Ecuación (A.44), haciendo manipulaciones algebraicas, aplicando logaritmos y propiedades, y reduciendo a su mínima expresión:

$$\ln \left[\frac{h}{2 \cdot y_H} \right] = \ln[G^{N-1}] \quad \Rightarrow \quad N = 1 + \frac{\ln \left[\frac{h}{2 \cdot y_H} \right]}{\ln[G]} \quad (\text{A.48})$$

Al obtener este resultado (N), se redondea y se actualiza la proporción de crecimiento (G). De la Ecuación (A.44), ahora se despeja a “ G ” para poder obtener este valor. Esto es:

$$G^{N-1} = \frac{h}{2 \cdot y_H} \quad \Rightarrow \quad G = \left(\frac{h}{2 \cdot y_H} \right)^{1/N-1} \quad (\text{A.49})$$

Este esquema puede ayudar como guía para conocer los valores aproximados de “ N ” y “ G ” y que una revisión visual puede ser factor para decidir si la malla cumple los requisitos mencionados o necesita algunas modificaciones en los parámetros locales de dimensionamiento.

A.4. Aspectos probabilísticos para variables continuas aleatorias

Por nuestros sentidos e intuición cotidiana es sabido que el viento no es estable y varía frecuentemente en el tiempo y espacio. Debido a su comportamiento al azar, es necesario indagar sus estadísticas, como lo es distribución de densidad de la probabilidad de las velocidades. A grandes rasgos, el viento es impredecible a corto plazo, pero tiene un patrón regular y previsible a largo plazo. Para estimar el potencial de energía eólica en un lugar determinado, los datos recopilados en la zona deben examinarse e interpretarse debidamente (Mathew, 2006). Por consiguiente, el análisis estadístico es una parte indispensable de la evaluación de los datos del viento (M. H. Zhang, 2015).

Al poseer un conjunto de mediciones en una variable aleatoria continua, se hace un histograma de frecuencia relativa para describir su distribución. Para una cantidad de valores reducida, puede emplearse un número de intervalos menor; posteriormente, a medida que se reúnen más datos, los intervalos llegan a ser en mayor número y se reduce el ancho de estos. La silueta del histograma cambiará tenuemente haciéndose, en su mayor parte, menos irregular, como se presenta en la Figura A.20. A medida que el número de mediciones se torna elevado y los tamaños de los intervalos se

convierten muy reducidos, el histograma de frecuencia relativa, reiterativamente, adquiere la forma de una curva suave (Figura A.20d). Este trazo suave sintetiza la **distribución de probabilidad de la variable aleatoria continua** (Mendenhall III et al., 2020).

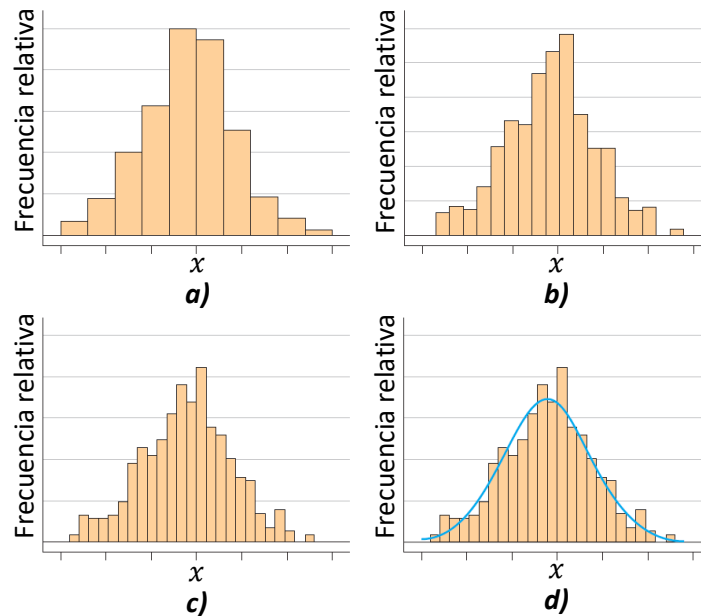


Figura A.20. Histogramas de frecuencia relativa para anchos de intervalos cada vez más reducidos (Mendenhall III et al., 2020).

A.4.1. Función de densidad de la probabilidad

Sea S el conjunto de posibles valores de un experimento aleatorio cuyas medidas son números reales. (S es un intervalo o la unión de varios en la recta numérica). Sea X una **variable aleatoria continua**, definida en S , con valores establecidos como x . La **función de densidad de probabilidad, PDF** (del inglés, *Probability Density Function*), de X es una función integrable $f(x)$ que satisface (Haghighi & Wickramasinghe, 2020):

1. $f(x)$ no tiene valores negativos en S , representado por la siguiente expresión:

$$f(x) \geq 0, \forall x \in S \quad (\text{A.50})$$

2. El área total bajo la curva $f(x)$ es igual a 1, esto es:

$$\int_S f(x) dx = 1 \quad (\text{A.51})$$

3. Si $f(x)$ es una PDF de X y A es un intervalo, entonces la probabilidad de que x pertenezca a A es la integral de $f(x)$ sobre A . Visto de otra manera:

$$P(X \in A) = \int_A f(x) dx \quad (\text{A.52})$$

Es decir, la probabilidad de que X esté en A es el área bajo la PDF sobre A .

Para una variable continua X dada, el área bajo la curva de densidad de probabilidad entre dos puntos a y b en el rango de X , es igual a la probabilidad de que un número aleatorio de X se encuentre entre a y b ; como se observa en la Figura A.21.

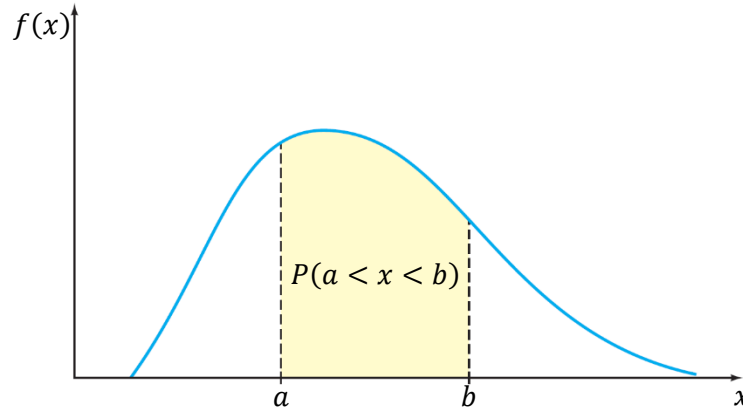


Figura A.21. Función de densidad de la probabilidad (Mendenhall III et al., 2020).

Un histograma es una aproximación a una función de densidad de la probabilidad, como se ilustra en la Figura A.22. Para cada intervalo del histograma, el área de la barra es igual a la frecuencia relativa (proporción) de las mediciones en el intervalo. La frecuencia relativa es una estimación de la probabilidad de que una medición caiga en el intervalo. De manera similar, el área bajo $f(x)$, en cualquier intervalo, es igual a la probabilidad real de que una medición incurra en el intervalo (Montgomery & Runger, 2018).

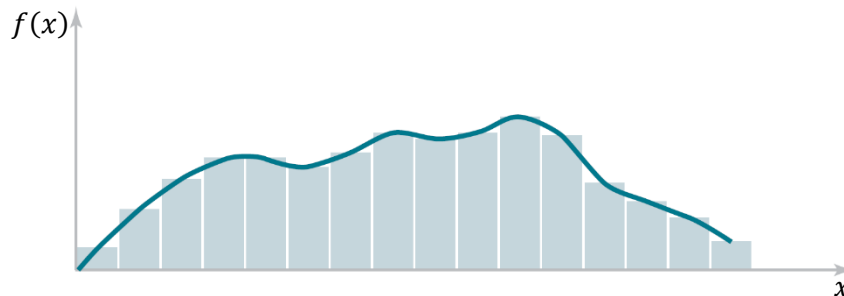


Figura A.22. El histograma se aproxima a una función de densidad de la probabilidad (Montgomery & Runger, 2018).

Lo más relevante de la PDF es que $f(x)$ se usa para calcular un área que representa la probabilidad de que X tome un valor en $[a, b]$. Mediante la elección adecuada de la forma de $f(x)$, puede caracterizar las probabilidades asociadas con cualquier variable aleatoria continua X .

A.4.2. Función de distribución acumulada

En numerosos problemas, es necesario determinar la probabilidad de que el valor observado de una variable aleatoria X sea menor o igual a un número real x (por ejemplo: c , Figura A.23). Esta probabilidad se describe mediante la **función de distribución acumulada** (CDF, por sus siglas en inglés: *Cumulative Distribution Function*), definida como $F(x) = P(X \leq x)$. Para una variable aleatoria continua X con función de densidad $f(x)$, la CDF $F(x)$ se expresa como (Walpole et al., 2017):

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt, \quad \text{para } -\infty < x < \infty \quad (\text{A.53})$$

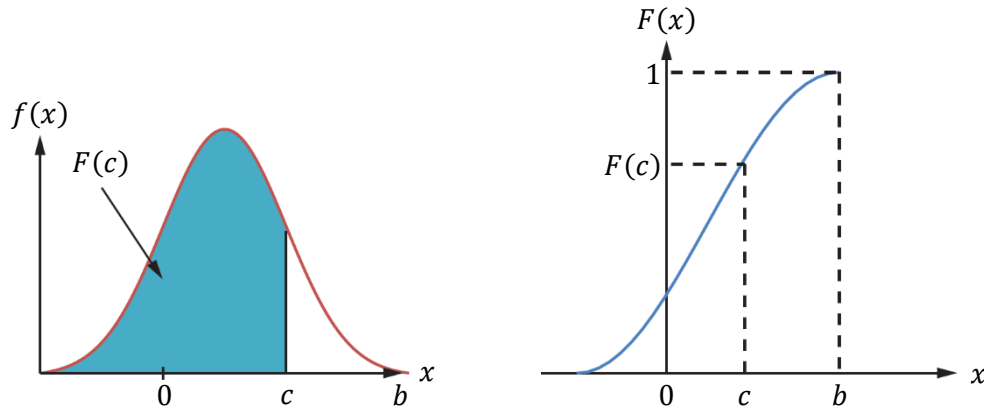


Figura A.23. Representación de la función de distribución acumulada (Ahn, 2019).

De la definición de la PDF, $f(x)$, puede obtenerse de la función de distribución de probabilidad acumulada (CDF) al derivar $F(x)$ con respecto a x . Inversamente, al integrar $f(x)$ se produce $F(x)$. Esto se ve reflejado como:

$$f(x) = F'(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (\text{A.54})$$

Si existe la derivada. Además:

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a) \quad (\text{A.55})$$

Varias distribuciones probabilísticas de uso común involucran constantes conocidas como parámetros. Si la distribución de una variable aleatoria X depende de un parámetro θ (podría ser un vector), entonces la PDF de X generalmente se expresa como $f(x|\theta)$ y la CDF se escribe como $F(x|\theta)$ o $F_X(x|\theta)$ (Krishnamoorthy, 2016).

A.4.3. Raíz error cuadrático medio (RMSE)

La raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés), también denominada raíz de la desviación cuadrática media (RMSD, Root Mean Square Deviation), se emplea a menudo para evaluar la precisión de diferentes métodos de ajuste. Esta métrica representa la desviación estándar de las diferencias entre los valores pronosticados y observados, proporcionando una medida que agrega las magnitudes de los errores del modelo estadístico a lo largo de diferentes instantes en una única métrica predictiva. La RMSE es adecuada para evaluar la precisión dentro de un mismo modelo o entre modelos que predicen la misma variable, pero no entre diferentes variables debido a su dependencia de la escala. Aunque la RMSE toma valores entre 0 y 1, un valor más bajo generalmente indica un modelo más preciso (M. H. Zhang, 2015). Su ecuación se expresa como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (X_i - x_i)^2} \quad (A.56)$$

A.5. Descripción de algunas distribuciones de probabilidad en el análisis de datos

A.5.1. Distribución de Weibull

La tecnología moderna ha permitido a los ingenieros desarrollar sistemas complejos cuyo funcionamiento y seguridad dependen de la fiabilidad de sus elementos. La distribución de Weibull se utiliza con frecuencia para modelar el tiempo hasta la falla de diversos sistemas físicos. Esta distribución ofrece gran flexibilidad gracias a sus parámetros, que permiten representar situaciones donde el número de fallas crece con el tiempo (por ejemplo, desgaste de rodamientos), decrece con el tiempo (como en algunos semiconductores) o permanece constante (fallas por choques externos al sistema). Además, los parámetros de Weibull son lo suficientemente versátiles para que su función de densidad de probabilidad adopte múltiples formas (Montgomery & Runger, 2018).

La función de densidad de probabilidad de la distribución de Weibull para una variable aleatoria se define como:

$$f(x|\alpha, \beta, \gamma) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right] & x > 0, x \geq \gamma; \alpha, \beta > 0; \gamma \in \mathbb{R} \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (A.57)$$

Denominada la **PDF de Weibull de tres parámetros**. Las letras griegas α , β y γ son los parámetros **de escala, de forma y de ubicación**, respectivamente.

Al sustituir $\gamma = 0$ en la Ecuación (A.57), se simplifica a:

$$f(x|\alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right] & x > 0; \alpha, \beta > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (A.58)$$

Llamada la **PDF de Weibull de dos parámetros**. El parámetro " α " es el asociado al **de escala** y " β " al **de forma**. Al modificar los valores de α y β ocasionará que se transforme la traza de la PDF de Weibull, consiguiendo ajustar la función a una amplia gama de datos (Haghighi & Wickramasinghe, 2020).

Las curvas de la distribución de Weibull con $\alpha = 1$ y diferentes valores del parámetro β se observa en la Figura A.24. Cuando $\beta = 1$, la distribución de Weibull equivale a la distribución exponencial. Para $\beta > 1$, las curvas adquieren una forma ligeramente acampanada, asemejándose a la distribución normal cuando $3 < \beta < 4$ (Haghighi & Wickramasinghe, 2020), aunque con cierta asimetría (Walpole et al., 2017). En particular, cuando $\beta = 2$, corresponde a la distribución de Rayleigh.

Para obtener los estimadores $\hat{\alpha}$ y $\hat{\beta}$ de los parámetros de escala y forma, respectivamente, mediante el método de máxima verosimilitud (likelihood), se resuelve mediante las Ecuaciones (A.59) y (A.60) simultáneas (Forbes et al., 2011):

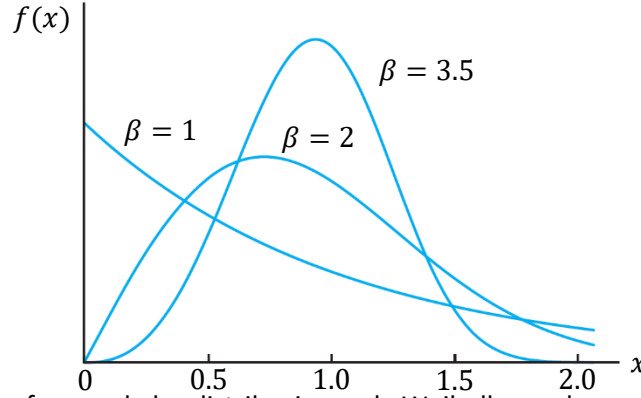


Figura A.24. Diversas formas de las distribuciones de Weibull cuando $\alpha = 1$ (Walpole et al., 2017).

$$\hat{\alpha} = \left[\left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n x_i^{\hat{\beta}} \right]^{1/\hat{\beta}} \quad (\text{A.59})$$

$$\hat{\beta} = \frac{n}{\left(\frac{1}{\hat{\alpha}} \right) \sum_{i=1}^n x_i^{\hat{\beta}} \log x_i - \sum_{i=1}^n \log x_i} \quad (\text{A.60})$$

La CDF para la distribución de Weibull está dada por la siguiente función:

$$F(x|\alpha, \beta) = \begin{cases} 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\alpha} \right)^{\beta} \right] & x \geq 0; \alpha, \beta > 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (\text{A.61})$$

A.5.2. Distribución Rayleigh

La distribución de Rayleigh es la distribución de Weibull cuando el parámetro de forma $\beta = 2$, que representa el caso promedio de distribuciones de viento en todo el mundo (M. H. Zhang, 2015). La densidad de probabilidad (PDF) es:

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{x}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (\text{A.62})$$

Donde σ es el modo de la distribución (es decir, el valor en el que la función de densidad de probabilidad alcanza su punto máximo); σ no es el valor promedio (en este caso, \bar{x}). Sin embargo, existe una correspondencia entre la velocidad media del viento y el modo de la PDF de Rayleigh (da-Rosa & Ordoñez, 2022):

$$\sigma^2 = \frac{2}{\pi} \bar{x}^2 \quad (\text{A.63})$$

Por lo tanto:

$$f(x) = \frac{\pi x}{2 \bar{x}^2} \exp \left[- \frac{\pi}{4} \left(\frac{x}{\bar{x}} \right)^2 \right] \quad (\text{A.64})$$

Y la CDF de Rayleigh es:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{x}{\bar{x}}\right)^2\right] \quad (\text{A.65})$$

A.5.3. Distribución Normal

La distribución normal, regularmente conocida como *distribución gaussiana* por los ingenieros, es una de las más importantes de todas las probabilidades y estadísticas (Carlton & Devore, 2022). Describe de manera aproximada numerosos fenómenos naturales, industriales y de investigación. Por ejemplo, las mediciones físicas en sondeos meteorológicos, análisis de lluvia y mediciones de piezas producidas frecuentemente se deducen apropiadamente con una distribución normal.

El punto de vista destacado de la distribución normal en la teoría de la probabilidad, la estadística y sus aplicaciones puede adjudicarse substancialmente por (Balakrishnan et al., 2020):

- Para muchas variables aleatorias que se estudian con frecuencia como: altura, peso, tamaño del calzado, rendimiento de los estudiantes en un examen, coeficiente intelectual, diámetros de los árboles, velocidades de las moléculas, etc.
- Errores aleatorios que aparecen en varias mediciones acostumbran a ser (aproximadamente) normales. En consecuencia, en ocasiones se llama como *distribución de error*.
- La suma y el promedio de numerosos valores de una variable aleatoria X pueden asemejarse por medio de una distribución normal, y esto es indiferente a la distribución original de X .
- Diversas distribuciones, tanto discretas como continuas, pueden aproximarse (en determinadas condiciones), debidamente a la distribución normal.

La PDF de una variable aleatoria que genera la distribución normal es:

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad x, \mu \in \mathbb{R}; \sigma > 0 \quad (\text{A.66})$$

Donde los dos parámetros " μ " y " σ^2 " constituyen el *promedio* y la *varianza* (σ = desviación estándar), respectivamente. Las expresiones para obtener estos valores son:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i \quad \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (x_i - \mu)^2 \quad (\text{A.67})$$

El promedio " μ " ubica el *centro* de la distribución y la traza es simétrica en este parámetro. Puesto que el área total bajo la curva de probabilidad es igual a 1, este equilibrio implica que el área a la derecha de " μ " sea 0.5 y a la izquierda en la misma cantidad, como se muestra en la Figura A.25. La *forma* de la distribución está prescrita por la desviación estándar (σ). La Figura A.26 exhibe algunas PDF normales con diferentes promedios y desviaciones estándar. Si " σ " aumenta, disminuye la altura de la curva y extiende la dispersión. Con valores reducidos de " σ " sucede lo contrario, crece la altura de la traza y decrece la disgregación.

Y la CDF normal es:

$$F(x|\mu, \sigma) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x - \mu}{\sigma \cdot \sqrt{2}}\right) \right] \quad (\text{A.68})$$

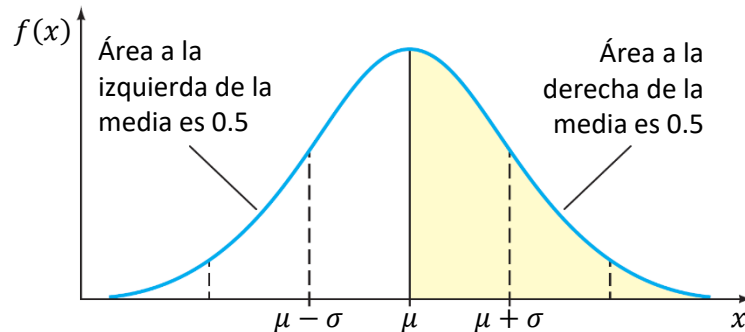


Figura A.25. Bosquejo de la distribución de probabilidad normal (Mendenhall III et al., 2020).

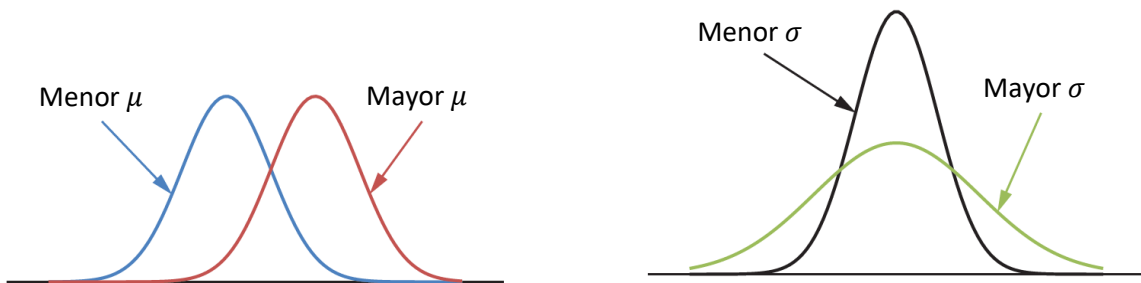


Figura A.26. Ejemplos de PDF con distintos parámetros de “ μ ” y “ σ ” (Ahn, 2019).

Donde erf se denomina la **función de error**, definida por:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-x}^x \exp[-t^2] dt = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp[-t^2] dt \quad (\text{A.69})$$

A.5.4. Distribución Gamma

La distribución gamma emerge en contextos donde el tiempo de espera para que acontezca un número finito de eventos independientes, estimando que ocurren a una velocidad constante y que las probabilidades de que suceda más de un evento en un intervalo reducido de tiempo son insignificantes. Esta distribución tiene aplicaciones en confiabilidad y teoría de colas, entre las que se encuentran:

- Las distribuciones en tiempo de: descompostura en componentes, instrumentos que necesitan recalibración después de una determinada cantidad de usos y espera de k clientes que llegarán a una tienda.
- Modelado en las cantidades de lluvia diaria en una región.
- En estudios de datos en exposición/contaminación, los modelos gamma se destinan como otra posibilidad a los modelos lognormal.
- Son potencialmente útiles para varios intereses en muchos ámbitos, por ejemplo: supervisión ambiental, monitoreo de aguas subterráneas, higiene industrial, investigación genética y control de calidad industrial (Krishnamoorthy, 2016).

Hay familias de distribuciones con uno, dos, tres e incluso cuatro parámetros estimadores; cada una con sus propias aplicaciones. En una distribución gamma con tres parámetros, denominados con las literales “ α ” (**de forma**), “ λ ” (**de escala o de tasa**) y “ l ” (**de ubicación**) (Haghighi & Wickramasinghe, 2020). Casos especiales de un parámetro, procedentes de la distribución gamma, son: *exponencial*, *Erlang* y *chi-cuadrada* (χ^2).

La *función de densidad de probabilidad de la distribución gamma de tres parámetros*, para una variable continua, está dada por:

$$f(x|\alpha, \lambda, l) = \begin{cases} \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)}(x-l)^{\alpha-1}\exp[-\lambda(x-l)] & x \geq l, \alpha, \lambda > 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (\text{A.70})$$

Donde $\Gamma(\alpha)$ es la *función gamma*, especificada como:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^x x^{\alpha-1} \exp[-x] dx \quad (\text{A.71})$$

Al hacer $l = 0$, entonces la Ecuación (A.70) se simplifica a la *función de densidad de probabilidad gamma de dos parámetros*, definida por la siguiente expresión:

$$f(x|\alpha, \lambda) = \begin{cases} \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)}(x)^{\alpha-1}\exp[-\lambda \cdot x] & \alpha, \lambda, x > 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (\text{A.72})$$

La PDF gamma, con un parámetro de forma (α) entero y positivo, se designa como la *distribución de Erlang*. Al hacer $\alpha = 1$, la pdf de Erlang concuerda con la *distribución exponencial* con parámetro “ λ ”. La distribución Gamma es una generalización de la PDF de Erlang cuando el parámetro “ α ” no es precisamente un número entero (Balakrishnan et al., 2020).

A.5.5. Distribución Lognormal

Es aplicable en problemas físicos cuando la variable aleatoria X toma únicamente valores positivos y su histograma presenta una *asimetría marcada hacia la derecha*. Específicamente, esta distribución es adecuada si la transformación logarítmica natural de los datos satisface el supuesto de normalidad (Krishnamoorthy, 2016). En ciertos casos, no es posible utilizar la distribución normal debido a la presencia de valores negativos en la variable aleatoria, por lo que la distribución lognormal se convierte en una alternativa conveniente.

Esta distribución se ha empleado en ingeniería, medicina y, más recientemente, en finanzas. Ejemplos prácticos incluyen:

- Representación de datos de posición global, como los obtenidos por sistemas de posicionamiento global (GPS) para vehículos seleccionados.
- Distribuciones de velocidad del viento.

- Análisis de datos de exposición (como los recopilados en trabajadores expuestos a contaminantes o productos químicos).
- Pérdidas financieras ocasionadas por desastres naturales (como incendios o tifones).
- En hidrología, los logaritmos de máximos anuales de precipitaciones diarias suelen ser aproximadamente normales, fenómeno similar al observado con los volúmenes de descarga de ríos.
- Vida útil de productos que se degradan con el tiempo, como es el caso de los láseres semiconductores.

La transformación logarítmica adaptada a los datos permite aproximarlos a una distribución normal simétrica; no obstante, la ausencia de valores negativos puede limitar la validez de este procedimiento (Forbes et al., 2011).

Una variable aleatoria continua X sigue una **distribución lognormal** si la variable transformada $Y = \ln(X)$ presenta una distribución normal con media μ y desviación estándar σ . La PDF de X se expresa como:

$$f(x|\mu, \sigma) = \begin{cases} \frac{1}{x \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} [\ln(x) - \mu]^2\right\} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (\text{A.73})$$

La media $E(X)$ y la varianza $V(X)$ de X se calculan como:

$$E(X) = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad V(X) = [\exp(\sigma^2) - 1] \cdot \exp(2\mu + \sigma^2) \quad (\text{A.74})$$

Los parámetros de la distribución lognormal son μ y σ^2 , que corresponden a la media y varianza de la variable normal Y . Sin embargo, la media y varianza de X dependen de estas relaciones (Ecuación (A.74)). En la Figura A.27 se señala las PDF lognormal para tres conjuntos de parámetros. Una característica coincidente de estas curvas es su asimetría positiva, donde la “cola” derecha se alarga más, siendo este efecto más pronunciado cuando $\sigma = 1$ y menos evidente al disminuir σ (Balakrishnan et al., 2020).

La CDF de la variable aleatoria Y , que sigue una distribución lognormal, se define considerando que X es una variable aleatoria con distribución normal parametrizada por μ and σ^2 (Haghighi & Wickramasinghe, 2020). La expresión matemática es:

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{t \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(t) - \mu]^2}{2\sigma^2}\right\} dt \quad (\text{A.75})$$

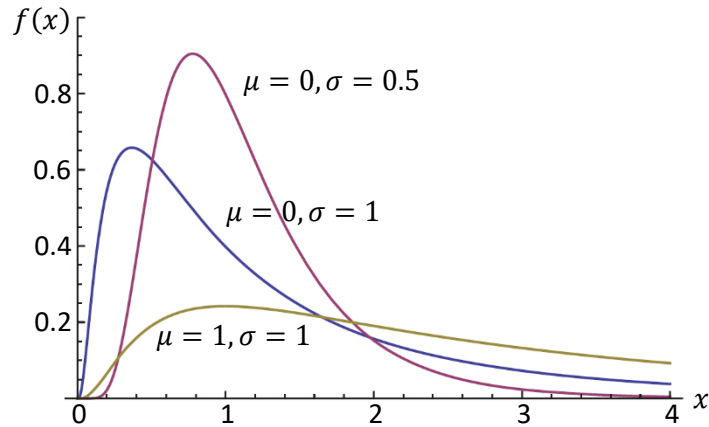


Figura A.27. Funciones de densidad de probabilidad lognormal para distintos valores de los parámetros μ y σ^2 (Balakrishnan et al., 2020).

A.6. Exploración de los datos en el área de estudio en Matlab®

El software MATLAB® ofrece las herramientas necesarias para llevar a cabo este cometido. A continuación, se mostrarán los pasos y resultados de dicho análisis.

- La distribución de densidad (PDF) de los datos de entrada de velocidad es la mostrada en la Figura A.28.
- Al aplicar la función “New Fit...” y configurar la distribución de Rayleigh, puede observarse la PDF y el parámetro estimador, ilustrado en la Figura A.29.
- De nuevo, al hacer uso de la función “New Fit...”, se establece la distribución Normal. La PDF y los parámetros estimadores se muestran en la Figura A.30.
- Para estas dos funciones de probabilidad, también puede mostrarse las CDF en este software, como se representa en la Figura A.31.
- Similarmente, las gráficas de no excedencia (Probability plot) en MATLAB®, en la escala de la función Normal, están ilustradas en la Figura A.32.
- Regresando a las funciones PDF, ahora se traza la de Weibull, que se gráfica en la Figura A.33 con sus parámetros estimadores.
- La gráfica PDF que se traza es la Gamma, mostrada en la Figura A.34 con sus parámetros estimadores.
- Por último, la función PDF que se delinea es la Lognormal, representada en la Figura A.35 con sus parámetros estimadores.

En conjunto, todas las funciones anteriormente mencionadas, se reproducen en la Figura A.36. Al observar estas gráficas, a simple vista parece que la curva gris (Gamma) es la que mejor se ajusta a los datos de velocidad del viento para el área de evaluación, pero no es un criterio muy objetivo para determinar cuál es la más adecuada. Un indicador en MATLAB que nos puede guiar para hacer una elección con un mejor argumento es comparar el “Logaritmo de verosimilitud (Log likelihood)”, el cuál considera que mientras más cercano este del cero, es un indicativo de que la curva se ajusta mejor a los datos iniciales. Además, este software nos permite obtener la tabulación de las PDF’s para, posteriormente, determinar la frecuencia relativa y contar con otros elementos estadísticos que nos ayuden a hacer una elección acertada de la distribución de probabilidad para los datos del viento y hacer un pronóstico adecuado con respecto al potencial eólico que se puede esperar.

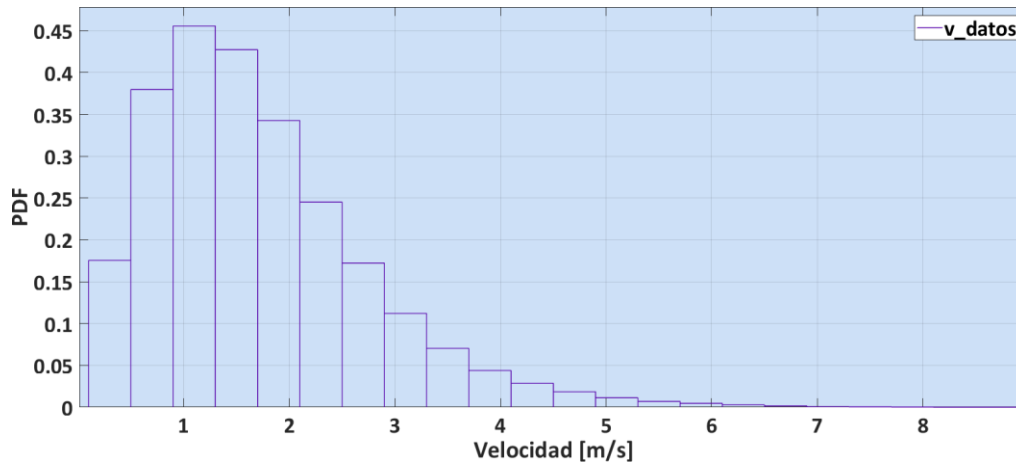


Figura A.28. Distribución de densidad (PDF) de los datos del viento en MATLAB® (elaboración propia).

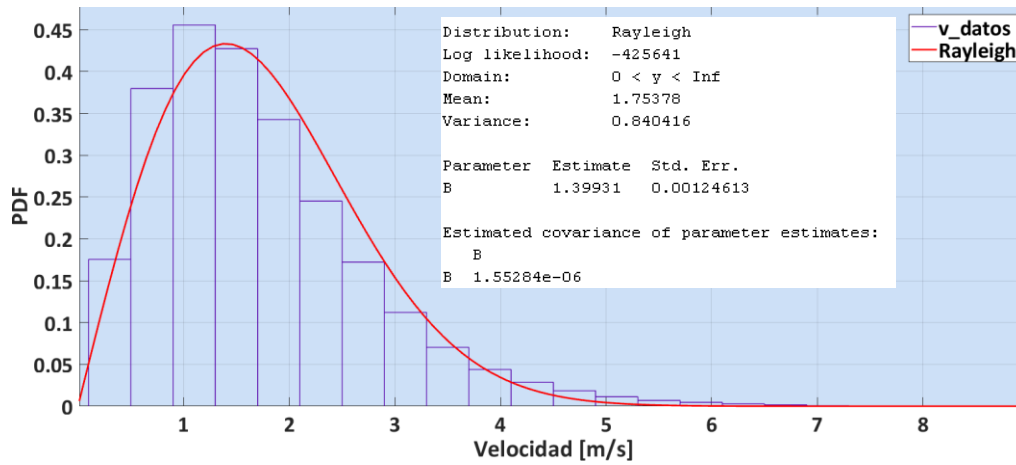


Figura A.29. PDF de Rayleigh junto con sus valores característicos en MATLAB® (elaboración propia).

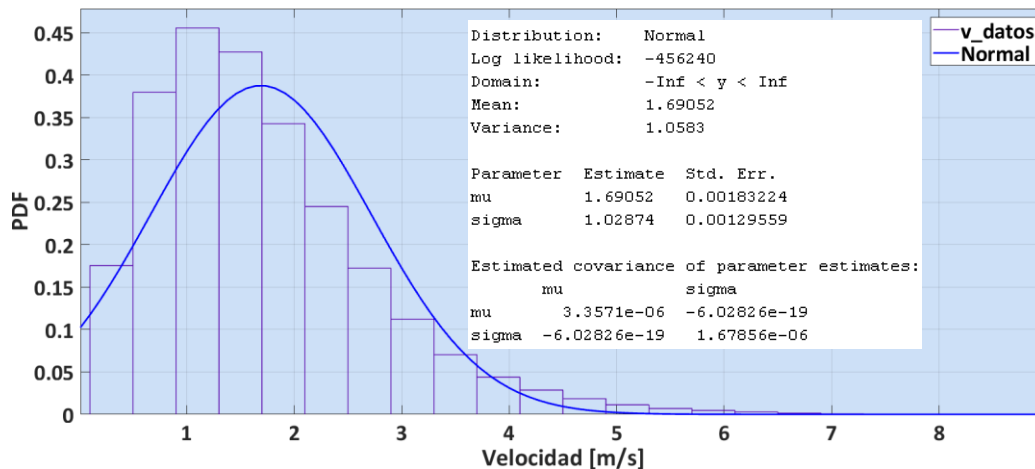


Figura A.30. PDF Normal con sus valores característicos en MATLAB® (elaboración propia).

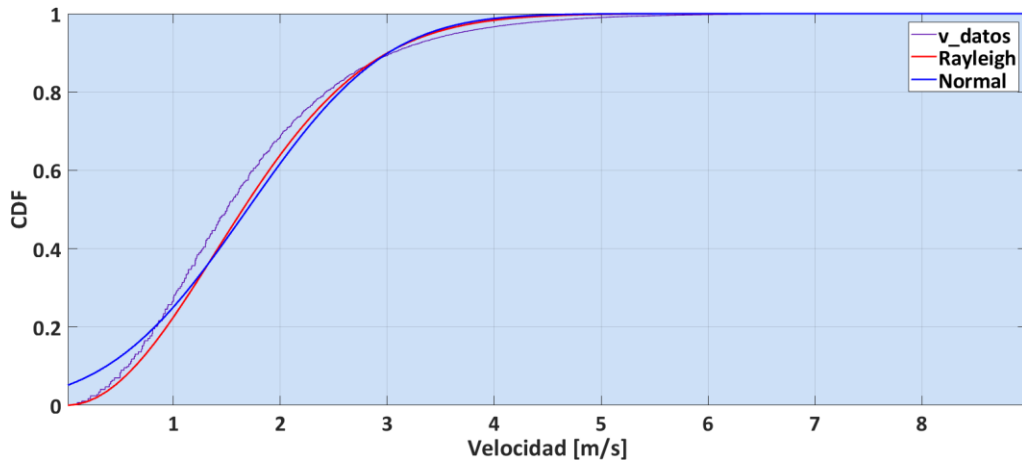


Figura A.31. Funciones CDF para la distribución de Rayleigh y Normal en MATLAB® (elaboración propia).

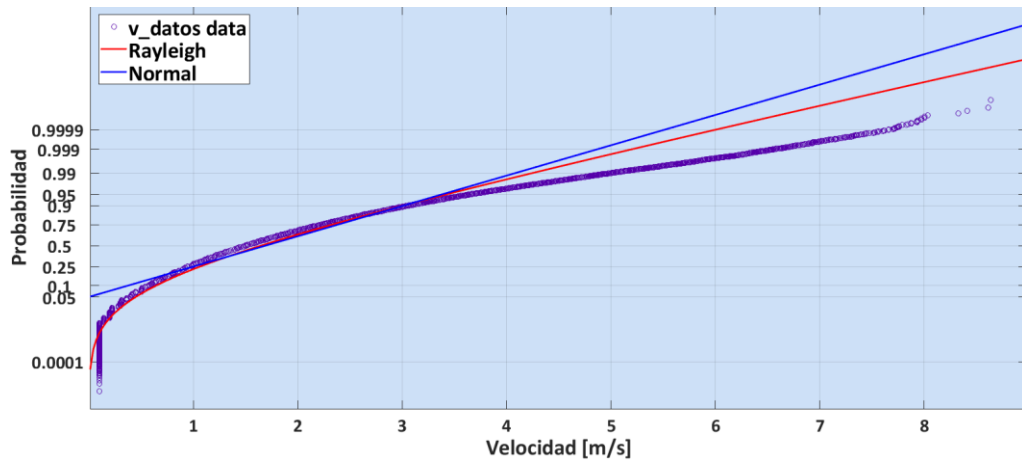


Figura A.32. Funciones de no excedencia para la distribución de Rayleigh y Normal en MATLAB® (elaboración propia).

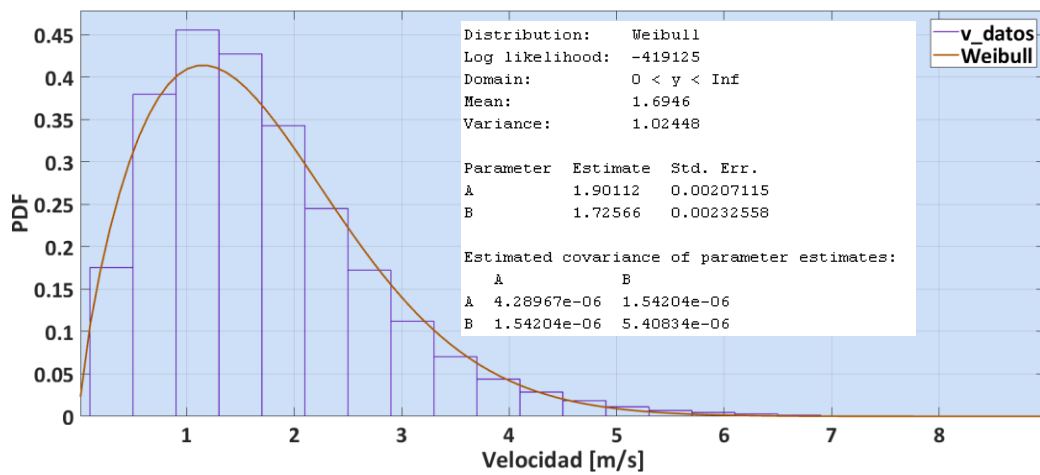


Figura A.33. PDF Weibull con sus valores característicos en MATLAB® (elaboración propia).

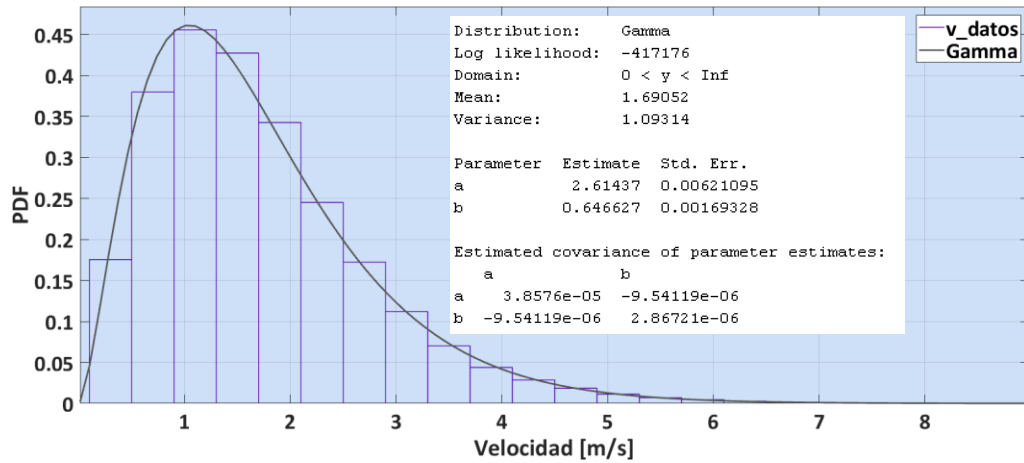


Figura A.34. PDF Gamma con sus valores característicos en MATLAB® (elaboración propia).

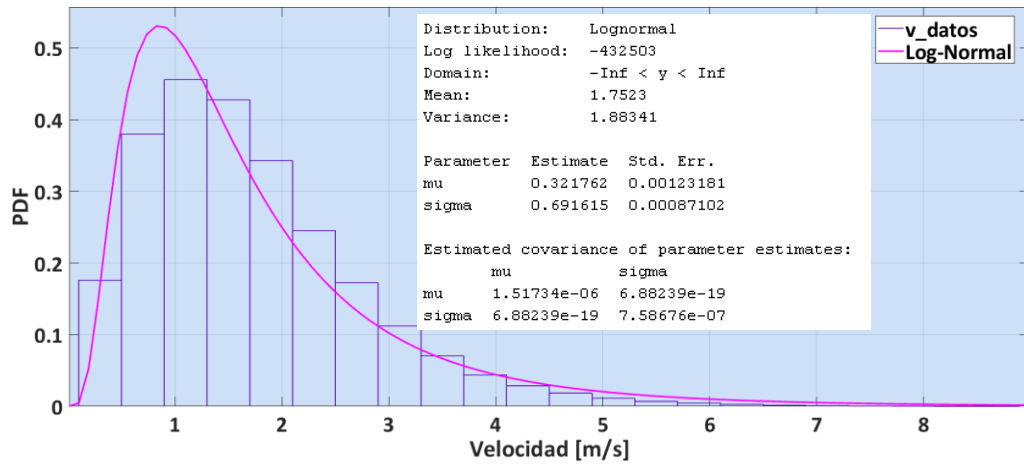


Figura A.35. PDF Lognormal con sus valores característicos en MATLAB® (elaboración propia).

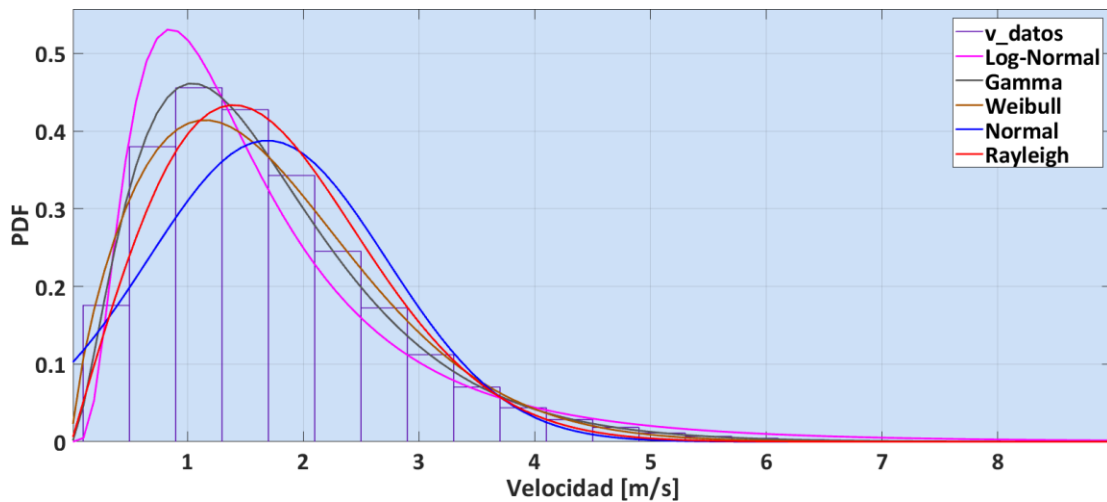


Figura A.36. Curvas PDF examinadas dentro de MATLAB® para los datos del viento de la región de observación (elaboración propia).

A.7. Intensidad de la turbulencia y relación de viscosidad turbulenta

La **intensidad de la turbulencia I** , se define como el cociente entre la raíz cuadrada media de las fluctuaciones de velocidad (u') y la velocidad promedio del flujo (\bar{u}). En el software ANSYS–Fluent, el valor prestablecido es de 5% para un nivel de intensidad de la turbulencia promedio (ANSYS Inc., 2020).

A medida que la intensidad de la turbulencia se acerca a cero, el flujo se vuelve cada vez menos turbulento, mientras que un valor cercano a uno implica grandes fluctuaciones de velocidad; puede variar desde 0.003 para perfiles sobresalientemente aerodinámicos, hasta 0.3 para los flujos de capa límite atmosféricos. Este parámetro debe aproximarse con el mayor cuidado posible según la aplicación específica. La Tabla A.1 muestra algunas estimaciones de I para varios sistemas y condiciones generales (Rodríguez, 2019).

Tabla A.1. Algunos valores de referencia para la intensidad de la turbulencia (I).

Sistema o condición general	I
Perfiles aerodinámicos	0.003
Flujos centrales	0.02 – 0.05
Tuberías, conductos, flujos internos simples de intermedio a elevados Re	0.02 – 0.12
Flujos de velocidad elevada en sistemas complejos (por ejemplo, turbomáquinas, intercambiadores de calor, deflectores, dispositivos de turbulencia alta, cerca de la pared)	0.05 – 0.2
Flujos de capa límite atmosférica, ráfagas de viento, tornados, huracanes, fronteras oscilantes	0.3

Fuente: Rodríguez, 2019.

La **razón de viscosidad turbulenta μ_t/μ** , es directamente proporcional al número de Reynolds turbulento ($Re_t \equiv k^2/(\varepsilon \cdot \nu)$). El número Re_t es grande (del orden de 100 a 1000) en capas límite con número de Reynolds elevados, capas de corte y flujos en conductos completamente desarrollados. En contraste, en fronteras de corriente libre de la mayoría de los flujos externos es bastante reducido. Comúnmente, esta proporción se encuentra entre $1 < \mu_t/\mu < 10$. El valor por defecto para la relación de viscosidad turbulenta es 10 (ANSYS Inc., 2020).



PUBLICACIONES Y CONTRIBUCIONES ACADÉMICAS

“Nunca dejes que tus fracasos lleguen a tu corazón
o que tu éxito llegue a tu cabeza”

Soichiro Honda

PUBLICACIONES Y CONTRIBUCIONES ACADÉMICAS

Artículos en revistas:

- Sánchez-Pozos, M., López-Rebollar, B. M., Palacios-González, J. C., & Marín-Aguilar, J. C. (2025). Evaluación del coeficiente de potencia con esquemas DMST para rotores Darrieus con perfiles biomimetizados. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 26(01), 1-12.
<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2025.26.1.004>
- Marín-Aguilar, J. C., Sánchez-Pozos, M., Palacios-González, J. C., & López-Rebollar, B. M. (2025). Análisis aerodinámico de álabes Darrieus biomimetizado con aleta de ballena jorobada mediante CFD. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 26(01), 1-13.
<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2025.26.1.005>

Presentaciones en conferencias:

Nombre:

Exposición de los proyectos de investigación del posgrado (MCI y DCI).

Tema:

Modificación del perfil aerodinámico para un rotor de un aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus tripala bionspirado en la aleta de la ballena jorobada.

Fecha:

1 de julio de 2021.

Evento:

Coloquio de Sistemas Energéticos del semestre 2021A.

Nombre:

Actividades Pre-Congreso.

Tema:

Evaluación probabilística del potencial eólico en una región representativa del valle de Toluca para el diseño de los álabes de una aeroturbina de eje vertical de baja potencia.

Fecha:

9 de noviembre de 2021.

Evento:

4° Coloquio de Investigación en Ingeniería. 13° Curso-Taller en Temas Actuales en Ciencias del Agua.

Nombre:

Actividades Pre-Congreso.

Tema:

Propuesta de modificación y análisis mediante CFD del perfil aerodinámico para un rotor de un aerogenerador de eje vertical bioinspirado en la aleta de la ballena jorobada.

Fecha:

7 de noviembre de 2022.

Evento:

5° Coloquio de Investigación en Ingeniería. 13° Curso-Taller en Temas Actuales en Ciencias del Agua.



REFERENCIAS

“Algunos sueñan para evadir la realidad,
otros sueñan para cambiarla”

Soichiro Honda

REFERENCIAS

- Abate, G. (2019). *A numerical investigation into the aerodynamic effects of tubercles in wind turbine blades* [Doctoral Thesis]. Georgia Institute of Technology.
- Abate, G., & Mavris, D. N. (2018, January 8). Performance Analysis of Different Positions of Leading Edge Tubercles on a Wind Turbine Blade. *2018 Wind Energy Symposium*.
<https://doi.org/10.2514/6.2018-1494>
- Açikel, H. H., Tosun, M., Genç, M. S., & Koca, K. (2022). Numerical investigation on NACA0012 airfoil with tubercular structure. *EPJ Web of Conferences*, 269, 01001.
<https://doi.org/10.1051/epjconf/202226901001>
- Aftab, S. M. A. (2017). *Numerical and experimental study of leading edge tubercles with vortex generators on NACA 4415 airfoil* [Doctoral Thesis, Universiti Putra Malaysia].
<http://psasir.upm.edu.my/id/eprint/71146/1/FK%202017%2039%20UPMIR.pdf>
- Aftab, S. M. A., Razak, N. A., Mohd Rafie, A. S., & Ahmad, K. A. (2016). Mimicking the humpback whale: An aerodynamic perspective. *Progress in Aerospace Sciences*, 84, 48–69.
<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.03.002>
- Ahn, H. (2019). *Probability and Statistics for Science and Engineering with Examples in R* (2nd ed.). Cognella Academic Publishing.
- Ajayi, O. A. (2012). *Application of automotive alternators in small wind turbines* [Master Thesis]. Technische Universiteit Delft.
- Akbar, M. A., & Mustafa, V. (2019). Demand factor definition—A dimensionless parameter for Vertical Axis Wind Turbines. *MethodsX*, 6, 567–581. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.03.003>
- Alaimo, A., Esposito, A., Messineo, A., Orlando, C., & Tumino, D. (2015). 3D CFD Analysis of a Vertical Axis Wind Turbine. *Energies*, 8(4), 3013–3033. <https://doi.org/10.3390/en8043013>
- Alizadeh, M. (2022). Optimization methods. In *Wind Energy Engineering. Fundamentals of Wind Farm Aerodynamic Layout Design*. Academic Press.
- ANSYS Inc. (2020). *ANSYS Fluent User's Guide*. <https://es.scribd.com/document/478910198/ANSYS-Fluent-Tutorial-Guide-2020-R2-pdf>
- Ashwindran, S., Azizuddin, A. A., & Oumer, A. N. (2019). Computational fluid dynamic (CFD) of vertical-axis wind turbine: mesh and time-step sensitivity study. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 13(3), 5604–5624. <https://doi.org/10.15282/jmes.13.3.2019.24.0450>
- Ayati, A. A., Steiros, K., Miller, M. A., Duvvuri, S., & Hultmark, M. (2019). A double-multiple streamtube model for vertical axis wind turbines of arbitrary rotor loading. *Wind Energy Science*, 4(4), 653–662. <https://doi.org/10.5194/wes-4-653-2019>
- Balakrishnan, N., Koutras, M. V., & Politis, K. G. (2020). *Introduction to Probability: Models and Applications*. John Wiley & Sons, Inc.
- Bangga, G., Hutani, S., & Heramarwan, H. (2021). The Effects of Airfoil Thickness on Dynamic Stall Characteristics of High-Solidity Vertical Axis Wind Turbines. *Advanced Theory and Simulations*, 4(6). <https://doi.org/10.1002/adts.202000204>
- Basri, E. I., Basri, A. A., & Ahmad, K. A. (2023). Computational Fluid Dynamics Analysis in Biomimetics Applications: A Review from Aerospace Engineering Perspective. *Biomimetics*, 8(3), 319.
<https://doi.org/10.3390/biomimetics8030319>
- Batista, N. C., Melício, R., Mendes, V. M. F., Figueiredo, J., & Reis, A. H. (2013). *Darrieus Wind Turbine Performance Prediction: Computational Modeling* (pp. 382–391). https://doi.org/10.1007/978-3-642-37291-9_41

- Bere, P., Ciobanu, R., Ciobanu, O., & Guțu, M. (2021). Design and Manufacturing Method of GFRP Blades for Vertical Axis Wind Turbine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1190(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1190/1/012022>
- Beri, H., & Yao, Y. (2011). Double Multiple Streamtube Model and Numerical Analysis of Vertical Axis Wind Turbine. *Energy and Power Engineering*, 03(03), 262–270. <https://doi.org/10.4236/epe.2011.33033>
- Bhatia, D., Yadav, D., & Xie, C. (2022). Aerodynamic drag reduction through sharkskin denticle: an experimental approach. In S. Easa (Ed.), *Seventh International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2022)* (p. 16). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2645374>
- Bhushan, B. (2018). *Biomimetics. Bioinspired Hierarchical-Structured Surfaces for Green Science and Technology* (3rd ed., Vol. 279). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71676-3>
- Blaabjerg, F., & Ionel, D. M. (2017). *Renewable Energy Devices and Systems with Simulations in MATLAB® and ANSYS®* (F. Blaabjerg & D. M. Ionel, Eds.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315367392>
- Bolzon, Michael D., Kelso, R. M., & Arjomandi, M. (2016). Tubercles and Their Applications. *Journal of Aerospace Engineering*, 29(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0000491](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000491)
- Bos, R. (2012). *Self-starting of a small urban Darrieus rotor. Strategies to boost performance in low-Reynolds-number flows* [Master Thesis]. Technische Universiteit Delft.
- Bozorgi, A., & Zarei, M. J. (2024). Effect of Blade Thickness on Noise Pollution of H-type Darrieus Wind Turbines: A Numerical study. *Iranica Journal of Energy and Environment*, 15(1), 56–66. <https://doi.org/10.5829/IJEE.2024.15.01.06>
- Burton, T., Jenkins, N., Bossanyi, E., Sharpe, D., & Graham, M. (2021). *Wind Energy Handbook* (3rd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119451143>
- Carlton, M. A., & Devore, J. L. (2022). *Probability with Applications in Engineering, Science, and Technology* (2nd ed.). Springer International Publishing AG.
- Carraro, M., De Vanna, F., Zweiri, F., Benini, E., Heidari, A., & Hadavinia, H. (2022). CFD Modeling of Wind Turbine Blades with Eroded Leading Edge. *Fluids*, 7(9), 302. <https://doi.org/10.3390/fluids7090302>
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., & Ghajar, A. J. (2021). *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences* (6th ed.). McGraw Hill LLC.
- Choi, J., & Lee, K. Y. (2022). *Probabilistic Power System Expansion Planning with Renewable Energy Resources and Energy Storage Systems*. John Wiley & Sons.
- Corke, T., & Nelson, R. (2018). *Wind Energy Design*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b22301>
- Custodio, D. (2012). *The Effect of Humpback Whale-Like Leading Edge Protuberances on Hydrofoil Performance* [Doctoral Thesis, Worcester Polytechnic Institute]. <https://digital.wpi.edu/downloads/4m90dv63t>
- Dabachi, M. A., Rahmouni, A., & Bouksour, O. (2020). Design and aerodynamic performance of new Floating H-Darrieus Vertical Axis Wind Turbines. *Materials Today: Proceedings*, 30, 899–904. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.347>
- Dabachi, M. A., Rahmouni, A., Rusu, E., & Bouksour, O. (2020). Aerodynamic Simulations for Floating Darrieus-Type Wind Turbines with Three-Stage Rotors. *Inventions*, 5(2), 18. <https://doi.org/10.3390/inventions5020018>
- da-Rosa, A. V., & Ordoñez, J. C. (2022). *Fundamentals of Renewable Energy Processes* (4th ed.). Academic Press.

- De Tavernier, D. A. M. (2021). *Aerodynamic advances in vertical-axis wind turbines* [Doctoral Thesis]. Technische Universiteit Delft.
- De Tavernier, D., Ferreira, C., & Goude, A. (2022). Vertical-Axis Wind Turbine Aerodynamics. In *Handbook of Wind Energy Aerodynamics* (pp. 1317–1361). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31307-4_64
- Du, L., Dominy, R. G., & Ingram, G. (2020, September 21). Experimental Investigation of the Performance of H-Darrieus Wind Turbines With Tubercle Leading Edge Blades. *Volume 12: Wind Energy*. <https://doi.org/10.1115/GT2020-14156>
- Du, L., Ingram, G., & Dominy, R. G. (2019). A review of H-Darrieus wind turbine aerodynamic research. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(23–24), 7590–7616. <https://doi.org/10.1177/0954406219885962>
- Earnest, J., & Rachel, S. (2019). *Wind Power Technology* (3rd ed.). PHI Learning Private Limited.
- Emam, A., Wahba, E. M., & Adam, I. G. (2021). Experimental Investigation for The Influences of Bio-Inspired Tubercles Length on Aerodynamic Performance of Highly Cambered Airfoils in Low-Re Transient-Flow Regime. *2021 6th International Conference on Mechanical Engineering and Robotics Research (ICMERR)*, 77–82. <https://doi.org/10.1109/ICMERR54363.2021.9680824>
- Erfort, G. (2019). *Numerical Investigation of a Novel Blade for Use in Vertical Axis Wind Turbines* [Doctoral Thesis, University of Stellenbosch]. <https://scholar.sun.ac.za/server/api/core/bitstreams/6bc5252d-7951-47f8-b45f-1fdf9745d027/content>
- Fayemi, P. E., Wanieck, K., Zollfrank, C., Maranzana, N., & Aoussat, A. (2017). Biomimetics: process, tools and practice. *Bioinspiration & Biomimetics*, 12(1), 011002. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/12/1/011002>
- Fernández-Díez, P. (1993). *Energía Eólica*. Universidad de Cantabria. Servicio de Publicaciones.
- Fernández-Oro, J. M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Reverté S. A.
- Fish, F. E., & Battle, J. M. (1995). Hydrodynamic design of the humpback whale flipper. *Journal of Morphology*, 225(1), 51–60. <https://doi.org/10.1002/jmor.1052250105>
- Fish, F. E., & Lauder, G. V. (2006). PASSIVE AND ACTIVE FLOW CONTROL BY SWIMMING FISHES AND MAMMALS. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 38(1), 193–224. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092201>
- Fish, F. E., Weber, P. W., Murray, M. M., & Howle, L. E. (2011a). Marine Applications of the Biomimetic Humpback Whale Flipper. *Marine Technology Society Journal*, 45(4), 198–207. <https://doi.org/10.4031/MTSJ.45.4.1>
- Fish, F. E., Weber, P. W., Murray, M. M., & Howle, L. E. (2011b). The Tubercles on Humpback Whales' Flippers: Application of Bio-Inspired Technology. *Integrative and Comparative Biology*, 51(1), 203–213. <https://doi.org/10.1093/icb/icr016>
- Fluid Mechanics 101. (2021). *Calculators & Tools*. <https://www.fluidmechanics101.com/pdf/calculators.pdf>
- Forbes, C., Evans, M., Hastings, N., & Peacock, B. (2011). *Statistical Distributions* (4th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Gaitan-Aroca, J., Sierra, F., & Castellanos Contreras, J. U. (2020). Bio-Inspired Rotor Design Characterization of a Horizontal Axis Wind Turbine. *Energies*, 13(14), 3515. <https://doi.org/10.3390/en13143515>
- Galetta, M. (2019). *Impact of dynamic stall on VAWT performance: implementation into a Double Multiple Stream-Tube tool and quantification of model uncertainty* [Master Thesis]. Politecnico di Milano.

- Gerrie, C., Islam, S. Z., Gerrie, S., Turner, N., & Asim, T. (2023). 3D CFD Modelling of Performance of a Vertical Axis Turbine. *Energies*, *16*(3), 1144. <https://doi.org/10.3390/en16031144>
- Ghiasi, P., Najafi, G., Ghobadian, B., & Jafari, A. (2021). Analytical and Numerical Solution for H-type Darrieus Wind Turbine Performance at the Tip Speed Ratio of Below One. *International Journal of Renewable Energy Development*, *10*(2), 269–281. <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.33169>
- Ghiasi, P., Najafi, G., Ghobadian, B., Jafari, A., & Mazlan, M. (2022). Analytical Study of the Impact of Solidity, Chord Length, Number of Blades, Aspect Ratio and Airfoil Type on H-Rotor Darrieus Wind Turbine Performance at Low Reynolds Number. *Sustainability*, *14*(5), 2623. <https://doi.org/10.3390/su14052623>
- Gidde, S. T. R., Islam, S., Kim, A., & Hutapea, P. (2023). Experimental study of mosquito-inspired needle to minimize insertion force and tissue deformation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, *237*(1), 113–123. <https://doi.org/10.1177/09544119221137133>
- Gipe, P., & Möllerström, E. (2022). An overview of the history of wind turbine development: Part I—The early wind turbines until the 1960s. *Wind Engineering*, *46*(6), 1973–2004. <https://doi.org/10.1177/0309524X221117825>
- Gipe, P., & Möllerström, E. (2023). An overview of the history of wind turbine development: Part II—The 1970s onward. *Wind Engineering*, *47*(1), 220–248. <https://doi.org/10.1177/0309524X221122594>
- Gitifar, S., Zahedi, R., Ziaie, S., Mirzaei, A. M., & Forootan, M. M. (2024). Review of different vertical axis wind turbine modeling methods. *Future Energy*, *3*(1), 23–33. <https://doi.org/10.55670/fpll.fuen.3.1.4>
- González, A., & Hinojosa, J. (2019). Study of the influence of protuberances in the trailing edge of airfoils and determination of their aerodynamic efficiency through CFD using Ansys Fluent. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, *35*. <https://doi.org/10.23967/j.rimni.2019.07.001>
- Gopinathan, V., & Bruce Ralphin Rose, J. (2021). Aerodynamics with state-of-the-art bioinspired technology: Tubercles of humpback whale. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, *235*(16), 2359–2377. <https://doi.org/10.1177/09544100211001501>
- Gopinathan, V. T., Bruce Ralphin Rose, J., & Surya, M. (2020). Investigation on the effect of leading edge tubercles of sweptback wing at low Reynolds number. *Mechanics & Industry*, *21*(6), 621. <https://doi.org/10.1051/meca/2020095>
- Gopinathan, V. T., & Ralphin Rose, J. B. (2023). Aerodynamic performance characterization of bio-inspired wings with leading edge tubercles at low Reynolds number. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, *237*(3), 561–586. <https://doi.org/10.1177/09544100221103737>
- Haghighi, A. M., & Wickramasinghe, I. (2020). *Probability, Statistics, and Stochastic Processes for Engineers and Scientists*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351238403>
- Hamilton, B. W., Tutunea-Fatan, O. R., & Bordatchev, E. V. (2023). Drag Reduction by Fish-Scale Inspired Transverse Asymmetric Triangular Riblets: Modelling, Preliminary Experimental Analysis and Potential for Fouling Control. *Biomimetics*, *8*(3), 324. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8030324>
- Hansen, K. L., Kelso, R. M., & Dally, B. B. (2011). Performance Variations of Leading-Edge Tubercles for Distinct Airfoil Profiles. *AIAA Journal*, *49*(1), 185–194. <https://doi.org/10.2514/1.J050631>
- Hansen, K. L., Rostamzadeh, N., Kelso, R. M., & Dally, B. B. (2016). Evolution of the streamwise vortices generated between leading edge tubercles. *Journal of Fluid Mechanics*, *788*, 730–766. <https://doi.org/10.1017/jfm.2015.611>

- Hapsari, F. N., Purwaningsih, R., Azzahra, F., & Sari, D. P. (2022). Velcro Product Design with Biomimicry Approaches. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1111(1), 012057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1111/1/012057>
- Hasan, M. R., Islam, Md. R., Shahariar, G. M. H., & Mashud, M. (2014). Numerical analysis of vertical axis wind turbine. *2014 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, 318–321. <https://doi.org/10.1109/IFOST.2014.6991130>
- Hibbeler, R. C. (2021). *Fluid Mechanics in SI Units* (2nd ed.). Pearson Education, Inc.
- Hoffmann, K. A., Chen, T. G., Cutkosky, M. R., & Lentink, D. (2023). Bird-inspired robotics principles as a framework for developing smart aerospace materials. *Journal of Composite Materials*, 57(4), 679–710. <https://doi.org/10.1177/00219983231152663>
- Hryniuk, J. T., & Bohl, D. G. (2020). The effects of leading-edge tubercles on dynamic stall. *Journal of Fluid Mechanics*, 893, A5. <https://doi.org/10.1017/JFM.2020.216>
- Hu, W. (Ed.). (2018). *Advanced Wind Turbine Technology*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-78166-2>
- Huang, G.-Y., Shiah, Y. C., Bai, C.-J., & Chong, W. T. (2015). Experimental study of the protuberance effect on the blade performance of a small horizontal axis wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 147, 202–211. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.10.005>
- Hussany, F. L. (2023). Darrieus' Turbine Design on the International Road Basra-Al-Amarah. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 8(1), 32–40. <https://doi.org/10.24018/ejeng.2023.8.1.2936>
- Islam, M., Ting, D., & Fartaj, A. (2008). Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 1087–1109. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.023>
- Jaffe, R. L., & Taylor, W. (2018). *The Physics of Energy*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139061292>
- Jain, S., & Saha, U. K. (2020). On the influence of blade thickness-to-chord ratio on dynamic stall phenomenon in H-type Darrieus wind rotors. *Energy Conversion and Management*, 218, 113024. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113024>
- Jamieson, P., & Morgan, L. (2022). Trends, Prospects and R&D Directions in Wind Turbine Technology. In *Comprehensive Renewable Energy* (pp. 817–853). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00176-X>
- Johari, H., Henoch, C., Custodio, D., & Levshin, A. (2007). Effects of Leading-Edge Protuberances on Airfoil Performance. *AIAA Journal*, 45(11), 2634–2642. <https://doi.org/10.2514/1.28497>
- Jose, N., Velrajan, M., & Ganesh, K. (2021). Preliminary Study to Exploit Bioenergy from Luminescent Bacteria. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3902675>
- Kaldellis, J. K., & Boulogiorgou, D. (2022). Social Acceptability of Wind Power Projects. In *Comprehensive Renewable Energy* (pp. 628–643). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00159-X>
- Kanoğlu, M., Çengel, Y. A., & Cimbalı, J. M. (2020). *Fundamentals and Applications of Renewable Energy*. McGraw-Hill Education.
- Karimian, S. M. H., & Abdolahifar, A. (2020). Performance investigation of a new Darrieus Vertical Axis Wind Turbine. *Energy*, 191, 116551. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116551>
- Khalid, M. S. U., Portocarrero Mendoza, P. S., Wood, D., & Hemmati, A. (2024). On the aerodynamics of dual-stage co-axial vertical-axis wind turbines. *Wind Engineering*, 48(3), 408–424. <https://doi.org/10.1177/0309524X231212638>
- Khedr, A. A., Adam, I., Ookawara, S., El-Wardany, A., & Hassan, H. (2021, November 1). An Experimental Investigation Onto the Effect of Two Design Methods of Leading-Edge Tubercles

- on the Aerodynamic Performance of a High Lift Airfoil at Low Reynolds Number. *Volume 4: Advances in Aerospace Technology*. <https://doi.org/10.1115/IMECE2021-70292>
- Kobæk, C. M., & Hansen, M. O. L. (2016). Numerical study of Wavy Blade Section for Wind Turbines. *Journal of Physics: Conference Series*, 753, 022039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/753/2/022039>
- Korukcu, M. O. (2019). Numerical Investigation of Vertical Axis Wind Turbine for Different Parameters. *2019 4th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, 1–5. <https://doi.org/10.23919/SpliTech.2019.8783100>
- Krishnamoorthy, K. (2016). *Handbook of Statistical Distributions with Applications*. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/b19191>
- Kumar, P. M., Rashmitha, S. R., Srikanth, N., & Lim, T.-C. (2017). Wind Tunnel Validation of Double Multiple Streamtube Model for Vertical Axis Wind Turbine. *Smart Grid and Renewable Energy*, 08(12), 412–424. <https://doi.org/10.4236/sgre.2017.812027>
- Kumar, P. M., Sivalingam, K., Narasimalu, S., Lim, T.-C., Ramakrishna, S., & Wei, H. (2019). A Review on the Evolution of Darrieus Vertical Axis Wind Turbine: Small Wind Turbines. *Journal of Power and Energy Engineering*, 07(04), 27–44. <https://doi.org/10.4236/jpee.2019.74002>
- Kumar, R., Raahemifar, K., & Fung, A. S. (2018). A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 281–291. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.033>
- Lall, H. S., Khanna, J., Khatri, H., Mhapankar, S., Paul, P., & Vyas, Anjali. A. (2019). Effect of Tubercles on Aerodynamic Performance of NACA 0015. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 6(3), 4868–4873.
- Lapin, E. E. (1975). Theoretical performance of vertical axis wind turbines. ASME paper, 75-WA/Ener-1. *The Winter Annual Meeting, Houston, TX, USA*.
- Li, Y. (2020). Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbines: History, Performance, and Applications. In *Rotating Machinery*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.84761>
- Liebreich, M. (2017, September 19). *London summit. Breaking Clean*. Bloomberg New Energy Finance. <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/2017/09/BNEF-Summit-London-2017-Michael-Liebreich-State-of-the-Industry.pdf>
- Linić, S., Lučanin, V., Živković, S., Raković, M., Ristić, S., Radojković, B., & Polić, S. (2021). Multidisciplinary research method for designing and selection of bio-inspired profiles in the conceptual designing stage. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(1), 57. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02789-2>
- Lobo, G. J., K, A., Vineeth, D., & Charan, M. S. (2020). Tubercles Effect on a Wing Performance for NACA 634-421 Aerofoil. *International Journal of Science and Engineering Applications*, 09(04), 43–48. <https://doi.org/10.7753/IJSEA0904.1002>
- Lv, J., Yang, W., Zhang, H., Liao, D., Ren, Z., & Chen, Q. (2021). A Feasibility Study to Reduce Infrasound Emissions from Existing Wind Turbine Blades Using a Biomimetic Technique. *Energies*, 14(16), 4923. <https://doi.org/10.3390/en14164923>
- Mantravadi, B., D., U., Sriram, K., Mohammad, A., Vaitla, L., & Velamati, R. K. (2019). Effect of solidity and airfoil on the performance of vertical axis wind turbine under fluctuating wind conditions. *International Journal of Green Energy*, 16(14), 1329–1342. <https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1671408>
- Marín-Aguilar, J. C., Sánchez-Pozos, M., Palacios-González, J. C., & López-Rebollar, B. M. (2025a). Análisis aerodinámico de álabes Darrieus biomimetizado con aleta de ballena jorobada mediante CFD. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 26(1), 1–13. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2025.26.1.005>

- Marín-Aguilar, J. C., Sánchez-Pozos, M., Palacios-González, J. C., & López-Rebollar, B. M. (2025b). Evaluación del coeficiente de potencia con esquemas DMST para rotores Darrieus con perfiles biomimetizados. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 26(1), 1–12. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2025.26.1.004>
- Mathew, S. (2006). *Wind Energy*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/3-540-30906-3>
- Mathew, S., & Philip, G. S. (2012). Wind Turbines: Evolution, Basic Principles, and Classifications. In *Comprehensive Renewable Energy* (pp. 104–123). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00187-4>
- Meana-Fernández, A. (2019). *Optimized Design of Aerodynamic Airfoils for Vertical Axis Wind Turbines* [Doctoral Thesis, Universidad de Oviedo]. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/54097>
- Meana-Fernández, A., Solís-Gallego, I., Fernández Oro, J. M., Argüelles Díaz, K. M., & Velarde-Suárez, S. (2018). Parametrical evaluation of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines for the proposal of optimized designs. *Energy*, 147, 504–517. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.062>
- Mendenhall III, W., Beaver, R., & Beaver, B. (2020). *Introduction to Probability and Statistics. Metric Version* (15th ed.). Cengage Learning, Inc.
- Miklosovic, D. S., Murray, M. M., Howle, L. E., & Fish, F. E. (2004). Leading-edge tubercles delay stall on humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) flippers. *Physics of Fluids*, 16(5), L39–L42. <https://doi.org/10.1063/1.1688341>
- Mishra, N., Prakash, P., Gupta, A. S., Dawar, J., Kumar, A., & Mitra, S. (2022). *Numerical and Experimental Investigations on a Bio-Inspired Design of Darrieus Vertical Axis Wind Turbine Blades With Leading Edge Tubercles* (pp. 211–224). <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-8561-0.ch010>
- Moghimi, M., & Motawej, H. (2020). Developed DMST model for performance analysis and parametric evaluation of Gorlov vertical axis wind turbines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100616. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100616>
- Mohamed, O. S., Ibrahim, A. A., Etman, A. K., Abdelfatah, A. A., & Elbaz, A. M. R. (2020). Numerical investigation of Darrieus wind turbine with slotted airfoil blades. *Energy Conversion and Management: X*, 5, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2019.100026>
- Mohammed, A. A., Ouakad, H. M., Sahin, A. Z., & Bahaidarah, H. M. S. (2020). Parametric Study and Comparison of Aerodynamics Momentum-Based Models for Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbines. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(2), 729–741. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04133-w>
- MohanKumar, P., Sivalingam, K., & Lim, T.-C. (2023). *Advanced Wind Turbines*. World Scientific Publishing. <https://doi.org/10.1142/13311>
- Möllerström, E., Gipe, P., Beurskens, J., & Ottermo, F. (2019). A historical review of vertical axis wind turbines rated 100 kW and above. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.022>
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2018). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (7th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Naseem, A., Uddin, E., Ali, Z., Aslam, J., Shah, S. R., Sajid, M., Zaidi, A. A., Javed, A., & Younis, M. Y. (2020). Effect of vortices on power output of vertical axis wind turbine (VAWT). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100586. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100586>
- Nasretidinova, M., Utemuratova, G., Dawletmuratov, A., Matveev, A., Kaigorodov, D., Kalinin, E., & Mustaev, O. (2021). Advances in Biomimetics in Imitation of the Laws of Nature. *Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering*, 53, 77–84. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JBBBE.53.77>

- Ouchene, S., Smaili, A., & Fellouah, H. (2023). On the estimation of the angle of attack for vertical axis wind turbines. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*.
<https://doi.org/10.1108/HFF-09-2022-0566>
- Paraschivoiu, I. (1981). Double-multiple streamtube model for Darrieus in turbines. In *Lewis Research Center Wind Turbine Dyn.* (Vol. 19820015811, pp. 19–25). NASA.
- Paraschivoiu, I. (2002). *Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept*. Polytechnic International Press. <https://books.google.com.mx/books?id=sefVtnVgso0C>
- Parra-Santos, T., Gallegos, A., Uzarraga, C. N., & Rodriguez, M. A. (2016). Numerical study on small scale vertical axis wind turbine. *EPJ Web of Conferences*, 114, 02088.
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201611402088>
- Pena, B., Muk-Pavic, E., Thomas, G., & Fitzsimmons, P. (2019). Numerical analysis of a leading edge tubercle hydrofoil in turbulent regime. *Journal of Fluid Mechanics*, 878, 292–305.
<https://doi.org/10.1017/jfm.2019.611>
- Peng, Y.-X., Xu, Y.-L., & Zhan, S. (2019). A hybrid DMST model for pitch optimization and performance assessment of high-solidity straight-bladed vertical axis wind turbines. *Applied Energy*, 250, 215–228. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.127>
- Prathik, V., Narayanan, U. K., & Kumar, P. (2021). Design Analysis of Vertical Axis Wind Turbine Blade Using Biomimicry. *Journal of Modern Mechanical Engineering and Technology*, 8, 1–11.
<https://doi.org/10.31875/2409-9848.2021.08.1>
- Primrose, S. B. (2020). *Biomimetics. Nature-Inspired Design and Innovation*. Wiley-Blackwell.
- Rao, K. R. (2019). *Wind Energy for Power Generation*. Springer International Publishing.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-75134-4>
- Rashed, M. R., Abdellatif, O. E., Abd Rabbo, M. F., Khalil, E. E., & Shahin, I. (2020). Effect of Airfoil Shape on the Aerodynamic performance of a Vertical Axis Wind Turbine. *Engineering Research Journal - Faculty of Engineering (Shoubra)*, 44(1), 80–88.
<https://doi.org/10.21608/erjsh.2020.290030>
- Rezaeiha, A., Montazeri, H., & Blocken, B. (2018). Towards accurate CFD simulations of vertical axis wind turbines at different tip speed ratios and solidities: Guidelines for azimuthal increment, domain size and convergence. *Energy Conversion and Management*, 156, 301–316.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.026>
- Rhenals-Julio, J. D., D.-Perez, O., G.-Vidal, L., Martínez-Guarín, A., & M.-Mendoza, J. (2023). Fluid dynamic design of a vertical axis wind turbine rotor under low wind speed. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 18(18), 2088–2093. <https://doi.org/10.59018/0923256>
- Rodriguez, S. (2019). *Applied Computational Fluid Dynamics and Turbulence Modeling*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-28691-0>
- Rogowski, K., Hansen, M. O. L., & Bangga, G. (2020). Performance Analysis of a H-Darrieus Wind Turbine for a Series of 4-Digit NACA Airfoils. *Energies*, 13(12), 3196.
<https://doi.org/10.3390/en13123196>
- Rogowski, K., Hansen, M. O. L., & Maroński, R. (2018). Steady and unsteady analysis of NACA 0018 airfoil in vertical-axis wind turbine. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 203.
<https://doi.org/10.15632/jtam-pl.56.1.203>
- Rogowski, K., Królak, G., & Bangga, G. (2021). Numerical Study on the Aerodynamic Characteristics of the NACA 0018 Airfoil at Low Reynolds Number for Darrieus Wind Turbines Using the Transition SST Model. *Processes*, 9(3), 477. <https://doi.org/10.3390/pr9030477>
- Rose, J. B. R., Natarajan, S. G., & Gopinathan, V. T. (2021). Biomimetic flow control techniques for aerospace applications: a comprehensive review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 20(3), 645–677. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09583-z>

- Roshan, A., Sagharichi, A., & Maghrebi, M. J. (2020). Nondimensional Parameters' Effects on Hybrid Darrieus–Savonius Wind Turbine Performance. *Journal of Energy Resources Technology*, 142(1). <https://doi.org/10.1115/1.4044517>
- Rostamzadeh, N., Hansen, K. L., Kelso, R. M., & Dally, B. B. (2014). The formation mechanism and impact of streamwise vortices on NACA 0021 airfoil's performance with undulating leading edge modification. *Physics of Fluids*, 26(10). <https://doi.org/10.1063/1.4896748>
- Roy, L., Kincaid, K., Mahmud, R., & MacPhee, D. W. (2021). Double-Multiple Streamtube Analysis of a Flexible Vertical Axis Wind Turbine. *Fluids*, 6(3), 118. <https://doi.org/10.3390/fluids6030118>
- Roy, S., & Saha, U. K. (2013). Review on the numerical investigations into the design and development of Savonius wind rotors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.060>
- Saber, E., Afify, R., & Elgamal, H. (2018). Performance of SB-VAWT using a modified double multiple streamtube model. *Alexandria Engineering Journal*, 57(4), 3099–3110. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.07.009>
- Sanderse, B., van der Pijl, S. P., & Koren, B. (2011). Review of computational fluid dynamics for wind turbine wake aerodynamics. *Wind Energy*, 14(7), 799–819. <https://doi.org/10.1002/we.458>
- Santamaría, L., Galdo Vega, M., Pandal, A., González Pérez, J., Velarde-Suárez, S., & Fernández Oro, J. M. (2022). Aerodynamic Performance of VAWT Airfoils: Comparison between Wind Tunnel Testing Using a New Three-Component Strain Gauge Balance and CFD Modelling. *Energies*, 15(24), 9351. <https://doi.org/10.3390/en15249351>
- Schaffarczyk, A. P. (2020). *Introduction to Wind Turbine Aerodynamics* (2nd ed.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41028-5>
- Sebastian, T. (2012). *The Aerodynamics and Near Wake of an Offshore Floating Horizontal Axis Wind Turbine* [Doctoral Thesis]. University of Massachusetts.
- Seidel, C., Jayaram, S., Kunkel, L., & Mackowski, A. (2017). Structural Analysis of Biologically Inspired Small Wind Turbine Blades. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 12(1), 19. <https://doi.org/10.1186/s40712-017-0085-3>
- Sengupta, A. R., Biswas, A., & Gupta, R. (2019). Comparison of low wind speed aerodynamics of unsymmetrical blade H-Darrieus rotors-blade camber and curvature signatures for performance improvement. *Renewable Energy*, 139, 1412–1427. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.054>
- Serson, D., Meneghini, J. R., & Sherwin, S. J. (2017). Direct numerical simulations of the flow around wings with spanwise waviness at a very low Reynolds number. *Computers & Fluids*, 146, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2017.01.013>
- Sikdar, S., Rahman, M. H., Siddaiah, A., & Menezes, P. L. (2022). Gecko-Inspired Adhesive Mechanisms and Adhesives for Robots—A Review. *Robotics*, 11(6), 143. <https://doi.org/10.3390/robotics11060143>
- Song, C., Wu, G., Zhu, W., & Zhang, X. (2020). Study on Aerodynamic Characteristics of Darrieus Vertical Axis Wind Turbines with Different Airfoil Maximum Thicknesses Through Computational Fluid Dynamics. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(2), 689–698. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04127-8>
- Spera, D. A. (2009). *Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts in Wind Turbine Engineering, Second Edition* (D. A. Spera, Ed.; 2nd ed.). ASME Press. <https://doi.org/10.1115/1.802601>
- Stavarakakis, G. S., & Pouliezios, A. (2022). Electrical Parts, Control Systems and Power Electronics of Wind Turbines. In *Comprehensive Renewable Energy* (pp. 279–352). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00170-9>
- Strickland, J. H. (1975). *The Darrieus Turbine: A Performance Prediction Model Using Multiple Streamtubes*.

- Strickland, J. H. (1977). A performance prediction model for the Darrieus turbine. *International Symposium on Wind Energy Systems*, C3_39-C3_54.
- Sudhakar, S., Karthikeyan, N., & Venkatakrishnan, L. (2017). Influence of leading edge tubercles on aerodynamic characteristics of a high aspect-ratio UAV. *Aerospace Science and Technology*, *69*, 281–289. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.06.031>
- Sultanian, B. K. (2016). *Fluid Mechanics: An Intermediate Approach*. CRC Press.
<https://www.fluidmechanics101.com/pdf/calculators.pdf>
- Tchakoua, P., Wamkeue, R., Tameghe, T. A., & Ekemb, G. (2013). A review of concepts and methods for wind turbines condition monitoring. *2013 World Congress on Computer and Information Technology (WCCIT)*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/WCCIT.2013.6618706>
- Templin, R. J. (1974). *Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine*.
<https://www.osti.gov/biblio/7235638>
- Tian, W., Yang, Z., Zhang, Q., Wang, J., Li, M., Ma, Y., & Cong, Q. (2017). Bionic Design of Wind Turbine Blade Based on Long-Eared Owl's Airfoil. *Applied Bionics and Biomechanics*, *2017*, 1–10.
<https://doi.org/10.1155/2017/8504638>
- Tirandaz, M. R., & Rezaeiha, A. (2021). Effect of airfoil shape on power performance of vertical axis wind turbines in dynamic stall: Symmetric Airfoils. *Renewable Energy*, *173*, 422–441.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.142>
- Torabi, F. (2022). Wind energy. In *Fundamentals of Wind Farm Aerodynamic Layout Design* (pp. 1–24). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823016-9.00007-3>
- Tu, J., Yeoh, G. H., & Liu, C. (2018). *Computational Fluid Dynamics. A Practical Approach* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Valleru, V. (2018). *Aeroacoustic Analysis of a Wind Turbine with Sinusoidal Leading-Edge Blade* [Master Thesis, University of Kansas].
<https://kuscholarworks.ku.edu/server/api/core/bitstreams/085a791c-3c5e-4f50-a692-70c9c9ce770e/content>
- van Nierop, E. A., Alben, S., & Brenner, M. P. (2008). How Bumps on Whale Flippers Delay Stall: An Aerodynamic Model. *Physical Review Letters*, *100*(5), 054502.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.054502>
- Vu, A. N., & Pham, N. S. (2020). Double multiple stream tube theory coupled with dynamic stall and wake correction for aerodynamic investigation of vertical axis wind turbine. *Science and Technology Development Journal*, *23*(4), 771–780. <https://doi.org/10.32508/stdj.v23i4.2396>
- Walpole, R., Myers, R., Myers, S., & Ye, K. (2017). *Probability & Statistics for Engineers & Scientists* (9th ed.). Pearson Education Limited.
- Wang, T., Zhong, W., Qian, Y., & Zhu, C. (2023a). Fundamentals of Computational Fluid Dynamics. In *Wind Turbine Aerodynamic Performance Calculation* (pp. 175–191). Springer Nature Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-99-3509-3_10
- Wang, T., Zhong, W., Qian, Y., & Zhu, C. (2023b). Steady Blade Element Momentum Method. In *Wind Turbine Aerodynamic Performance Calculation* (pp. 53–68). Springer Nature Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-99-3509-3_4
- Wang, Z., & Zhuang, M. (2017). Leading-edge serrations for performance improvement on a vertical-axis wind turbine at low tip-speed-ratios. *Applied Energy*, *208*, 1184–1197.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.034>
- Wanieck, K., Ritzinger, D., Zollfrank, C., & Jacobs, S. (2020). Biomimetics: teaching the tools of the trade. *FEBS Open Bio*, *10*(11), 2250–2267. <https://doi.org/10.1002/2211-5463.12963>
- Wei, Y., Lin, Z., Wang, Y., & Wang, X. (2023). Simulation and Optimization Study on the Ventilation Performance of High-Rise Buildings Inspired by the White Termite Mound Chamber Structure. *Biomimetics*, *8*(8), 607. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8080607>

- Weidner, B. V., Nagel, J., & Weber, H.-J. (2018). Facilitation method for the translation of biological systems to technical design solutions. *International Journal of Design Creativity and Innovation*, 6(3–4), 211–234. <https://doi.org/10.1080/21650349.2018.1428689>
- Wendler-Ernst, R. G. (2014). *Variations on the double-multiple streamtube model for Darrieus straight-bladed vertical-axis wind turbines to improve predictions of performance and flow expansion* [Master Thesis]. Universidad de Chile.
- Wilson, R. E., & Lissaman, P. B. S. (1974). *Applied aerodynamics of wind power machines*. <https://www.osti.gov/biblio/7291582>
- Wimshurst, A. (2021, June 24). *Inflation Layers / Prism Layers in CFD*. Youtube Video. <https://www.youtube.com/watch?v=1gSHN99I7L4>
- Yahyaoui, I., & Cantero, A. S. (2018). Modeling and Characterization of a Wind Turbine Emulator. In *Advances in Renewable Energies and Power Technologies* (pp. 491–508). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812959-3.00016-2>
- Yang, Y., Guo, Z., Song, Q., Zhang, Y., & Li, Q. (2018). Effect of Blade Pitch Angle on the Aerodynamic Characteristics of a Straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine Based on Experiments and Simulations. *Energies*, 11(6), 1514. <https://doi.org/10.3390/en11061514>
- Zanon, A., Giannattasio, P., & Simão Ferreira, C. J. (2015). Wake modelling of a VAWT in dynamic stall: impact on the prediction of flow and induction fields. *Wind Energy*, 18(11), 1855–1874. <https://doi.org/10.1002/we.1793>
- Zhang, L. (2021). *Wind Energy Development: History and Current Status* (pp. 1–6). https://doi.org/10.1142/9789811225925_0001
- Zhang, M. H. (2015). *Wind Resource Assessment and Micro-Siting*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118900116>
- Zhang, R.-K., & Wu, V. D. J.-Z. (2012). Aerodynamic characteristics of wind turbine blades with a sinusoidal leading edge. *Wind Energy*, 15(3), 407–424. <https://doi.org/10.1002/we.479>
- Zhou, Z. (2023). The development and application of ornithopter and the study of ornithopter aerodynamics. *Theoretical and Natural Science*, 5(1), 549–553. <https://doi.org/10.54254/2753-8818/5/20230330>
- Zohuri, B., & McDaniel, P. (2021). *Introduction to Energy Essentials. Insight into Nuclear, Renewable, and Non-Renewable Energies*. Elsevier.