



## **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS  
(IICBA)**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
(CIICAp)**

**“DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN  
GEOMÉTRICA DEL PERFIL DEL ÁLABE S1046 EN LA  
POTENCIA Y EFICIENCIA DE UNA TURBINA EÓLICA  
VERTICAL TIPO H”.**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA**

Presenta:

**Ing. Alexis Iván Luna Sánchez**

**Director de tesis:**

**Dr. Juan Carlos García Castrejón**

**Sinodales:**

**Dra. Laura Lilia Castro Gómez**

**Dr. Miguel Ángel Basurto Pensado**

**Dr. José Omar Dávalos Ramírez**

**Dr. José Antonio Marbán Salgado**

**Cuernavaca Morelos, México**

**Mayo de 2024**

## Resumen.

Los combustibles fósiles han sido utilizados para producir electricidad y abastecer la demanda energética global, estos recursos son altamente contaminantes y afectan al planeta dañando su capa de ozono.

Existen alternativas para generar electricidad de forma sustentable: las energías renovables; estas aprovechan los recursos naturales teniendo un impacto ambiental menor; Las principales fuentes son la energía hidráulica, solar y eólica, contribuyendo con un 26.3% a la electricidad global.

La energía eólica se obtiene a través de turbinas de eje horizontal (HAWT) y vertical (VAWT). Aunque las HAWT son más eficientes, las VAWT han captado la atención de los investigadores debido a sus ventajas distintivas, motivándolos a mejorar estos aerogeneradores.

Investigaciones previas han evidenciado una relación directa entre la eficiencia de las turbinas y la geometría de sus perfiles aerodinámicos. El modelo S1046 ha demostrado ser especialmente eficaz para mejorar el rendimiento de las VAWT's. Este trabajo, consistió en investigar cómo la variación en la longitud de la cuerda y el espesor del álabe S1046 afecta la eficiencia de una microturbina Darrieus Tipo H.

El enfoque del trabajo se centra en 16 variantes del perfil S1046, con ajustes en longitud de cuerda y espesor. Se exploran cambios que van desde un aumento del 25% hasta una reducción del 15%, tomando como referencia las medidas utilizadas por I. Hashem et al. (2017).

Se realizó un análisis transitorio sometiendo cada turbina a una velocidad de viento de  $9\text{ m/s}$  y una rotación de  $668.45\text{rpm}$ . El objetivo era obtener el torque ( $T$ ) promedio, la potencia ( $P_w$ ) y el coeficiente de potencia de salida ( $C_p$ ).

Las modificaciones en las dimensiones de los perfiles aerodinámicos generaron notables cambios en el torque, potencia y coeficiente de potencia de la turbina. La variante con un incremento del 25% en la longitud de la cuerda destacó al lograr un  $C_p$  de 0.3992, superando en un 15.3% lo reportado en la literatura.

## **Abstract.**

Fossil fuels have been used to produce electricity and supply the global energy demand, these resources are highly polluting and affect the planet by damaging its ozone layer.

There are alternatives to generate electricity in a sustainable way: renewable energies; these take advantage of natural resources and have a lower environmental impact; the main sources are hydraulic, solar and wind energy, contributing 26.3% of global electricity.

Wind energy is obtained through horizontal (HAWT) and vertical (VAWT) axis turbines. Although HAWTs are more efficient, VAWTs have caught the attention of researchers due to their distinct advantages, motivating them to improve these wind turbines.

Previous research has shown a direct relationship between turbine efficiency and airfoil geometry. The S1046 model has proven to be particularly effective in improving the performance of VAWTs. This work, consisted of investigating how the variation in chord length and blade thickness of the S1046 blade affects the efficiency of a Darrieus Type H microturbine.

The focus of the work is on 16 variants of the S1046 airfoil, with adjustments in chord length and thickness. Changes ranging from a 25% increase to a 15% reduction are explored, taking as reference the measurements used by I. Hashem et al. (2017).

A transient analysis was performed by subjecting each turbine to a wind speed of 9 and a rotation of 668.45. The objective was to obtain the average torque ( $T$ ), power ( $P_w$ ) and power output coefficient ( $C_p$ ).

The modifications in the airfoil dimensions generated notable changes in the torque, power and power coefficient of the turbine. The variant with a 25% increase in chord length stood out by achieving a 0.3992, exceeding by 15.3% that reported in the literature.

## **Agradecimientos:**

- A mis padres, por brindarme los valores y hábitos, así como el ejemplo para seguir adelante y trabajar en lo que me proponga.
- A dios, por guiarme en todo momento, así como permitirme obtener este logro.
- A mis abuelos, por motivarme y apoyarme incondicionalmente en todo momento.
- A mi hermano por apoyarme y brindarme sus consejos que me impulsaron a lograr este objetivo en vida.
- A mi director de tesis, el Dr. Juan Carlos García Castrejón por orientarme en todo momento, así como transmitirme sus conocimientos y aconsejarme para llevar a cabo mi trabajo en tiempo y forma.
- A los integrantes de mi comité revisor, la Dra. Laura Lilia Castro Gómez, Dr. Miguel Ángel Basurto Pensado, Dr. José Omar Dávalos Ramírez, Dr. José Antonio Marbán Salgado por sus importantes contribuciones y sugerencias en la realización de este trabajo.
- A mis amigos y compañeros de clase por la amistad, apoyo y ayuda que me brindaron en el transcurso de estos dos años.
- A la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por el apoyo económico que permitió que pudiera realizar el presente trabajo.

# ÍNDICE.

<b>Capítulo 1. Antecedentes.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción.....	1
1.2 Estado del arte.....	3
1.3 Planteamiento del problema.....	14
1.4 Justificación.....	15
1.5 Hipótesis.....	16
1.6 Objetivo.....	16
1.7 Objetivos Específicos.....	16
<b>Capítulo 2. Marco teórico.....</b>	<b>17</b>
2.1 Mecánica de fluidos.....	17
2.2. Turbulencia.....	17
2.3 Ecuaciones de gobierno.....	18
2.4 Conservación de la masa.....	19
2.5 Conservación de energía.....	20
2.6 Conservación de movimiento (momento).....	20
2.7 Ecuaciones de Navier-Stokes.....	21
2.8 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).....	23
2.8.1 Aplicación de CFD en turbomaquinaria.....	24
2.9 Análisis numérico.....	25
2.9.1 Pre-procesamiento.....	25
2.9.2 Procesamiento.....	26
2.9.3 Postprocesamiento.....	27
2.10 Modelos de turbulencia.....	27
2.10.1 Modelo $K - \varepsilon$ Realizable.....	28
2.10.2 Modelo $K - \varepsilon$ RNG.....	28
2.10.3 Modelo $K - \omega$ SST.....	29
2.11 Energía eólica.....	29
2.12 Aerogeneradores.....	30
2.12.1 Componentes del aerogenerador.....	31

2.12.2	Aerogeneradores de eje horizontal .....	31
2.12.3	Aerogeneradores de eje vertical.....	32
2.12.4	Turbina Darrieus Tipo H.....	33
2.13	Velocidades del viento.....	34
2.14	Perfiles aerodinámicos .....	35
2.14.1	Perfil aerodinámico S1046 .....	37
2.15	Ecuaciones de interés en turbinas eólicas.....	37
2.15.1	Coeficiente de Potencia .....	37
2.15.2	Potencia de turbina.....	38
2.15.3	Potencia del viento .....	38
2.15.4	Relación de Velocidad de punta.....	38
	<b>Capítulo 3. Metodología .....</b>	<b>40</b>
3.1	Revisión de la bibliografía.....	40
3.2	Elaboración de Geometrías.....	40
3.3	Pre-procesamiento.....	43
3.3.1	Geometría del dominio de estudio.....	43
3.4	Mallado.....	45
3.5	Procesamiento .....	46
	<b>Capítulo 4. Resultados y discusión. ....</b>	<b>52</b>
4.1	Validación. ....	52
4.1.1	Resultados de validación.....	52
4.2	Resultados de torque.....	53
4.1.2	Contornos de Presión y Velocidad. ....	56
4.1.2.	Velocidad tangencial. ....	57
4.3	Resultados de Potencia de turbina ( $P_w$ ). ....	58
4.2	Resultados de $C_p$ .....	59
4.3	Comparación de mayor y menor resultado de $C_p$ .....	61
4.3.1	Contornos de presión estática a $0^\circ$ . ....	61
4.3.4	Contornos de velocidad total a $45^\circ$ . ....	64
4.3.4	Contornos de velocidad total a $90^\circ$ . ....	66
	Capítulo 5. Conclusiones finales y recomendaciones.....	67
5.1	Conclusiones.....	67

5.2 Recomendaciones.....	68
<b>Capítulo 6. Referencias .....</b>	<b>69</b>

## Índice de Figuras.

Figura 1.1. Generadores de eje vertical tipo Darrieus. ....	2
Figura 2.1. Balance de flujo de masa en un volumen de control. ....	19
Figura 2.2. Disciplinas que involucra <i>CFD</i> . ....	24
Figura 2.3. Diseño de turbina centrífuga por medio de <i>CFD</i> . ....	25
Figura 2.4. Tipos de malla. ....	26
Figura 2.5. Turbinas de eje horizontal. ....	30
Figura 2.6. Aerogenerador de eje horizontal. ....	32
Figura 2.7. Aerogeneradores de eje vertical. ....	33
Figura 2.8. Turbina de eje vertical Darrieus Tipo H. ....	34
Figura 2.9. Variación de velocidades de viento mediante el incremento de altitud .	34
Figura 2.10. Perfiles aerodinámicos serie NACA. ....	35
Figura 2.11 Componentes del perfil aerodinámico. ....	36
Figura 2.12. Ángulo de ataque de perfil aerodinámico. ....	37
Figura 2.13. Perfil aerodinámico S1046. ....	37
Figura 3.1. Variaciones de longitud de cuerda. ....	41
Figura 3.2. Variaciones de longitud espesor. ....	42
Figura 3.3. Diseño de rotor de turbina Darrieus tipo H. ....	44
Figura 3.4. Dimensiones del domino de estudio. ....	44
Figura 3.5. Malla no estructurada. ....	45
Figura 3.6. Configuración del modelo de turbulencia. ....	47
Figura 3.7. Condiciones de frontera. ....	47
Figura 3.8. Configuración del monitor de torque. ....	49
Figura 3.9. Convergencia de residuales. ....	50
Figura 4.1. Gráfica de torque dinámico con respecto al tiempo. ....	52
Figura 4.2. Resultados de torque en turbinas verticales con variaciones en la cuerda de sus álabes. ....	53
Figura 4.3. Resultados de torque en turbinas verticales con variaciones en el espesor de sus álabes. ....	54
Figura 4.4. Comparación de resultados de torque. ....	55
Figura 4.5. Contornos de presión estática. ....	56

Figura 4.6. Contornos de velocidad total.....	57
Figura 4.7. Contornos de velocidad tangencial.....	57
Figura 4.8. Comparación de $C_p$ 's.....	60
Figura 4.9. Contornos de presión estática en posición $0^\circ$ ..	61
Figura 4.10. Contornos de velocidad total a $0^\circ$ ..	62
Figura 4.11 Contornos de presión estática a $45^\circ$ ..	63
Figura 4.12. Contornos de velocidad total a $45^\circ$ ..	64
Figura 4.13. Contornos de presión estática a $90^\circ$ ..	65
Figura 4.14. Contornos de velocidad total a $90^\circ$ ..	66

## Índice de tablas.

Tabla 1.1 Comparación de parámetros en distintos estudios numéricos.....	13
Tabla 3.1 Variaciones de longitud de cuerda.....	41
Tabla 3.2 Variaciones de espesor.....	42
Tabla 3.3 Dimensiones de Turbina Darrieus tipo H. ....	43
Tabla 3.4 Cálculo de error relativo. ....	46
Tabla 3.5 Condiciones de frontera. ....	48
Tabla 4.1 Resultados de Potencia de turbina en modelos con variaciones en longitud de cuerda en sus álabes. ....	58
Tabla 4.2. Resultados de Potencia de turbina en modelos con variaciones en espesor en sus álabes. ....	58
Tabla 4.3. Resultados de Coeficientes de Potencia de turbina en modelos con variaciones en espesor en sus álabes. ....	59
Tabla 4.4. Resultados de Potencia de turbina en modelos con variaciones en espesor en sus álabes. ....	60

## NOMENCLATURA

Magnitud	Unidades
$A$ Área de barrido de la turbina.	[ $m^2$ ]
$F$ Fuerza.	[ $N$ ]
$H$ Altura de la turbina.	[ $m$ ]
$N$ Número de álabes.	[-]
$P$ Potencia.	[ $W$ ]
$p$ Presión del aire.	[ $Pa$ ]
$T$ Torque.	[ $N\ m^2$ ]
$\sigma$ Solidez de la turbina.	[-]
$TSR-\lambda$ Relación de velocidad de punta.	[-]
$\rho$ Densidad del aire.	[ $Kg/m^3$ ]
$\omega$ Velocidad angular.	[ $rad/s$ ]
$C$ Cuerda del álabe.	[ $m$ ]
$C_p$ Coeficiente de potencia.	[-]
$C_m$ Coeficiente de torque.	[-]
$D$ Diámetro de la turbina.	[ $m$ ]
$TS$ Paso temporal.	[ $s$ ]
$R$ Radio de la turbina.	[ $m$ ]
$P_w$ Potencia del aire.	[ $W$ ]
$D$ Diámetro de la turbina	[ $m$ ]
$\mathcal{E}_r$ Error relativo.	
$Re$ Número de Reynolds.	
$g$ Gravedad.	[ $m/s^2$ ]
$V$ Velocidad.	[ $m/s$ ]
$v$ Velocidad tangencial del viento.	[ $m/s$ ]
$k$ Energía cinética por unidad de masa.	[ $j/kg$ ]
$t$ Tiempo .	[ $s$ ]
$\varepsilon$ Tensor de deformación.	
$\tau$ Tensor de esfuerzo viscoso.	
$\tau_w$ Esfuerzo cortante en la pared.	
$T$ Temperatura.	[ $K$ ]
$V$ Volumen.	[ $m^3$ ]
$\mu$ Viscosidad dinámica.	[ $kg/m \cdot s$ ]
$CFD$ Dinámica de Fluidos Computacional	
$f$ Frecuencia	[ $s^{-1}$ ]
$\varepsilon$ Tasa de deformación de energía cinética.	

# Capítulo 1. Antecedentes.

## 1.1 Introducción.

En 2019, el 64% de la electricidad provenía de fuentes contaminantes como el carbón y el petróleo (Irena, 2021). Ante el agotamiento y costos ambientales, hay un creciente interés en tecnologías más sostenibles para la generación de electricidad.

Una opción destacada es la generación eléctrica mediante energía eólica, que convierte la energía cinética del viento en electricidad a través de turbinas eólicas. Esta forma de energía, inagotable y libre de contaminantes, se ha convertido en una principal fuente de energía renovable, con un impacto significativo en áreas urbanas y rurales.

Los aerogeneradores son responsables de aprovechar las corrientes de viento y se dividen en dos tipos: los de eje horizontal (HAWT) y los de eje vertical (VAWT).

Las turbinas de eje horizontal son ampliamente preferidas debido a su mayor eficiencia y capacidad para generar potencia en áreas con fuertes corrientes de viento. Sin embargo, su uso en entornos urbanos es limitado debido a su nivel de ruido, necesidad de orientación precisa al viento y costos significativos de instalación y mantenimiento (Martínez *et al.* 2020).

Los aerogeneradores de eje vertical presentan notables ventajas frente a los HAWT. Pueden instalarse a alturas más bajas, adaptarse a zonas con corrientes de viento bajas o inestables, no requieren orientación precisa al viento y poseen una estructura simple, lo que los hace más económicos en términos de instalación, mantenimiento y repuestos.

Los aerogeneradores de eje vertical se clasifican en dos tipos principales: Savonius y Darrieus, siendo este último el más utilizado. Sus características y condiciones de trabajo los convierten en turbinas excepcionales para generar electricidad de manera económica y óptima, especialmente en entornos urbanos. Las turbinas Darrieus se dividen en tres modelos: Darrieus, Darrieus helicoidal y Darrieus tipo H siendo las últimas las que cuentan con una mayor eficiencia (Figura 1.1).

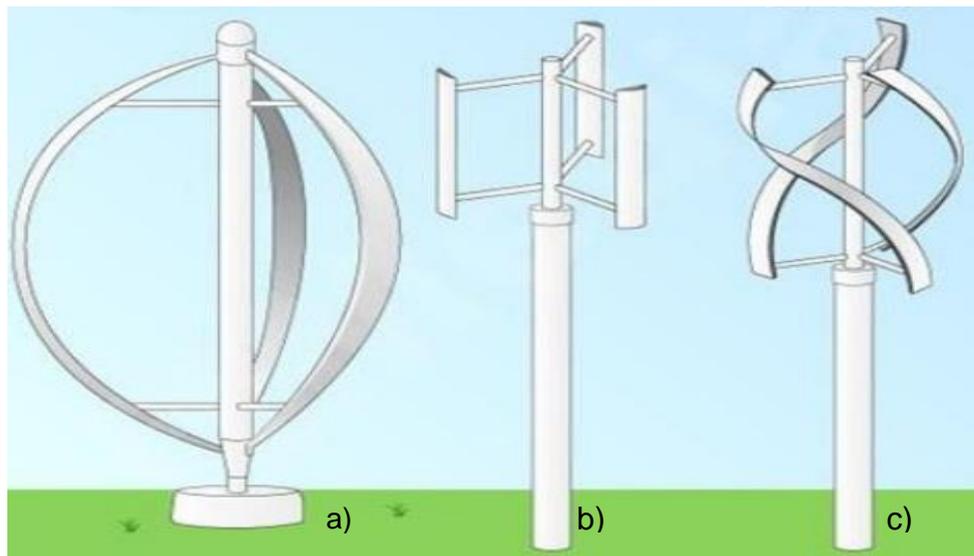


Figura 1.1. Generadores de eje vertical tipo Darrieus. a) Darrieus, (b) Darrieus tipo H, (c) Darrieus Helicoidal (Mendoza *et al.* 2017).

Con el propósito de evaluar la influencia del perfil aerodinámico S1046 en la eficiencia de la turbina Darrieus tipo H, y basándonos en estudios previos que destacan su impacto en el rendimiento del aerogenerador (I. Hashem *et al.* 2017) se realizaron estudios numéricos con el propósito de evaluar su rendimiento. Estos se centraron en la variación de longitud de cuerda y espesor de los álabes del aerogenerador.

Se ajustaron las dimensiones del perfil S1046 en una turbina tipo H, variando la longitud de cuerda y espesor en -10%, -5%, +5%, +10%, +15% y +20%. Con la turbina expuesta a una velocidad de  $9\text{m/s}$  y

rotando a 668.45 *rpm*, se analizarán el  $T$ ,  $P$  y  $C_p$  de cada prototipo para determinar el rendimiento óptimo.

## 1.2 Estado del arte.

A continuación, se presentan investigaciones recientes centradas en mejorar la eficiencia de los aerogeneradores de eje vertical.

Estos trabajos revisados incorporan análisis numéricos mediante programas de modelación, buscando optimizar el rendimiento de las turbinas de eje vertical.

- Takashi et al. llevaron a cabo análisis numéricos y experimentales en túneles de viento. El enfoque se centró en investigar perfiles aerodinámicos al agregar una lente de viento a una turbina de eje vertical con palas rectas, con el objetivo de mejorar su Coeficiente de Potencia de salida. Los resultados demostraron que el modelo con mejor resultado fue el que contó con el perfil NACA0024 duplicando su coeficiente de potencia (Takashi *et al.* 2006).
- Castelli comparó tres configuraciones distintas de una turbina Darrieus, empleando 3, 4 y 5 álabes. A medida que se incrementa el número de álabes, el valor del coeficiente de potencia disminuye, siendo la configuración de tres álabes la que muestra la mejor eficiencia (Castelli 2015).
- Mohamed llevó a cabo una investigación con el fin de mejorar el diseño de una turbina Darrieus tipo H. Analizó 20 perfiles aerodinámicos, tanto simétricos como asimétricos, con el propósito de optimizar el coeficiente de salida de torque y el coeficiente de potencia mediante simulaciones aerodinámicas utilizando *CFD*. El trabajo demostró que el perfil de álabe que mostró los mejores resultados fue el S1046, mostrando un incremento del 26.83% en

comparación con los perfiles NACA simétricos estándar, con un coeficiente de potencia de 0.4051 (Mohamed 2012).

- Edwards et al. (2013) realizaron un estudio numérico y experimental en el que analizaron el impacto de la relación de velocidad de punta, evaluando valores de 2 a 4. Sus hallazgos indicaron que cuando el  $TSR$  es superior a 3, se produce una separación de flujo en las paredes de los álabes (J. M. Edwards *et al.* 2013).
- Deshpande et al. llevaron a cabo un análisis numérico mediante *CFD*, evaluando los perfiles aerodinámicos NACA 0018, NACA 0015 y S1210 a velocidades de 3 *m/s* y 5 *m/s*, utilizando solidez de 0.2 y 0.4. Según los resultados obtenidos, el perfil más eficiente resultó ser el NACA0015 con un  $TSR$  de 2 (P. Deshpande *et al.* 2013).
- Singh et al. propuso establecer una relación entre la altura de la turbina y el diámetro del rotor, utilizando valores entre 0.8 y 1 para encontrar el mejor Coeficiente de Potencia ( $C_p$ ). Los resultados indicaron que se lograba una mayor eficiencia cuando la relación  $H/D=1$  (Singh *et al.* 2015).
- Qing'an-Li et al. evaluaron diversas configuraciones de álabes para una turbina Darrieus. Concluyeron que la mejor configuración fue aquella que contaba con 3 álabes (Q. Maeda *et al.* 2015).
- M. H. Mohamed et al. realizaron una comparación entre las herramientas de mallado ANSYS Workbench y Gambit a través de un análisis numérico. El propósito era determinar la secuencia numérica final para el modelado y evaluación del rendimiento de la turbina Darrieus. Los resultados indicaron que la aplicación del modelo de turbulencia  $SST\ k - \omega$  resulta en una mejora del mallado con ANSYS Workbench. Además, concluyeron que al realizar la discretización con Gambit, el modelo óptimo a utilizar es el  $k - \epsilon$  *realizable*

(Mohamed *et al.* 2015).

- Michael et al. Llevaron a cabo una investigación para evaluar el rendimiento de una turbina de eje vertical de 5 kW en corrientes de viento fluctuantes. Utilizaron Dinámica de Fluidos Computacional con modelos bidimensionales de VAWT's con palas simétricas y combadas. La prueba se realizó con una corriente de viento constante de 5 m/s, una amplitud de fluctuación del 10%, y una frecuencia de 1 Hz. Los resultados determinaron que el perfil aerodinámico con 1.5% de curvatura obtuvo un mejor rendimiento con un  $C_p$  inestable promediado en 0.31 (Michael D. *et al.* 2015).
- Sengupta en su investigación, comparó los perfiles aerodinámicos S815, NACA 0018 y EN005, concluyendo que el perfil S815 logra un  $C_p$  de 0.19 (A. R. Sengupta *et al.* 2016).
- O. Eboibi et al. realizaron un estudio numérico del rendimiento de VAWT, variando perfiles aerodinámicos de la serie NACA y ajustando espesores y posiciones, concluyendo que, en las series simétricas de perfiles con igual espesor y posición, los coeficientes de potencia del VAWT exhiben una tendencia ascendente inicial, seguida de una disminución a medida que aumenta el  $TSR$  (Eboibi *et al.* 2016].
- Chen et al. realizaron una investigación para evaluar el rendimiento de una turbina Darrieus en dos etapas. En la primera, emplearon un algoritmo ortogonal junto con un módulo de análisis automático de CFD (ACFDA). En la segunda, utilizaron una combinación del algoritmo de un factor a la vez (OFAAT) con el ACFDA. Los resultados señalaron que la relación espesor/cuerda fue el parámetro de diseño más influyente, alcanzando un  $C_p$  aproximado de 0.4585. Este valor fue un 15.45% superior al obtenido con perfiles NACA0015 (J. Chen *et al.* 2016).

- I. Hashem et al. llevaron a cabo una comparación de 24 perfiles aerodinámicos, tanto simétricos como asimétricos, mediante CFD de las series NACA, S, SG60XX, FX, LS, DU y RISΦ. Además, estudiaron el efecto de añadir una estructura de captación de energía eólica conocida como lente de viento. Los resultados destacaron que la turbina con perfiles S1046 exhibió un mayor coeficiente de potencia, alcanzando 0.3463 para TSR que variaron entre 2 y 7 (Hashem *et al.* 2017).
- Sayyad Basim Qamar et al. realizaron un estudio numérico para determinar del efecto que tiene la solidez en una turbina de eje vertical utilizando el perfil aerodinámico NACA 4312 con 3 diferentes longitudes de cuerda. Se Concluyó que la turbina con la solidez mayor fue la que mejor  $C_p$  obtuvo, pero bajo un rango de  $TSR$  menor (Basim *et al.* 2017).
- A. Subramanian et al. realizaron análisis numéricos para examinar la influencia de la solidez y el perfil aerodinámico en el rendimiento de una turbina Darrieus de eje vertical, utilizando los modelos NACA 0012, NACA 0015, NACA 0030 y AIR 001. Concluyeron que el perfil NACA 0030 funciona mejor con un TSR bajo, mientras que el NACA 0012 tiene un rendimiento óptimo con un  $TSR$  mayor a 1.8. Finalmente, se determinó que las turbinas de eje vertical con alta solidez rinden mejor con  $TSR$ 's bajos, ya que la interacción de las palas con el viento es más eficiente (Subramanian *et al.* 2017).
- Abhishek et al. Llevaron a cabo un estudio numérico mediante CFD para analizar cómo la solidez y la geometría del perfil aerodinámico afectan la productividad de una turbina de eje vertical de 1.1 kW. Evaluaron  $TSR$ 's de 1 a 2.5 utilizando perfiles aerodinámicos como AIR 001, NACA 0012 y NACA 0015. Los resultados indican que los VAWT's con baja solidez exhiben un

mejor rendimiento a  $TSR$ 's altos (Abhishek *et al.* 2017).

- A. Rezaeiha *et al.* llevaron a cabo un estudio numérico para cuantificar la pérdida de potencia en una turbina de eje vertical debido a la presencia del eje de rotación. Investigaron diferentes relaciones entre el eje y la turbina, variando del 0% al 16%, utilizando medidas obtenidas de un túnel de viento como referencia. Los resultados indican que la disminución de potencia aumenta de manera asintótica al incrementar la relación entre el diámetro del eje y el de la turbina. Esto se debe a la mayor anchura y longitud de la estela del eje, ya que los álabes atraviesan una región más extensa con velocidades más bajas en las zonas de viento favorable (Rezaeiha *et al.* (2017).
- Ning Ma *et al.* llevaron a cabo una optimización de los perfiles aerodinámicos de una turbina Darrieus Tipo H mediante *CFD* y un algoritmo genérico multi isla. Los resultados mostraron que la turbina con álabes optimizados exhibió un mayor Coeficiente de Potencia ( $C_p$ ) en los  $TSR$  de 0.4 a 1.5, mejorando su eficiencia en un 26.82% (Ning M. *et al.* 2018).
- Feng Fang *et al.* investigaron el impacto de las características aerodinámicas de la serie S en la turbina eólica de eje vertical. Realizaron simulaciones numéricas y experimentos en un túnel de viento utilizando un modelo pequeño de aerogenerador de palas rectas con tres perfiles aerodinámicos: S809, S1046 y NACA0018. Las características investigadas incluyeron el coeficiente de torque estático, el  $C_p$  y el rendimiento de velocidad de rotación. Como resultado, se concluyó que el perfil con las mejores características aerodinámicas es el S1046 (F. Fang *et al.* 2018).
- Hussain Mohamed *et al.* llevaron a cabo un análisis numérico evaluando cinco variaciones de espesor en un perfil aerodinámico NACA 63415. Los resultados mostraron un aumento significativo y favorable en el Coeficiente de Potencia

( $C_p$ ) al incrementarse en un 45% (H. Mohamed *et al.* 2018).

- H. Mohamed *et al.* realizaron estudios numéricos con 25 tipos de perfiles aerodinámicos diferentes con el objetivo de mejorar el rendimiento de una turbina Darrieus tipo H. Utilizaron diversas relaciones de velocidad de punta y cálculos RANS (Promediado de Reynolds de las Ecuaciones de Navier-Stokes) en su análisis. Determinaron que el perfil aerodinámico LS(1)-0413 es el más adecuado para la conversión de energía eólica, especialmente en zonas remotas y urbanas (H. Mohamed *et al.* 2018).
- Rezaeiha *et al.* en su estudio numérico, evaluaron el impacto de la solidez utilizando valores de 0.09 a 0.36, así como la configuración de los álabes en una turbina Darrieus. Concluyeron que la turbina logra un mayor rendimiento al tener una baja solidez con  $TSR$  alto, o viceversa (Rezaeiha *et al.* 2018).
- Chao Li *et al.* en su estudio numérico para optimizar la eficiencia de una turbina Darrieus tipo H, analizaron la influencia del ángulo de ataque en el  $C_p$ . Los resultados indicaron que en diferentes valores de  $TSR$ , los ajustes en los perfiles aerodinámicos pueden incrementar el Coeficiente de Potencia promedio de la turbina en un rango de 0.177 a 0.317 (C. Li *et al.* 2018).
- Jabir Ubaid Parakkal *et al.* realizaron un estudio utilizando  $CFD$ , evaluaron el comportamiento del perfil aerodinámico Joukowski en una turbina de eje vertical, comparándolo con los perfiles NACA0012 y NACA4312. Los resultados indicaron que la turbina con el perfil Joukowski exhibió una mayor eficiencia en comparación con los perfiles simétricos evaluados (J. Ubaid *et al.* 2019).
- Sengupta *et al.* realizaron un estudio utilizando  $CFD$  Fluent para optimizar una turbina de eje vertical tipo H. Se comparó la aerodinámica de dos perfiles

asimétricos, S815 y EN005, analizando la curvatura del álabe y la pala alrededor de su centro aerodinámico, a velocidades de viento entre 4 y 8  $m/s$ . El estudio demostró que, en el caso del perfil S815, una curvatura más redondeada en la superficie del lado de succión mejora el rendimiento del rotor de la turbina. Por otro lado, en la carrera de retorno, para el álabe EN005, el VAWT se beneficia de la curvatura máxima del perfil (Sengupta *et al.* 2019).

- A. R. Sengupta et al. en su análisis numérico, examinaron el rendimiento de una turbina Darrieus tipo H al comparar el perfil asimétrico S815 con el perfil simétrico NACA0018.

Los resultados indicaron que la forma del perfil S815 favorece una mayor productividad de la turbina en comparación con el NACA0018 (Sengupta *et al.* 2019).

- A. Rezaeiha et al. realizaron un estudio numérico mediante *CFD* con el propósito de eliminar la separación de flujo en las turbinas de eje vertical al utilizar succión de la capa límite a través de una abertura cerca del borde de ataque del perfil aerodinámico. Los resultados mostraron que la succión alrededor de la extensión cordal de la separación laminar puede prevenir su estallido, reducir la formación de vórtices y el enrollamiento del borde de fuga. Estos hallazgos benefician la fuerza de sustentación de los perfiles, reducen la resistencia y eliminan las fluctuaciones de la carga aerodinámica (Rezaeiha *et al.* 2019).
- A. Rezaeiha et al. realizaron un estudio numérico comparativo utilizando siete modelos de turbulencia de viscosidad inducida comúnmente empleados en trabajos de *CFD* en turbinas verticales, como el Spalart-Allmaras (*SA*),  $k - \epsilon RNG$ ,  $k - \epsilon Realizable$ ,  $K - \omega SST$ , entre otros. La validación se llevó a cabo mediante comparaciones con trabajos experimentales de tres VAWT con características geométricas distintas. Los resultados indicaron que modelos como *SA*, *inviscid*,

$k - \varepsilon RNG$ , y  $k - \varepsilon Realizable$  no lograron reproducir adecuadamente el rendimiento aerodinámico de las turbinas de eje vertical. En contraste, las variantes del modelo SST ( $k - \omega$ ,  $SSTI$  y  $TSST$ ) demostraron resultados más coherentes con los trabajos experimentales (Rezaeiha *et al.* 2019).

- Martínez *et al.* llevaron a cabo un estudio numérico mediante *CFD* para investigar si hay algún efecto en la forma de los perfiles aerodinámicos NREL S815 en relación con su coeficiente de potencia en una microturbina Darrieus tipo H al modificar sus geometrías. Realizó variaciones en el espesor del perfil con respecto al original (-6.4%, +12.8% y +6.4%), demostrando un aumento del  $C_p$  en la turbina al incrementar su espesor (Martínez *et al.* 2020).
- E. Leelakrishnan *et al.* a través de análisis numéricos buscaron optimizar el funcionamiento de la turbina Darrieus tipo H evaluando distintos valores de  $TSR$  con valores de 0 a 3. Los resultados demostraron un mejor rendimiento en el modelo con  $\lambda=1.8$  para velocidades de viento bajas (Leelakrishnan *et al.* 2020).
- S. M. H. Karimian *et al.* realizaron un análisis numérico con la meta de mejorar la eficiencia de la turbina Darrieus Tipo H mediante la introducción de una nueva configuración llamada 3-PB VAWT. Esta configuración implica álabes rectos cortados verticalmente y dispuestos a  $30^\circ$  para optimizar el rendimiento del aerogenerador. El estudio logró mejorar el rendimiento de la turbina, alcanzando un aumento del 6.06% en el coeficiente de torque con  $TSR$  de 0.44 y un incremento del 158.19% con  $TSR$  de 1.77, en comparación con una turbina helicoidal (H. Karimian *et al.* 2020).
- Thierry Villeneuve *et al.* llevaron a cabo un estudio numérico para analizar cómo la forma y posición de los puntales afectan la potencia de una turbina Darrieus a altos valores de  $Re$  utilizando *CFD*, comparando distintas

configuraciones con una sin puntal. El estudio numérico demostró que la eficiencia de una turbina Darrieus mejora en un 20% cuando los puntales se colocan a 90° con uniones combadas en comparación con una configuración sin puntal (Villeneuve *et al.* 2021).

- P. Ghiasi *et. al.* investigaron el impacto de la longitud de cuerda, la solidez, la relación altura/diámetro ( $H/D$ ) y el número de Reynolds en el rendimiento de una turbina Darrieus tipo H, utilizando simulaciones por Dinámica de Fluidos Computacional en diversas velocidades de viento. Los resultados revelaron que con bajos valores de  $TSR$  y alta solidez, la turbina experimentó un aumento significativo en el Torque y la Potencia generados (Villeneuve *et al.* 2021).

- M. Maalouly empleó simulaciones numéricas mediante Dinámica de Fluidos Computacional ( $CFD$ ) para analizar el comportamiento de dos turbinas Darrieus de eje vertical con palas rectas. Se exploraron variaciones en la longitud de cuerda y el ángulo de ataque de los perfiles, centrándose en entender las diferencias entre comportamientos transitorios y estables en las turbinas.

Los hallazgos del estudio indicaron que, ya sea en operaciones transitorias o estacionarias, la longitud de cuerda es el factor determinante que más afecta el rendimiento de la turbina (M. Maalouly 2022).

- P. Ghiasi *et al.* cen estudio mediante  $CFD$  FLUENT revelaron el impacto del valor de  $TSR$  superior a 1 en el rendimiento del aerogenerador Darrieus. Además, se evaluaron los efectos de los factores de diseño en el rendimiento a  $TSR$ 's inferiores a 1. En la investigación se exploraron aspectos como el perfil aerodinámico, longitud de cuerda y espesor para optimizar el aerogenerador. Se concluyó que aumentar la longitud de cuerda mejora el rendimiento en regímenes específicos, mientras que reducir la longitud de cuerda puede ser

beneficioso en  $TSR$ 's más altos (Ghiasi *et al.* 2022).

- Enderaaj Singh *et al.* realizaron un análisis numérico tridimensional mediante ecuaciones de Reynolds Navier Stokes y el modelo de turbulencia  $k - \omega$  ( $SST$ ) para mejorar la eficiencia de una microturbina Darrieus tipo H. Sometieron el perfil aerodinámico S-1046 en corrientes de viento acelerado proveniente de una torre de enfriamiento en cuatro turbinas con diferentes relaciones de aspecto ( $RA$ ) y diámetros de rotor. La turbina con  $RA=0.44$  y  $TSR=2.5$  mostró la mejor eficiencia, alcanzando  $C_p=0.294$ . (Singh *et al.* 2023).
- Yan Li *et al.* examinaron a fondo los métodos de tecnología  $CFD$  utilizados en el análisis de turbinas eólicas de eje vertical con álabes rectos. Se evaluó el tamaño del dominio de estudio, la discretización y el cálculo del paso temporal. Los hallazgos de la investigación revelaron conclusiones significativas:
  1. La solidez de la turbina guarda una relación directa con el tamaño del dominio de estudio.
  2. La parametrización del paso temporal debe ajustarse en función del  $TSR$ . Para  $TSR \leq 2.2$ , se recomienda un paso temporal pequeño; para  $2.2 < TSR \leq 3.3$ , el paso óptimo es equivalente al tiempo que tardará el rotor en recorrer  $0.5^\circ$ ; mientras que para  $TSR > 3.3$ , se aconseja que sea similar al tiempo de rotación necesario para recorrer  $1^\circ$  (Yan Li *et al.* 2023).

En la Tabla 1.1 se presenta una comparativa de los parámetros relacionados con la velocidad de punta, la solidez y la velocidad utilizados en estudios numéricos. El propósito de estos estudios es mejorar la eficiencia de las turbinas de eje vertical.

Tabla 1.1. Comparación de parámetros en distintos estudios numéricos.

Autor	(TSR)	$\sigma$ (Solidez)	$V$ (m/s)	Dimensiones de Dominio (m)
Mohamed	2, 4, 7	0.1	9	25.75x25.75
Castelli	1.44, 2, 2.33	0.5	9	100x80
Sengupta	1.48, 1.52, 1.43	0.51	4, 6, 8	4.35x2.9
R. Martinez	1.48	0.51	6	4.35x2.9
Islam Hashem	4	0.1	9	25.75x25.75
Sung Jung Joo	1.79	0.5, 0.7, 0.2	7	80x40
Enderaaj Sigh	1.5, 2.5, 3.5	0.3	9	3.42x4.56
Saïf Dî Ferthaï	2.5, 3	0.25	9	15x4
Roaa Ansaf	2.33	0.5	9	24.72x12.36
Simone Giorgetti	2.3	0.04, 0.1	8	26.4x19.2
M.H. Mohamed, A. M. Ali	2-9	0.1	5	50x50

### 1.3 Planteamiento del problema.

La mayoría de los estudios se centran en potenciar el rendimiento de los aerogeneradores de eje horizontal, ya que han demostrado ser más eficientes en la generación de corriente eléctrica. Su diseño y funcionamiento han propiciado un impacto superior en comparación con los aerogeneradores de eje vertical.

Contrario a esto, los VAWT no han recibido la misma atención, a pesar de que presentan ventajas notables, como su accesibilidad en términos de costos de producción y mantenimiento, en contraste con los HAWT. Además, muestran una mayor adaptabilidad a diversos entornos de instalación y demuestran una mejor capacidad para ajustarse a las características del viento inestable (L. Silva *et al.* 2021).

Es cierto que estos aerogeneradores no han alcanzado mayor relevancia, principalmente por ciertas desventajas que presentan. Un ejemplo de ello es que sus velocidades de viento son notoriamente bajas cuando se encuentran cerca del nivel del suelo. Estos aerogeneradores presentan desafíos, como velocidades de viento bajas cerca del suelo y la falta de arranque automático. Además, su coeficiente de potencia es inferior al de los aerogeneradores de eje horizontal. Estos factores han contribuido a que no destaquen tanto en comparación con los HAWT.

La generación de corriente eléctrica en estos aerogeneradores es baja, motivando la realización de ajustes en la geometría del álabe en una micro turbina Derrius tipo H.

## 1.4 Justificación.

Promover la generación de energía eléctrica a través de fuentes sostenibles, como la energía eólica, es una vía para reducir el efecto invernadero y mitigar el impacto ambiental. La producción de electricidad mediante este tipo de tecnología ha demostrado ser de gran importancia, con un potencial prácticamente infinito. No obstante, se requieren investigaciones continuas para optimizar sus beneficios.

En México, el consumo eléctrico es significativo, y las velocidades del viento no suelen superar los  $10\text{m/s}$  debido a las condiciones geográficas y construcciones presentes. En este contexto, los aerogeneradores Darrieus pueden ser una opción viable para la generación de electricidad en estas zonas.

La turbina Darrieus tipo H ha captado la atención de los investigadores debido a sus propiedades destacadas. Su capacidad para adaptarse a alturas bajas, estructura sencilla, instalación accesible, independencia a la dirección del viento, bajos costos de mantenimiento y repuestos la posicionan como una opción atractiva (Castelli *et al.* 2014). El aerogenerador Darrieus tipo H ha destacado como el más eficiente entre las turbinas verticales al generar un mayor coeficiente de potencia (R. Martínez *et al.* 2020). Es por ello que, el propósito del presente trabajo es incrementar la eficiencia del aerogenerador, lo que contribuiría al avance de estos equipos.

## 1.5 Hipótesis.

Se ha evidenciado que ajustar el diseño de las palas eólicas puede incrementar la eficiencia, incluso a velocidades de viento bajas y medias (P. Krishnan *et al.* 2021). Por lo tanto, en este trabajo se propone que la modificación del espesor y/o cuerda del perfil aerodinámico S1046 puede potenciar la eficiencia y la potencia en una micro turbina de eje vertical Darrieus tipo H.

## 1.6 Objetivo.

Evaluar cómo la variación del espesor y la longitud de la cuerda de un perfil aerodinámico S1046 impacta en el coeficiente de potencia de una microturbina Darrieus tipo H.

## 1.7 Objetivos Específicos.

- Elegir opciones de espesores y longitudes de cuerda que se emplearán en la modificación del perfil aerodinámico S1046 para la turbina Darrieus tipo H.
- Realizar los diseños y discretización de cada modelo geométrico.
- Calcular el torque de cada turbina mediante dinámica de fluidos computacional, posteriormente, determinar la potencia y el coeficiente de potencia generados en cada modelo de estudio.

## **Capítulo 2. Marco teórico.**

### **2.1 Mecánica de fluidos.**

Se presenta como una disciplina de la física que se dedica al estudio de los fluidos, tanto en movimiento como en reposo. Su enfoque implica el análisis de magnitudes que pueden adoptar formas escalares, vectoriales o tensoriales, distribuyéndose en campos en relación con la posición y el tiempo. En el análisis de los fluidos, se aborda el estudio de sus transformaciones, con el propósito de aplicar principios fundamentales, como las leyes que rigen su fuerza y movimiento, seguidas por la observación de sus reacciones. Está dividida en dos subcategorías: la hidrostática que estudia los fluidos en reposo y la dinámica de fluidos que comprende los fluidos en movimiento (Y. A. Cengel 2004). Integra aplicaciones clave en ingeniería, ya que suministra las herramientas esenciales para diseñar y evaluar modelos de equipos y procesos. Su utilidad se extiende a diversos campos, como medicina, industria química, automotriz, espacial, generación de energía y estructuras hidráulicas, por mencionar algunos ejemplos (A. Z. Santiago *et al.* 2017).

### **2.2. Turbulencia.**

Se refiere al movimiento caótico e irregular de un fluido, donde sus partículas se desplazan de manera desordenada, generando remolinos aperiódicos. Este fenómeno incide en alteraciones de parámetros fundamentales, como la resistencia a la fricción y la transmisión de calor. Puede ser caracterizada como fluctuaciones no sistemáticas en variables dinámicas como velocidad, presión, temperatura, entre otras (R. Martínez *et al.* 2022).

La clasificación del tipo de flujo se logra mediante el cálculo de un número adimensional conocido como número de Reynolds (*Ec. 1*). Este valor relaciona las fuerzas de inercia y viscosidad en un fluido, sirviendo como indicador de flujo, que puede ser laminar o turbulento. Cuando el  $Re$  es inferior a 2000, se clasifica como un flujo laminar, caracterizado por un movimiento ordenado del fluido. En contraste, si el número supera los 4000, el flujo se considera turbulento, manifestando movimientos caóticos y desordenados en las partículas del fluido.

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad Ec. (1)$$

### 2.3 Ecuaciones de gobierno

Interpretan el comportamiento en un proceso de flujo y se sustentan en las leyes de conservación de masa (continuidad), movimiento (momento) y energía. Aunque comparten similitudes, varían en la variable dependiente que gobiernan cada una (*Ec. 2*). Los términos de la ecuación abarcan el estado transitorio (cambio de la variable en función del tiempo), convectivo (transporte de la variable dependiente debido al campo de flujo), difusivo (indicador del transporte de la variable debido al proceso de difusión) y término fuente (representa la generación o destrucción de la variable dependiente).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \nabla(\rho u\varphi) = \nabla(\Gamma\nabla\varphi) + S \quad Ec. (2)$$

## 2.4 Conservación de la masa

Durante un proceso, la masa no puede ser creada ni destruida, lo que destaca la importancia de considerarla en su totalidad en cualquier análisis. Dentro de un volumen de control, la masa permanece constante, lo que se traduce en que la suma de las variaciones de masa es igual a cero. En un proceso con flujo estacionario, el cambio de masa dentro de un volumen es igual a la diferencia entre la masa que entra y la que sale. Esta idea se puede expresar visualmente como se muestra en la Figura 2.1.

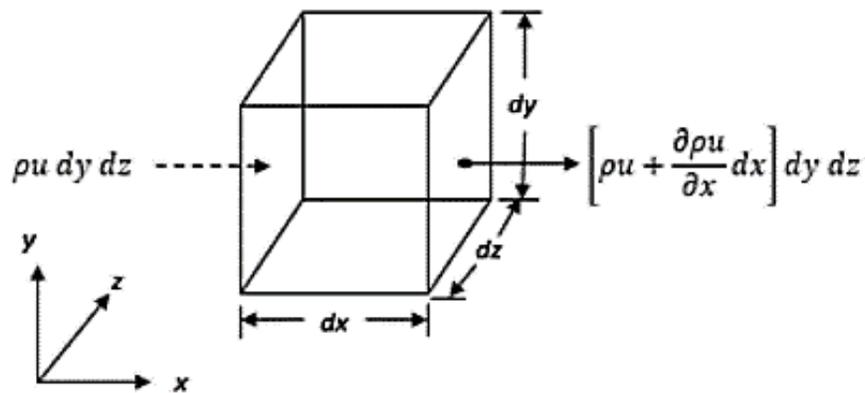


Figura 2.1. Balance de flujo de masa en un volumen de control (A. M. Jiménez 2017).

Cuando se produce un traslado de flujo de masa a través de una cara del sistema, se define como el producto de la densidad, el área y la velocidad normal a la superficie. Por lo tanto, al tener en cuenta las contribuciones de las diferentes direcciones en un volumen de control, la fórmula queda definida como en la *Ec. 3*.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \vec{V} = 0 \quad \text{Ec. (3)}$$

## 2.5 Conservación de energía

Se fundamenta en la primera ley de la termodinámica, que establece que el cambio total en la energía interna de un sistema cerrado es la diferencia entre la transferencia de calor agregada y el trabajo realizado por el sistema. En un sistema con un proceso de flujo estacionario, el contenido de energía se mantiene constante, y la energía que entra al volumen de control es igual a la que sale. El equilibrio de energía se logra únicamente a través de la transferencia de calor, trabajo y masa.

Al aplicar el balance de energía a los tres ejes del volumen de control, se deriva la fórmula de la conservación de la masa, como se presenta en la *Ec. 4*. Esta es aplicable cuando el fluido exhibe propiedades newtonianas y características generales de flujo no estacionario, viscoso, conductor de calor y compresible (A. M. Jiménez 2017). Cuando nos referimos a fluidos no newtonianos, cuya viscosidad cambia en función del esfuerzo o la tasa de deformación, es posible incorporar términos extras o realizar ajustes en la ecuación con el fin de considerar estas características no lineales.

$$\rho C_p \left( \frac{DT}{Dt} \right) + (\nabla \cdot V) = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) + \phi \quad \text{Ec. (4)}$$

## 2.6 Conservación de movimiento (momento)

Esta ley se fundamenta en la segunda ley de Newton, que establece que la cantidad de movimiento de un objeto es resultado de las fuerzas que actúan sobre él. En el contexto de partículas de masa, su momento se define como el producto de su masa por su velocidad y solo puede ser alterado mediante una fuerza ( $F$ ). La aceleración de la masa, equivalente a la fuerza que actúa sobre el volumen y la superficie (R. Martínez 2020), se determina realizando un balance de fuerzas en el sistema sobre los tres ejes. Este análisis revela que la fuerza total es la suma de la magnitud del gradiente de presión y la

divergencia del tensor de esfuerzos viscosos.

Al incorporar la fuerza de gravedad en el equilibrio de fuerzas, se obtiene la ecuación de movimiento lineal, como se presenta en la *Ec. 5*).

$$\rho g - \nabla p + \nabla \cdot \tau_{ij} = \rho \frac{D\vec{V}}{Dt} \quad \text{Ec. (5)}$$

## 2.7 Ecuaciones de Navier-Stokes

Constituyen un sistema de ecuaciones diferenciales de segundo grado no lineales que sirven como base para la mecánica de fluidos. Describen el movimiento de un fluido viscoso y rigen cualquier fenómeno que involucre fluidos newtonianos. Se considera un fluido donde el tensor de esfuerzo es proporcional al tensor de razón de deformación. Además, se asume un flujo incompresible e isotérmico, con cambios de temperatura muy bajos, y constantes en densidad, viscosidad dinámica y cinemática. Al eliminar la ecuación de conservación de energía, se obtiene la ecuación del tensor de esfuerzo viscoso (*Ec. 6*) (R. Martínez *et. al.* 2020)

$$\tau_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} \quad \text{Ec. (6)}$$

El tensor  $\varepsilon_{ij}$  muestra una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación. En el tensor de esfuerzo viscoso, hay 9 componentes, pero 6 de ellas son independientes debido a su simetría, como se describe en la *Ec. 7*.

$$\tau_{ij} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} & \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} & \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \quad \text{Ec. (7)}$$

En coordenadas cartesianas, el tensor de esfuerzo queda expresado como en la Ec. (8).

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} & \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} & \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \quad \text{Ec. (8)}$$

Al reemplazar el tensor de esfuerzo en la ecuación de Cauchy y combinarla con las ecuaciones de continuidad y movimiento en una formulación vectorial, se deriva la ecuación de Navier-Stokes para un flujo incompresible y viscosidad constante, como se presenta en la Ec. (9) (Y. A. Cengel 2004).

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla \vec{p} + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad \text{Ec. (9)}$$

Al expandir la ecuación de Navier-Stokes en coordenadas cartesianas quedan expresadas de la siguiente manera (Martínez *et al.* 2020):

$$\text{Componente x} \quad \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad \text{Ec. (10)}$$

$$\text{Componente y} \quad \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad \text{Ec. (11)}$$

$$\text{Componente z} \quad \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad \text{Ec. (12)}$$

## 2.8 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Es una rama de la mecánica de fluidos que aprovecha las computadoras para resolver ecuaciones de movimiento de fluidos mediante métodos numéricos y algoritmos. *CFD* se emplea para analizar el flujo de líquidos o gases, su aplicación ha sido clave en la resolución de problemas en diversos sectores industriales, como alimentación, aeronáutica, aeroespacial, automotriz, biomédica, electricidad y electrónica, entre otros (J. Xamán 2016).

La dinámica computacional de fluidos (*CFD*) sobresale al revelar fenómenos y predecir propiedades del fluido con precisión. Su capacidad para diseñar soluciones eficientes en tiempo breve y evitar costosas experimentaciones. Esta disciplina integra la mecánica de fluidos para comprender el comportamiento de los fluidos. Utiliza conceptos matemáticos para describir el movimiento mediante ecuaciones diferenciales. Estas operaciones se resuelven mediante ciencias computacionales y se ejecutan mediante un software compilador (J. Xamán )(ver Figura 2.2).

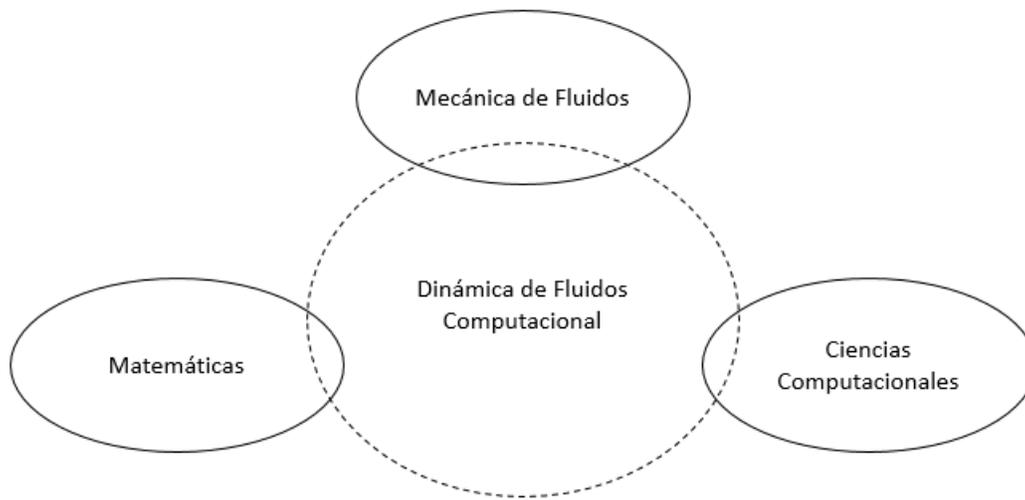


Figura 2.2. Disciplinas que involucra *CFD* (A. Rezaeiha *et al.* 2019).

### 2.8.1 Aplicación de *CFD* en turbomaquinaria.

*CFD* se emplea para analizar el movimiento de líquidos, gases o vapores a través de los álabes o componentes de las turbomáquinas, con el fin de resolver problemas operativos u optimizar su diseño. Sus aplicaciones clave incluyen la optimización en el diseño de bombas, turbinas hidráulicas, eólicas o de vapor, compresores centrífugos o axiales (Y. C. Gavilán 2020).

En la Figura 2.3, se puede apreciar el diseño de una turbina centrífuga mediante el uso de *CFD*.

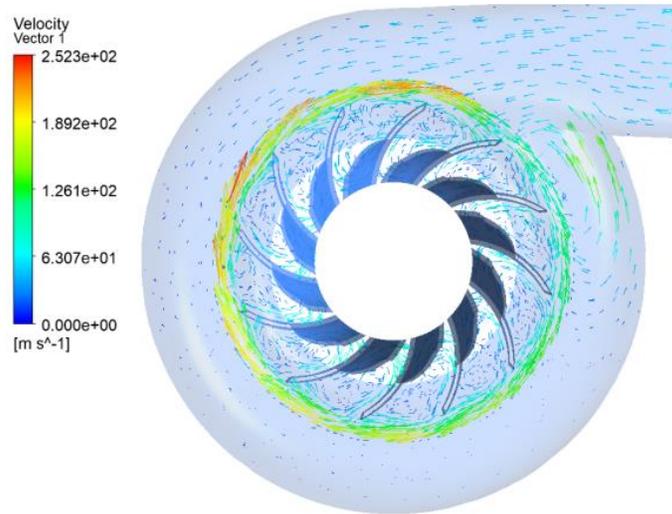


Figura 2.3. Diseño de turbina centrífuga por medio de *CFD* (J. U. Diaz 2021).

## 2.9 Análisis numérico

Rama que se enfoca en diseñar algoritmos para simular aproximaciones de solución a problemas en análisis matemático. Este proceso se divide en tres etapas: pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento, las cuales colaboran en obtener soluciones de fenómenos físicos.

### 2.9.1 Pre-procesamiento

Etapa en la cual se diseña el modelo geométrico se someterá a una discretización. Esta consiste en dividir las secciones en elementos más pequeños donde se resolverán las ecuaciones pertinentes. La calidad del mallado es crucial para la precisión de los resultados, ya que una malla de mayor calidad tiende a producir resultados más cercanos a la realidad y afecta la velocidad de tiempo en que se obtienen. Existen tres tipos de mallas que se eligen según la uniformidad de la geometría. El primero es el mallado

estructurado, conformado por cuadriláteros en dos dimensiones y hexaedros en tres dimensiones. El segundo es el mallado no estructurado, compuesto por cuadriláteros con triángulos. El tercero es la malla híbrida, que combina elementos de las mallas estructurada y no estructurada. La elección del tipo de mallado se aprecia visualmente en la Figura 2.4 (A. P. Schaffarczyk 2014).

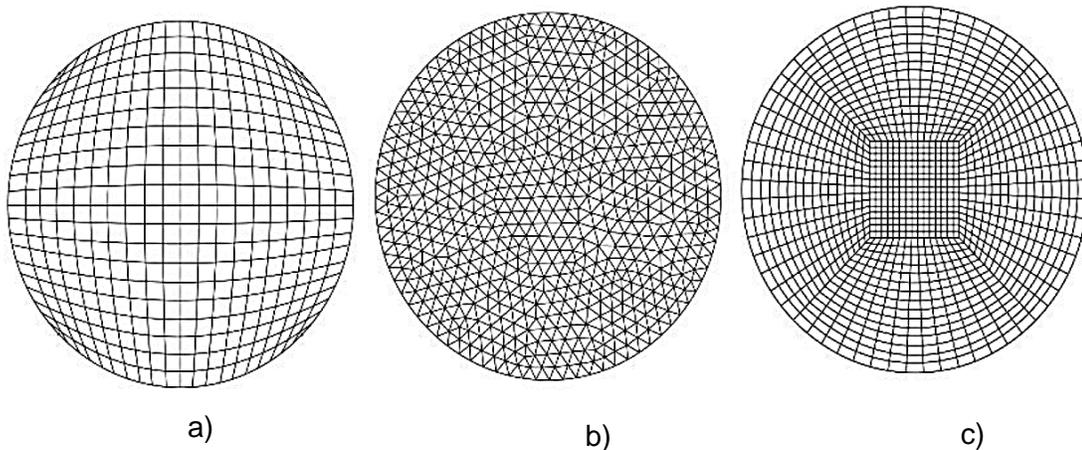


Figura 2.4. Tipos de malla. a) Estructurada, b) No estructurada, c) Híbrida (A. P. Schaffarczyk 2014).

## 2.9.2 Procesamiento

Etapa que se establecen se establecen las ecuaciones gobernantes y se resuelven las mismas. Se determinan los parámetros numéricos de la solución, junto con los valores y las condiciones de frontera a los cuales estará sujeto el modelo geométrico.

En el análisis numérico, se busca que los términos de las ecuaciones de momento o Navier-Stokes se anulen a un lado para obtener cero en el otro. No obstante, esto no siempre es factible debido a la presencia de valores residuales. En consecuencia, para obtener resultados precisos, se busca que

en cada iteración el residuo se aproxime a cero, estableciendo así un criterio de convergencia. Para estudios de energía, usualmente se emplea un criterio de convergencia de  $1 \times 10^{-6}$ , mientras que para masa el valor ideal es de  $1 \times 10^{-3}$  (Martínez *et al.* 2020). En análisis de tipo transitorio, es crucial seleccionar un paso temporal físico que defina el intervalo entre cada una de las soluciones.

### **2.9.3 Posprocesamiento**

Se visualizan los resultados obtenidos durante el procesamiento. En esta etapa se observa el comportamiento de la presión y velocidad del fluido a través de contornos, líneas de corriente y vectores. Estas representaciones permiten analizar la trayectoria, dirección y magnitud del fluido en cada zona del dominio de estudio (Y. A. Cengel, 2004).

## **2.10 Modelos de turbulencia**

Se define como la creación y aplicación de modelos matemáticos que anticipan los efectos de la turbulencia en un proceso de flujo sin la necesidad de resolver las escalas pequeñas de las fluctuaciones turbulentas. Dado que la mayoría de las veces los fluidos en la naturaleza son turbulentos, las áreas de estudio de interés suelen requerir soluciones que aborden los flujos turbulentos.

Las ecuaciones de Navier-Stokes producen resultados viables, sin embargo, su capacidad para resolver una amplia gama de escalas en espacio y tiempo es limitada. Por esta razón, se ha implementado el promediado mediante Reynolds (RANS). Este enfoque proporciona resultados uniformes en los campos de velocidad y presión al tiempo que introduce términos desconocidos en las ecuaciones de transporte, los cuales pueden ser especificados con los modelos de turbulencia óptimos para cada caso.

La elección de un modelo de turbulencia adecuado es crucial para estudiar un fenómeno, ya que permite obtener predicciones representativas del modelo real. El software ANSYS FLUENT ofrece una variedad de modelos de turbulencia aplicables en diversos campos, como aeronáutica, automotriz, turbomaquinaria, entre otros.

### **2.10.1 Modelo $K - \varepsilon$ Realizable**

Modelo similar al  $K - \varepsilon$  Standard, pero se distingue por sus mejoras especialmente diseñadas para flujos como chorros turbulentos. Se fundamenta en la resolución de ecuaciones para el transporte de la energía cinética turbulenta ( $K$ ) y la tasa de disipación de la energía cinética ( $\varepsilon$ ), lo que le permite considerar efectos del flujo como la convección y difusión de la energía. Es utilizado en procesos de flujo con números de Reynolds altos de régimen compresible o incompresible y puede ser aplicado en estudios estacionarios o transitorios.

### **2.10.2 Modelo $K - \varepsilon$ RNG**

Re-Normalisation Group ( $RNG$ ), por sus siglas en inglés es una variante del modelo  $K - \varepsilon$ , con la particularidad de que en las ecuaciones de Navier-Stokes se consideran los efectos de movimiento a una escala menor. En este modelo, se modifica el término de producción y se tiene en cuenta diversas escalas de movimiento en comparación con el modelo estándar.

Sus principales características son:

- La incorporación de un término adicional en su ecuación proporciona resultados precisos, especialmente en procesos de flujo forzado. Este ajuste adicional mejora la capacidad del modelo para representar de manera más

exacta los fenómenos turbulentos en situaciones específicas de flujo.

- Mejora la precisión de los flujos que presentan remolino.
- El modelo *RNG* proporciona una fórmula diferencial derivada para la viscosidad efectiva que incluye números de Reynolds bajos, mejorando así su precisión en diversos tipos de flujos.

### 2.10.3 Modelo $K - \omega$ SST

La variante *SST* (Shear Stress Transport, por sus siglas en inglés) del modelo  $K - \omega$  se puede emplear como un modelo de turbulencia de baja resolución sin requerir una función de amortiguación adicional. Este modelo tiene la capacidad de comportarse de manera similar a un modelo  $K - \varepsilon$  en corrientes de flujo libre, evitando ser demasiado sensible a las propiedades de turbulencia de la corriente de entrada. En áreas con mayor tensión normal, como regiones de estancamiento y con fuerte aceleración, puede generar niveles significativos de turbulencia (Wilcox *et al.* 1998). Este modelo implementa un proceso de amortiguamiento en las olas para prevenir la propagación de olas con alta inclinación (B. Devolder *et al.* 2018).

## 2.11 Energía eólica

La energía eólica se genera a partir de la diferencia de temperaturas entre diferentes regiones geográficas. Implica la conversión de la energía cinética generada por el viento en energía eléctrica o mecánica (D. S. Vainstein *et al.* 2019). Se destaca por ser una fuente de energía renovable, limpia y respetuosa con el medio ambiente al no generar gases tóxicos. Las aplicaciones de la energía eólica incluyen instalaciones para la producción de electricidad y bombeo de agua, siendo la generación eléctrica mediante turbinas eólicas la más común.

La velocidad del viento desempeña un papel crucial en el potencial eólico, ya que los aerogeneradores logran una eficiencia óptima con corrientes de aire elevadas. Por ende, las turbinas se sitúan estratégicamente en áreas geográficas que presentan velocidades de viento constantes y elevadas (S. Mathew 2006).

## 2.12 Aerogeneradores

Son turbinas diseñadas para aprovechar las corrientes de viento mediante perfiles aerodinámicos que generan movimiento de rotación. Esta energía se utiliza al conectarse a un alternador, generando corriente eléctrica (M. Hansem *et al.* 2015). Las turbinas eólicas se dividen en horizontales (HAWT) o verticales (VAWT) según el eje de rotación (Figura 2.5).

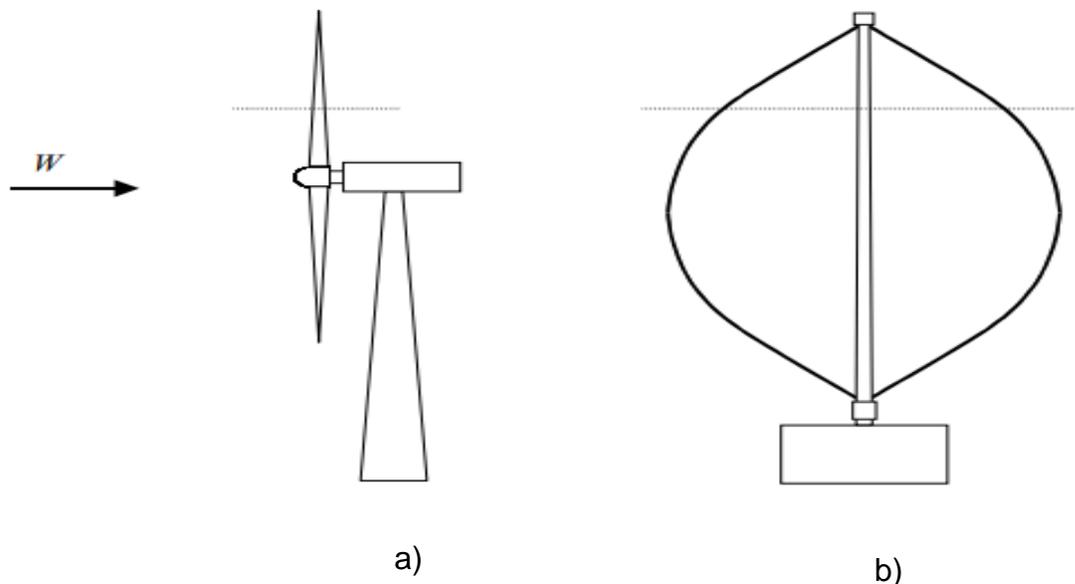


Figura 2.5. Turbinas de eje horizontal (a) y vertical (b) (H. Battista 2000).

### 2.12.1 Componentes del aerogenerador

- Rotor: El rotor es el conjunto de álabes conectados a un buje que induce el giro del eje de rotación. Aunque las turbinas con tres palas son las más comunes, las de dos palas también son efectivas.
- Góndola: Situada en la parte superior de la torre del aerogenerador, actúa como el chasis que alberga componentes clave, como el eje rotacional, la caja de engranajes y el alternador, todos conectados al rotor.
- Caja de engranes: Usualmente, la velocidad de los aerogeneradores es inferior a  $100\text{ rpm}$  para generar electricidad de manera efectiva, se requiere una velocidad en el rango de  $1000$  a  $3600\text{ rpm}$ . La función de la caja de engranajes es incrementar la velocidad del eje de rotación para llegar al rango requerido.
- Alternador: Tiene la función de convertir la energía mecánica generada por la rotación de los álabes del rotor en energía eléctrica. Al girar el rotor, se mueve el eje conectado al alternador, lo que induce corrientes eléctricas en el sistema de bobinado del alternador. Estas corrientes eléctricas generadas son transformadas y reguladas para producir electricidad utilizable (Y. Kumar *et al.* 2016).

### 2.12.2 Aerogeneradores de eje horizontal

Son los más utilizadas por su capacidad para instalarse a alturas elevadas, donde las velocidades del viento son mayores y la turbulencia es reducida. Su funcionamiento se basa en la generación de sustentación al interactuar el viento con los perfiles aerodinámicos, provocando el movimiento rotativo del rotor (Figura 2.6) (R. Martínez *et al.* 2020).



Figura 2.6. Aerogenerador de eje horizontal (Wordpress 2023).

### 2.12.3 Aerogeneradores de eje vertical

Este tipo de turbinas a diferencia de las de eje horizontal presentan ventajas al prescindir de mecanismos de orientación del viento. Sus componentes, como la caja de engranes y el alternador, están ubicados a niveles bajos, facilitando el mantenimiento y reduciendo los costos de montaje (H. Battista 2023).

Estos aerogeneradores fueron desarrollados antes que los HAWT, inicialmente no generaron gran interés debido a su baja eficiencia. Fue a principios del siglo XIX que se reevaluó su importancia, destacando sus beneficios en comparación con los de eje horizontal.

Los aerogeneradores de eje vertical se dividen en dos tipos principales: Savonius y Darrieus, siendo este último, y en particular la turbina Darrieus tipo H, la opción más reconocida y eficiente (Figura 2.7) (P. Schaffarczyk 2004).

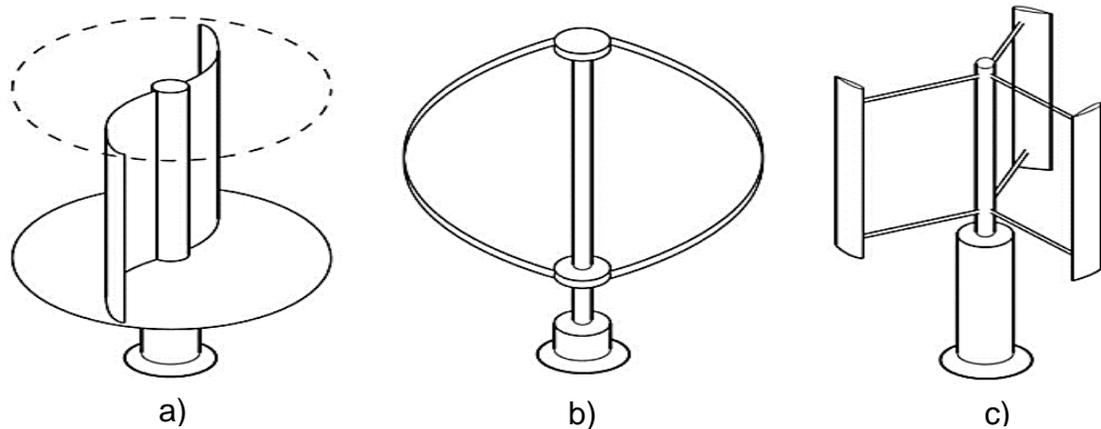


Figura 2.7. Aerogeneradores de eje vertical. Savonius (a), Darrieus (b), Darrieus tipo H (c) (P. Schaffarczyk 2004).

#### 2.12.4 Turbina Darrieus Tipo H.

Los aerogeneradores de tipo Darrieus fueron desarrollados en Francia en la tercera década del siglo XX y constan de 2 o 3 álabes dispuestos de forma paralela al eje del rotor. Este diseño incorpora elementos como la carcasa mecánica, sistema de guiada, caja de engranes y alternador para su funcionamiento. Estas máquinas operan aprovechando las fuerzas de sustentación generadas por el flujo de aire en contacto con las palas, las cuales están conectadas al eje mediante puntales. Además, cuentan con un generador situado en el eje de rotación para la producción de electricidad. Cuando el viento incide sobre la turbina, se produce un desplazamiento rotativo debido al efecto de sustentación en los álabes. Su diseño se puede visualizar en la Figura 2.8.

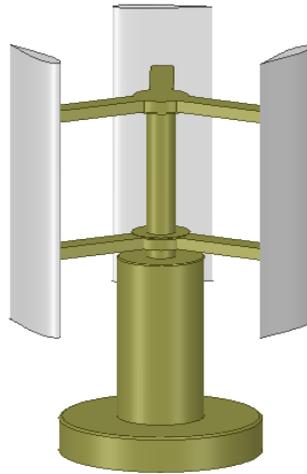


Figura 2.8. Turbina de eje vertical Darrieus Tipo H.

### 2.13 Velocidades del viento

La variación de la velocidad del viento se ve influenciada por factores como el tiempo y la altitud. A menor altura sobre la superficie terrestre, el rozamiento con obstáculos reduce la velocidad del aire. En contraste, a mayor altitud, el aire fluye más libremente, manteniendo velocidades elevadas y constantes, como se ilustra en la Figura 2.9 (L. A. Puerta, 2018).

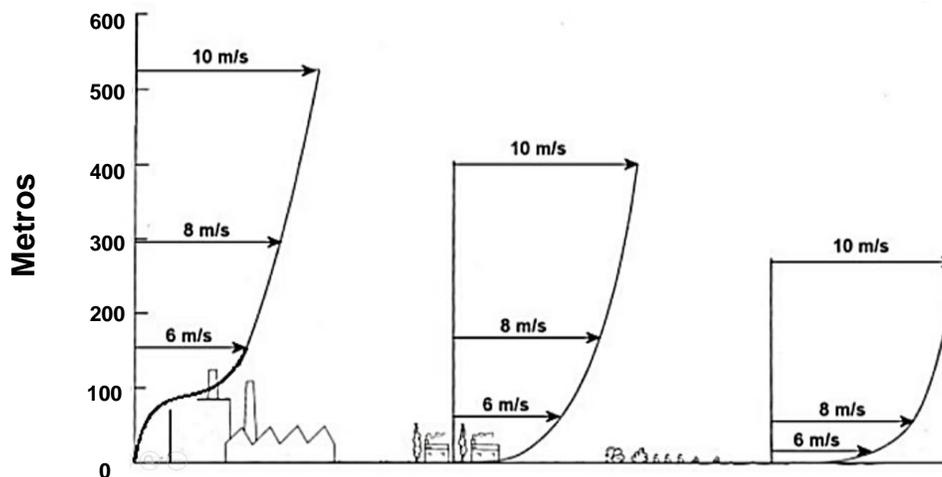


Figura 2.9. Variación de velocidades de viento mediante el incremento de altitud (L. A. Puerta 2018).

## 2.14 Perfiles aerodinámicos

Son el principal elemento con el que cuentan los aerogeneradores, los cuales controlan el rendimiento de una turbina (A. I. Carmona 2000). Un perfil aerodinámico se define como una sección de ala cortada por un plano paralelo a la misma longitud de su cuerda, estos se dividen en 2 tipos, simétricos y asimétricos, los primeros se caracterizan por tener su línea de curvatura media coincidente con su longitud de cuerda en comparación con los segundos. En la figura 2.10 se muestran algunos ejemplos de perfiles aerodinámicos de la serie NACA.

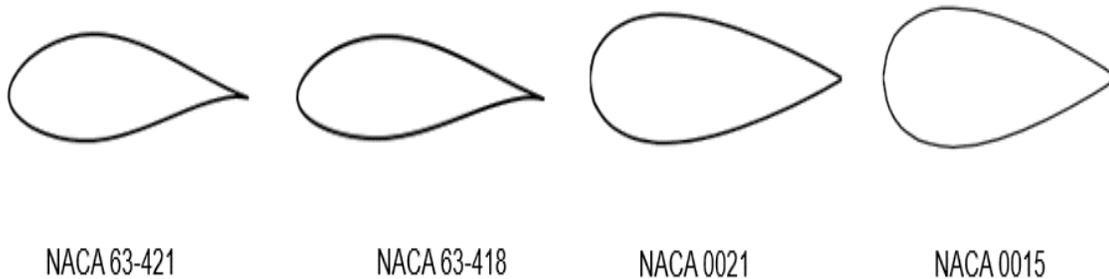


Figura 2.10. Perfiles aerodinámicos serie NACA..

La terminología del perfil aerodinámico se puede apreciar en la Figura 2.11 y se compone de la siguiente manera:

- *Cuerda*: Se refiere a la longitud transversal que conecta el borde de ataque con el de salida.
- *Línea de curvatura media*: Línea central que divide el intradós y el extradós del álabe.
- *Espesor*: Es la longitud de ancho que posee el perfil y es expresado

proporcionalmente con la longitud de la cuerda.

- *Radio de Curvatura*: Distancia desde el eje de la curva hasta el borde de ataque de la pala del rotor en un aerogenerador. Se utiliza para describir la curvatura de las palas del rotor (A. I. Carmona 2000).

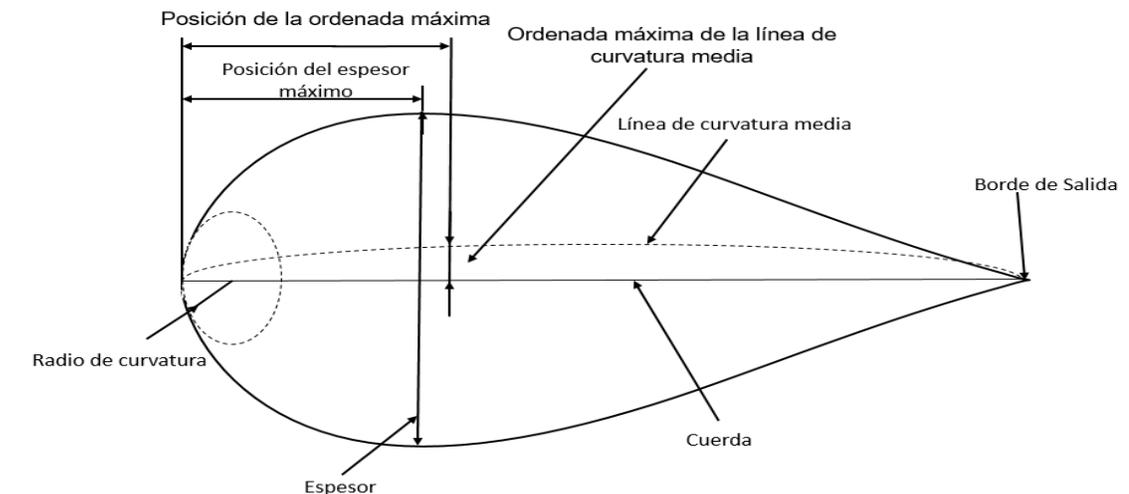


Figura 2.11. Componentes del perfil aerodinámico.

- *Ángulo de ataque*: Ángulo formado entre la longitud de la cuerda de la pala y la dirección de la corriente del viento. Es esencial en la aerodinámica de las palas del rotor de un aerogenerador, ya que influye directamente en la eficiencia y el rendimiento al afectar la sustentación y la resistencia aerodinámica de las palas. Ajustar el ángulo de ataque de manera adecuada resulta fundamental para optimizar la generación de energía (Figura 2.12) (A. I. Carmona 2000).

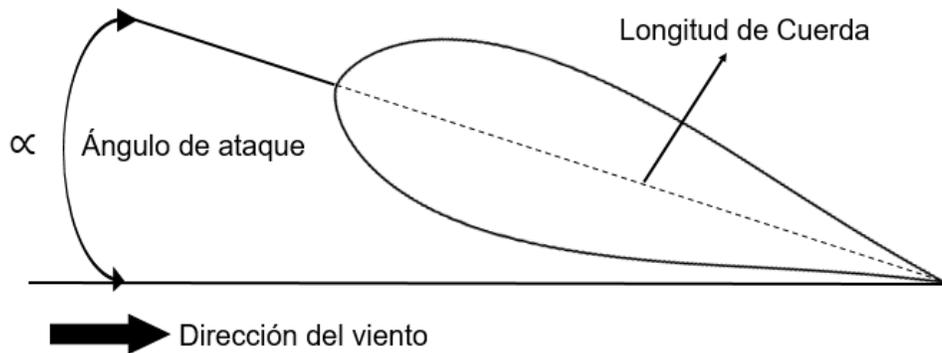


Figura 2.12. Ángulo de ataque de perfil aerodinámico.

### 2.14.1 Perfil aerodinámico S1046

El perfil aerodinámico S1046 se caracteriza por ser simétrico (Figura 2.13), proporcionándole una superficie de sustentación eficiente para una relación de velocidad de punta en el rango de 2 a 7 (I. Hashem *et. al.* 2017). Investigaciones previas han demostrado que su implementación en turbinas eólicas resulta en un coeficiente de potencia de salida superior en comparación con otros perfiles, como los de la serie NACA (F. Fang *et. al.* 2018).

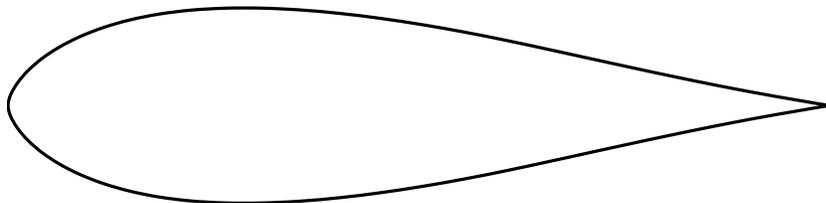


Figura 2.13. Perfil aerodinámico S1046.

## 2.15 Ecuaciones de interés en turbinas eólicas.

### 2.15.1 Coeficiente de Potencia

Magnitud adimensional, definida como la relación entre la energía generada por el rotor eólico y la energía cinética del viento.

Para saber la capacidad que tiene una turbina para transformar la energía cinética del viento en electricidad se utiliza la relación entre la potencia de la turbina ( $P_w$ ) y la potencia del viento ( $P$ ), representada en la *Ec. (13)*.

$$C_p = \frac{P_w}{P} \quad \text{Ec. (13)}$$

### 2.15.2 Potencia de turbina

Esta variable se obtiene mediante el producto del torque ( $T$ ) por la velocidad angular del rotor ( $\omega$ ). Ecuación (14).

$$P_w = T \omega$$

*Ec.(14)*

### 2.15.3 Potencia del viento

La potencia ejercida por el viento está relacionada con su densidad ( $\rho$ ), velocidad ( $V$ ) y el área del rotor ( $A$ ) expresada en la ecuación (3).

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad \text{Ec. (15)}$$

### 2.15.4 Relación de Velocidad de punta

Otro dato importante es la razón de velocidad en la punta ( $\lambda$ ) y está dada entre la aceleración del álabe con respecto a la velocidad del viento de flujo y se puede obtener con la ecuación (4) (R. Martínez 2022).

$$TSR = \frac{\omega D}{2V} \quad \text{Ec. (16)}$$

### 2.15.5 Solidez

La solidez ( $\sigma$ ) se define como la sección sólida ocupada por los álabes en el área transversal de la turbina, lo que indica la facilidad con la que la corriente de viento puede atravesarla (R. Martínez *et al.* 2020). Esta medida adimensional se calcula como la relación entre el producto de los álabes y su longitud de cuerda con el diámetro de la turbina (Ecuación 17).

$$\sigma = \frac{NC}{D} \quad \text{Ec. (17)}$$

## Capítulo 3. Metodología

### 3.1 Revisión de la bibliografía.

En el transcurso de esta investigación, se examinaron estudios relacionados con las turbinas Darrieus tipo H y el perfil aerodinámico S1046, así como diversos parámetros que tuvieron un impacto significativo en los resultados esperados.

### 3.2 Elaboración de Geometrías.

Se llevaron a cabo un total de 16 geometrías del perfil aerodinámico S1046, con variaciones en su espesor y longitud de cuerda que oscilan entre una reducción del 15% y un aumento del 25% en comparación con sus medidas originales. Los cálculos se realizaron utilizando los puntos de coordenadas de este perfil, escalados con las medidas empleadas por la literatura (I. Hashem *et al.* 2017), que tiene una longitud de cuerda máxima de 3.45cm y espesor de 0.586cm. Las longitudes de cada variación se pueden ver en la Tablas 3.1 y 3.2.

Las variaciones geométricas se realizaron con aumentos y disminución del 5%, abarcando como límites una reducción mínima de 15% hasta un incremento máximo del 25% con respecto a las medidas reportadas por la literatura (Singh *et al.* 2014), como se muestra en las Figuras 3.1 y 3.2.

Tabla 3.1. Variaciones de longitud de cuerda.

Variación de longitud (%)	Longitud de cuerda (cm)
-15	2.9325
-10	3.105
-5	3.2775
0 (Sin variación)	3.45
+5	3.6225
+10	3.8
+15	3.9675
+20	4.14
+25	4.3125

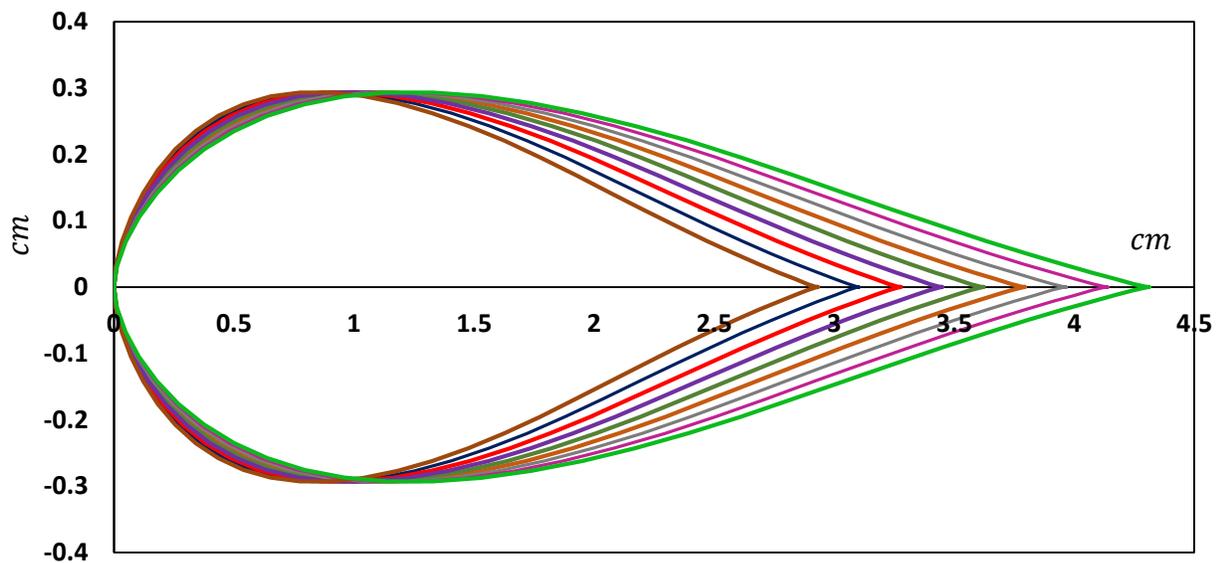


Figura 3.1. Variaciones de longitud de cuerda

Tabla 3.2. Variaciones de espesor.

Variación de longitud (%)	Espesor (cm)	
-15	0.498	
-10	0.5274	
-5	0.5567	
0 (Sin variación)	0.586	
+5	0.6153	
+10	0.6446	
+15	0.6739	
+20	0.7032	
+25	0.7326	

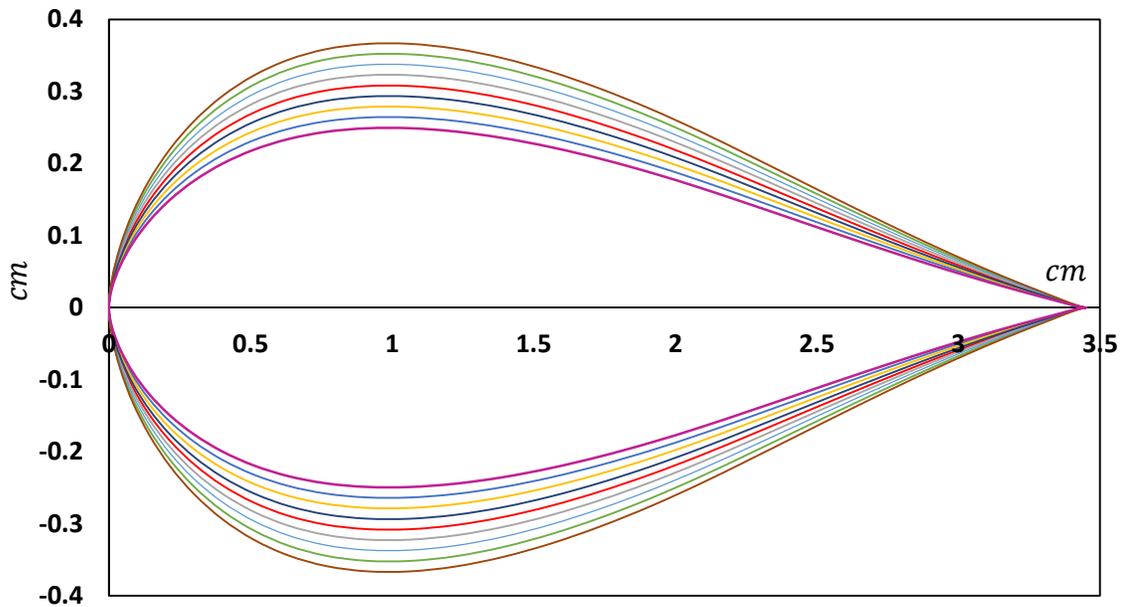


Figura 3.2. Variaciones de longitud espesor.

### 3.3 Pre-procesamiento.

#### 3.3.1 Geometría del dominio de estudio.

Con las dimensiones obtenidas para cada geometría, se procedió al diseño del dominio de estudio de la turbina utilizando el software Spaceclaim, el cual está integrado con el programa Ansys Workbench. Se adoptó el modelo previamente utilizado por Mohamed (I. Hashem y Mohamed 2017), el cual presenta un dominio de rotor con las características detalladas en la Tabla 3.3 y se muestra gráficamente en la Figura 3.3.

El rotor se posicionó en el centro del dominio de estudio, mientras que la geometría del dominio exterior se diseñó siguiendo las pautas de la literatura que abordan estudios numéricos del perfil S1046 (I. Hashem *et. al* 2017 y Castelli *et al.* 2011), con dimensiones  $50R$  de ancho por  $50R$  de altura (Figura 3.4).

Tabla 3.3. Dimensiones de Turbina Darrieus tipo H.

Características	Dimensiones
Altura de rotor ( $m$ )	1 (Simulación 2D)
Diámetro de rotor ( $m$ )	1.03
Dominio Exterior	$50R \times 50R$
Relación $H/D$	1
Solidez	0.1

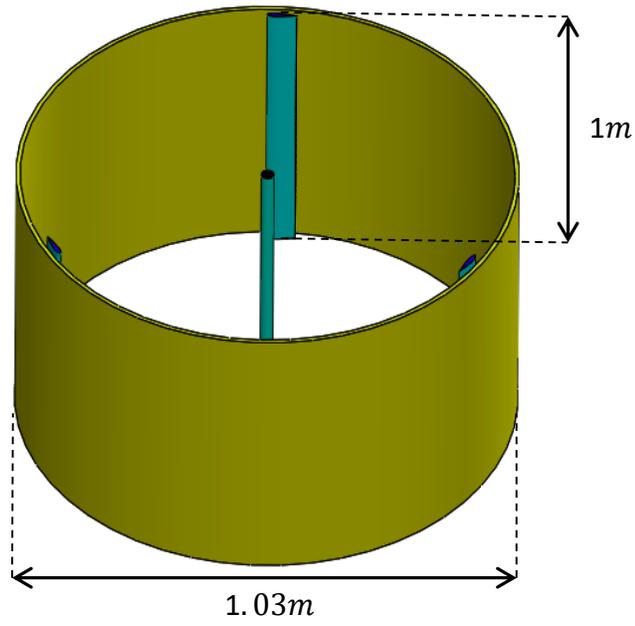


Figura 3.3. Diseño de rotor de turbina Darrieus tipo H.

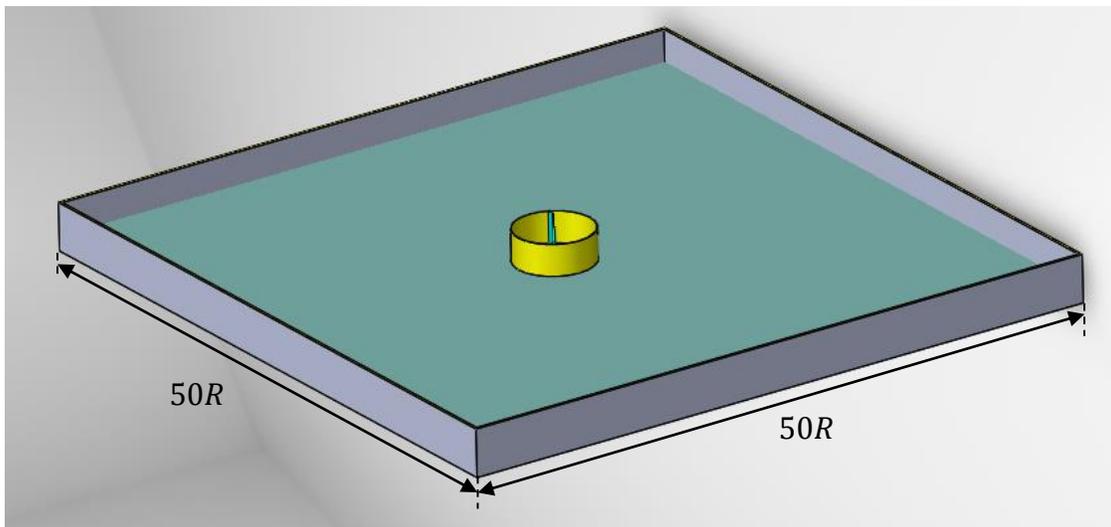


Figura 3.4. Dimensiones del dominio de estudio.

### 3.4 Mallado

Para la discretización, se adoptó la estrategia de Hashem y Mohamed (I. Hashem *et. al.* 2017), utilizando una malla no estructurada compuesta por elementos triangulares en todo el dominio de estudio, junto con una tasa de crecimiento en la malla de 1.2, que inicia desde la región de las paredes en el rotor y el dominio exterior. Las interfaces se subdividieron con el mismo número de nodos (250) para facilitar una convergencia de simulación más eficiente.

Para el dominio estacionario, se estableció un tamaño máximo de elemento de  $0.15m$  y un mínimo de  $7.5 \times 10^{-4} m$ . En cuanto al dominio rotatorio, se fijó un tamaño máximo de  $0.15m$  y un mínimo de  $7.5 \times 10^{-5} m$ . Las paredes de los perfiles, al ser áreas críticas, se sometieron a un mallado refinado, con una división de 500 nodos en los bordes y un total de 15 capas de inflación (Figura 3.5(c)) para lograr tener una distancia de pared normalizada.

Con el fin de optimizar el tiempo de cómputo y garantizar la validez de los resultados, se realizó un análisis de independencia de malla, generando cinco mallados con diferentes números de elementos y seleccionando aquella que presentara el menor error relativo ( $\mathcal{E}r$ ) con relación a los resultados reportados por la literatura (I. Hashem *et. al.* 2017). En la Tabla 3.4 se muestran los mallados realizados, siendo la malla 2 la seleccionada al contar con las características antes mencionadas.

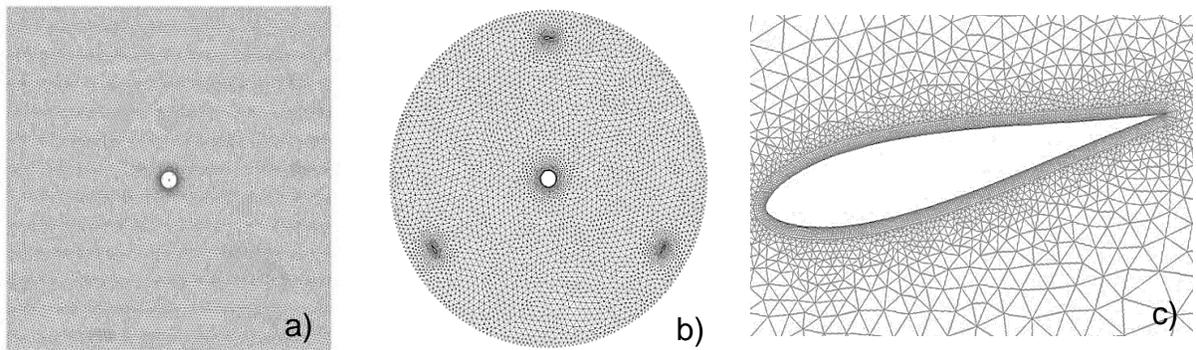


Figura 3.5. Malla no estructurada. (a) Dominio estacionario, (b) Rotor, (c) Perfil aerodinámico.

Tabla 3.4. Cálculo de error relativo.

	N° de elementos	Torque (Nm)	Potencia de Turbina (W)	$C_p$ (-)	$\mathcal{E}r$ (%)
Malla 1. Literatura (I. Hashem 2017)	153,200	2.303	161.216	0.3463	
<b>Malla 2</b>	<b>139,659</b>	<b>2.27</b>	<b>158.923</b>	<b>0.3413</b>	<b>1.476</b>
Malla 3	135,271	2.218	155.282	0.3335	3.722
Malla 4	127,289	2.220	155.437	0.3338	3.585
Malla 5	118,997	2.218	155.282	0.3335	3.68
Malla 6	110,471	2.088	146.228	0.3141	9.297

### 3.5 Procesamiento

La simulación numérica se ejecutó utilizando el software ANSYS Fluent con el objetivo principal de evaluar el efecto en la geometría de los perfiles aerodinámicos y calcular el torque generado por estos perfiles a una velocidad de  $9 \frac{m}{s}$  y una velocidad angular del rotor de  $70 \frac{rad}{s}$ . El proceso de simulación siguió el siguiente orden.

- Configuración del solucionador: Se seleccionó una simulación de tipo transitoria basada en la presión. La densidad no experimenta cambios significativos a alturas relativamente bajas, se optó por una formulación de velocidad absoluta. Dado que la geometría era bidimensional, se utilizó un espacio 2D plano.
- Modelo de turbulencia: Se evaluaron los modelos  $k - \varepsilon RNG$ ,  $k - \varepsilon Realizable$  y  $k - \omega SST$  para determinar cuál se aproximaba más a los resultados de la literatura (I. Hashem *et. al.* 2017). El modelo  $k - \varepsilon RNG$  fue el

que mejor se ajustó, aplicando una función de pared estándar. Este modelo ha demostrado ser óptimo en investigaciones previas que involucran dominios rotatorios (Sengupta *et al.* 2016 y R. Martínez *et al.* 2020). La configuración del modelo de turbulencia se presenta en la Figura 3.6.

Model	Model Constants
<input type="radio"/> Inviscid	Cmu
<input type="radio"/> Laminar	0.0845
<input type="radio"/> Spalart-Allmaras (1 eqn)	C1-Epsilon
<input checked="" type="radio"/> k-epsilon (2 eqn)	1.42
<input type="radio"/> k-omega (2 eqn)	C2-Epsilon
<input type="radio"/> Transition k-k-omega (3 eqn)	1.68
<input type="radio"/> Transition SST (4 eqn)	
<input type="radio"/> Reynolds Stress (5 eqn)	
<input type="radio"/> Scale-Adaptive Simulation (SAS)	
<input type="radio"/> Detached Eddy Simulation (DES)	
<b>k-epsilon Model</b>	
<input type="radio"/> Standard	
<input checked="" type="radio"/> RNG	
<input type="radio"/> Realizable	
<b>RNG Options</b>	
<input type="checkbox"/> Differential Viscosity Model	
<b>Near-Wall Treatment</b>	
<input checked="" type="radio"/> Standard Wall Functions	
<input type="radio"/> Scalable Wall Functions	

Figura 3.6. Configuración del modelo de turbulencia.

- En el método de solución se empleó un esquema SIMPLE para el acoplamiento de Presión-Velocidad, con una interpolación de segundo orden para la discretización espacial de las ecuaciones de momento.

De manera similar, se aplicó la misma condición a las paredes laterales del dominio con el objetivo de mantener un flujo uniforme alrededor de la turbina y evitar posibles perturbaciones en su entorno.

Dado que la simulación se llevó a cabo como un modelo transitorio, se implementó una malla deslizante en el dominio interno con una velocidad de  $70 \frac{rad}{s}$ , obtenida mediante la Ecuación (16) con un  $\lambda=4$ . Para establecer la conexión entre el dominio estacionario y el rotor, se incluyó una interface entre

ambos, en esta, la velocidad absoluta aseguró la correcta combinación de flujos de ambos dominios.

En la zona del dominio rotatorio, los perfiles aerodinámicos y el eje de rotación se definieron como paredes sin movimiento ( $\omega = 0 \text{ rad/s}$ ).

Finalmente, en la región de salida del dominio se aplicó una condición de salida de flujo para mantener la continuidad del viento y evitar fugas o acumulaciones, similitud a un análisis físico en túnel de viento. Las condiciones de frontera asignadas en el dominio de estudio se detallan en la Tabla 3.5 y se representan en la Figura 3.7.

Tabla 3.5. Condiciones de frontera.

Zona.	Condiciones de frontera.
1.- Entrada.	Velocidad de entrada ( $9 \text{ m/s}$ ).
2.- Paredes laterales.	Velocidad de entrada ( $9 \text{ m/s}$ ).
3.- Salida.	Salida de flujo.
4.- Álabes y eje de rotación.	Paredes.
5.- Interfase.	Deslizante.

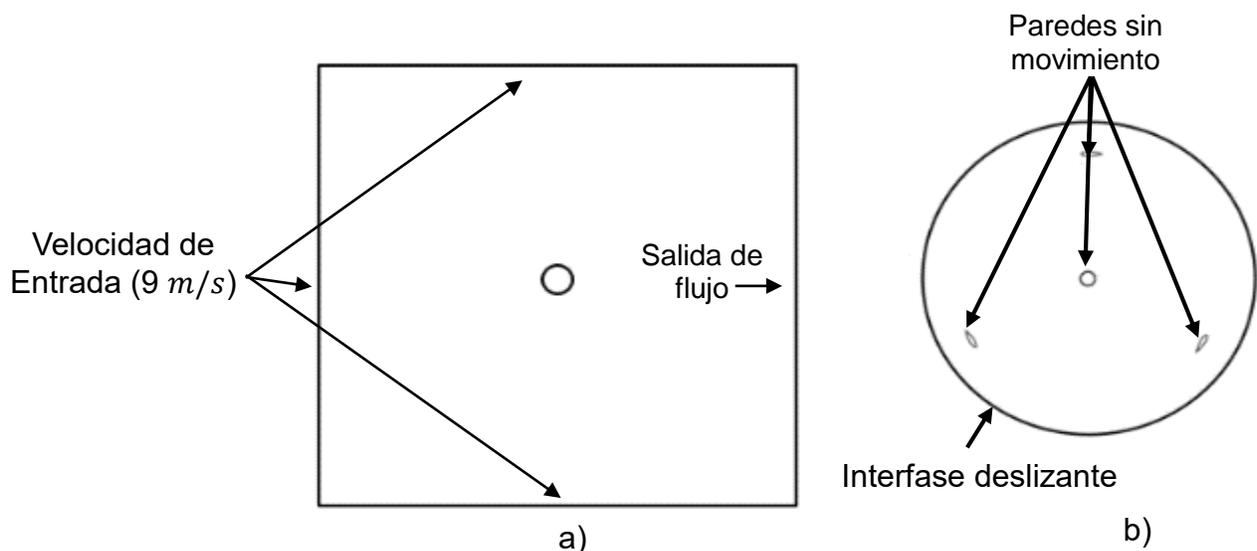


Figura. 3.7. Condiciones de frontera. a) Dominio estacionario, b) Cominio rotatorio.

- Los valores de referencia empleados incluyeron un área de barrido de  $1.03m^2$ , correspondiente a la longitud del rotor ( $1.03m$ ) y la altura de la turbina ( $1m$ ). La densidad del aire se fijó en  $1.225\frac{kg}{m^3}$ , ajustada a una temperatura promedio de  $15^\circ C$ , y se consideró una velocidad de  $9 m/s$ , tomando como punto de inicio del cálculo la entrada y el dominio interno como la zona de referencia.
- Se implementó un monitor en las zonas de los álabes para obtener el torque de los modelos geométricos. El centro de momento se ubicó en el eje de rotación, y el eje de torsión se definió como el eje "Z", donde se generaría el torque dinámico. Esto se realizó con el objetivo de calcular el torque generado en  $1.332s$  equivalente al tiempo que tarda la turbina en completar 15 rotaciones a una velocidad de  $668.45 rpm$ . La configuración del monitor se presenta en la Figura 3.8.

Per Zone  
 Average Over(Time Steps)  
 1

Moment Center		
X (m)	Y (m)	Z (m)
0	0	1

Moment Axis		
X	Y	Z
0	0	1

- alabes
  - eje
  - interfase\_estacionaria-non-overlapping
  - interfase\_rot-non-overlapping

Figura 3.8. Configuración del monitor de torque.

- El criterio de convergencia comúnmente establecido para estudios numéricos es de  $1 \times 10^{-3}$ . En este trabajo, se optó por un criterio de  $1 \times 10^{-4}$  en los residuales (Figura 3.9). El número total de iteraciones en cada paso temporal se determinó según el punto en el cual la simulación alcanzaba la convergencia, con el objetivo de lograr resultados que mantuvieran un equilibrio óptimo entre precisión y tiempo de simulación.

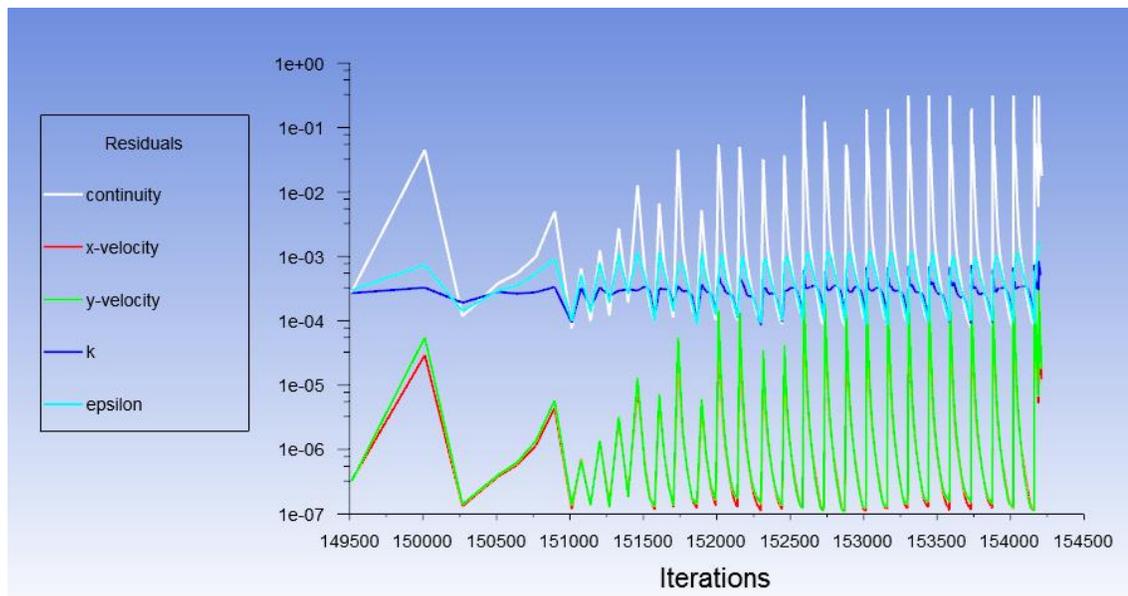


Figura 3.9. Convergencia de residuales.

- Se procedió con la inicialización de la solución, estableciendo el inicio del cálculo en la entrada con referencia a la zona relativa de las celdas.
- Finalmente, se configuró el arranque de la simulación, realizando los cálculos necesarios para determinar el tiempo de simulación y de cada paso temporal.
- Se propuso un paso temporal considerando el tiempo requerido para que el rotor avance un determinado grado de rotación. Tras determinar este tiempo, se dividió el ciclo en 30 pasos temporales, cada uno con una duración de  $2.98 \times 10^{-3} s$ . Basándonos en resultados de investigaciones previas (I. Hashem *et al.* 2017, M.H. Mohamed *et al.* 2019 y Castelli *et al.* 2011), se optó por 450

pasos temporales, lo que equivale a 15 ciclos de la turbina durante un período de 1.332s.

- Al finalizar la simulación, se recopilaron los resultados del monitor de torque, centrándose en los valores de las últimas 5 rotaciones. Esta elección se basó en la estabilidad de los cálculos, que se mantenían casi constantes, permitiendo obtener un torque promedio más representativo para cada uno de los modelos.
- Se llevaron a cabo los cálculos de la potencia y los coeficientes de potencia mediante las ecuaciones 13 y 14.

## Capítulo 4. Resultados y discusión.

En este capítulo, se analizaron los resultados de torque, potencia y coeficiente de potencia derivados de los análisis numéricos de cada turbina a una velocidad de viento constante de  $9\frac{m}{s}$ . Se compararon los resultados para identificar la turbina que experimentó el mayor aumento en eficiencia en relación con el modelo reportado por la literatura (I. Hashem *et al.* 2017).

### 4.1 Validación.

Los resultados iniciales se obtuvieron del análisis numérico de una turbina Darrieus sin modificaciones en sus perfiles, con el propósito de validarlos mediante la comparación con los datos reportados en la literatura (I. Hashem *et al.* 2017). La similitud en los resultados sugiere que la simulación es precisa y permite proceder con los estudios de los demás modelos.

#### 4.1.1 Resultados de validación.

El torque dinámico se obtuvo mediante el monitor instalado en el eje de rotación. El valor obtenido por la simulación fue de  $2.3134Nm$ , muy similar al reportado en la literatura de  $2.3031Nm$  (I. Hashem *et al.* 2017, M.H. Mohamed, *et al.* 2019). La Figura 4.1 muestra los resultados del monitor de Torque durante el análisis de validación.

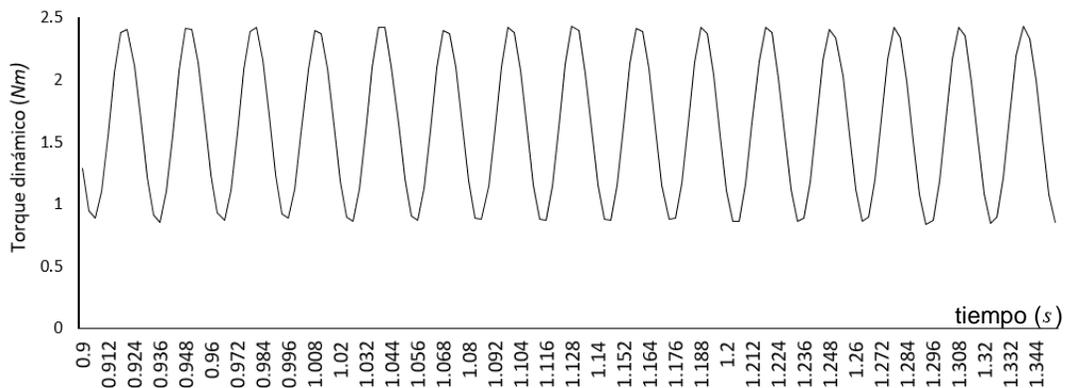


Figura 4.1. Gráfica de torque dinámico con respecto al tiempo.

La potencia obtenida por el análisis fue de  $161.938W$ , se asemejó a la reportada por la literatura de  $161.216W$  (I. Hashem *et al.* 2017). En cuanto al coeficiente de potencia, la simulación determinó un valor de  $0.3478$ , comparado con el valor de  $0.3463$ , generando un error relativo del  $2\%$ . Estos resultados respaldan la credibilidad y precisión de la simulación.

## 4.2 Resultados de torque

Con respecto a las variaciones de longitud de cuerda, se notó que al comparar el torque informado en la literatura (sin variación) con los obtenidos por los modelos con reducción del  $15\%$ ,  $10\%$ , y  $5\%$ , se observa una tendencia a la disminución, alcanzando un mínimo de  $0.06205 Nm$ . Posteriormente, con incrementos del  $5\%$  y  $10\%$ , el torque disminuye aún más, llegando a su punto más bajo con  $0.247 Nm$ .

En contraste, con alargamientos del  $15\%$ ,  $20\%$  y  $25\%$ , la tendencia cambia, mostrando un aumento progresivo y alcanzando un torque máximo de  $2.655 Nm$  en el modelo C+25. Estos resultados se representan gráficamente en la Figura 4.2.

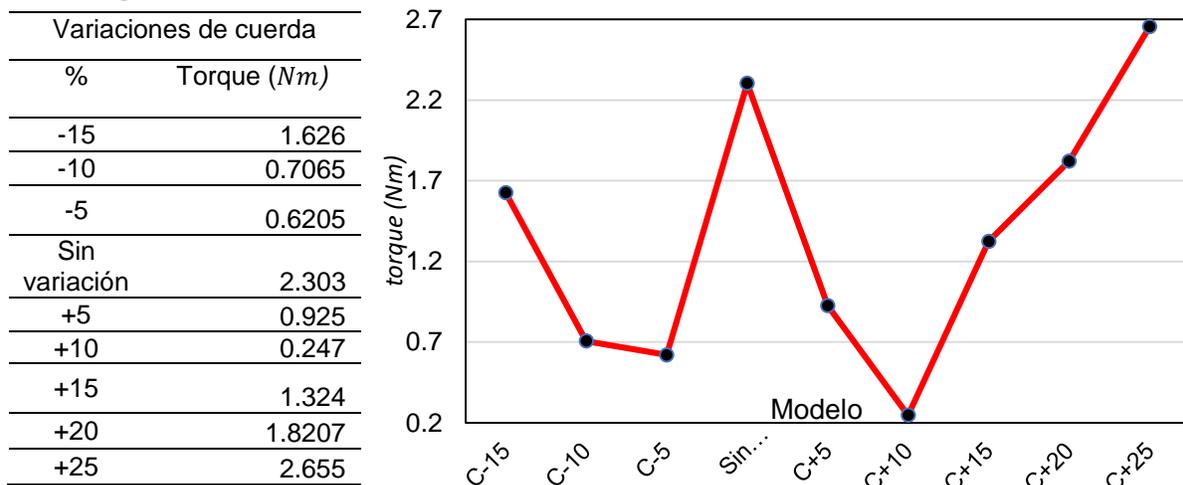


Figura 4.2. Resultados de torque en turbinas verticales con variaciones en la cuerda de sus álabes.

En relación con la comparación entre el torque reportado por la literatura (I. Hashem *et al.* 2017) y los resultados obtenidos en los estudios, se observa que al reducir el espesor en un 5%, 10% y 15%, el torque disminuye, alcanzando su punto más bajo en el modelo C-10 con 0.666 *Nm*. Posteriormente, al reducir el espesor en un 15%, el torque experimenta un incremento, llegando a 1.56 *Nm*; sin embargo, no logra igualar al valor reportado en la literatura.

Por otra parte, al aumentar el espesor en un 5%, el torque disminuye a 0.895 *Nm*. No obstante, la tendencia del torque cambia en los modelos E+10, E+15 y E+20, alcanzando un máximo de 2.465 *Nm* en este último caso. Por último, al alargar el perfil en un 25% de la cuerda, el torque vuelve a disminuir, llegando a 0.629 *Nm*. Los resultados y sus tendencias se ilustran en la Figura 4.3.

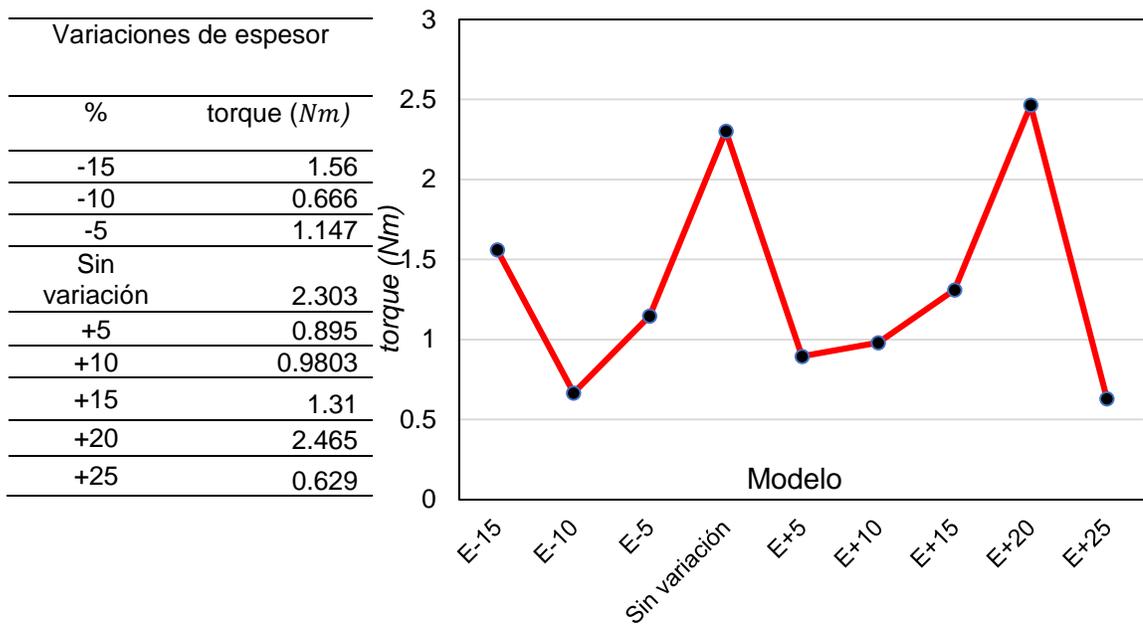


Figura 4.3. Resultados de torque en turbinas verticales con variaciones en el espesor de sus álabes.

Los análisis numéricos revelaron un rendimiento destacado en el torque de los modelos con un alargamiento del 20% en espesor y un 25% en la cuerda, siendo este último el que alcanzó una mayor generación alcanzando un total de  $2.655Nm$ . Además, se observa que el torque más bajo entre los modelos con variaciones de cuerda fue el de alargamiento del 10% (C+10), generando  $0.9803 Nm$ . Por otro lado, dentro de los modelos con variación en el espesor, el valor más bajo fue para aquel incrementado en un 25%, produciendo  $0.629 Nm$ . Estas variaciones en el torque se pueden deber posiblemente a las alteraciones en las dimensiones del modelo, repercutiendo en las características aerodinámicas y estructurales de la turbina Darrieus.

En la Figura 4.4 incluye la comparación entre el rendimiento de torque más destacado y el más bajo con respecto a los resultados reportados en la literatura.

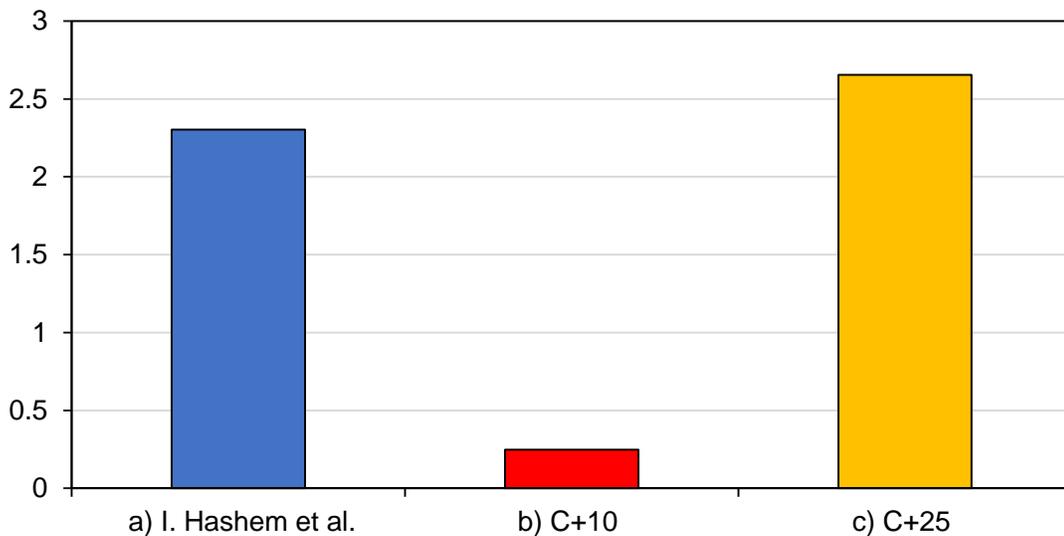


Figura 4.4. Comparación de resultados de torque: a) Reportado por la literatura, b) Más bajo, c) *I. Hashem et al.* 2017

#### 4.1.2 Contornos de Presión y Velocidad.

Una vez terminado el tiempo de simulación se llevó a cabo el posprocesamiento para obtener los resultados finales; se obtuvieron los contornos de presión y velocidad para observar el comportamiento del flujo del viento sobre los perfiles aerodinámicos.

En la Figura 4.5 se observan los contornos de presión estática de una turbina Darrieus a una velocidad de  $9m/s$  sin variaciones geométricas en sus perfiles aerodinámicos.

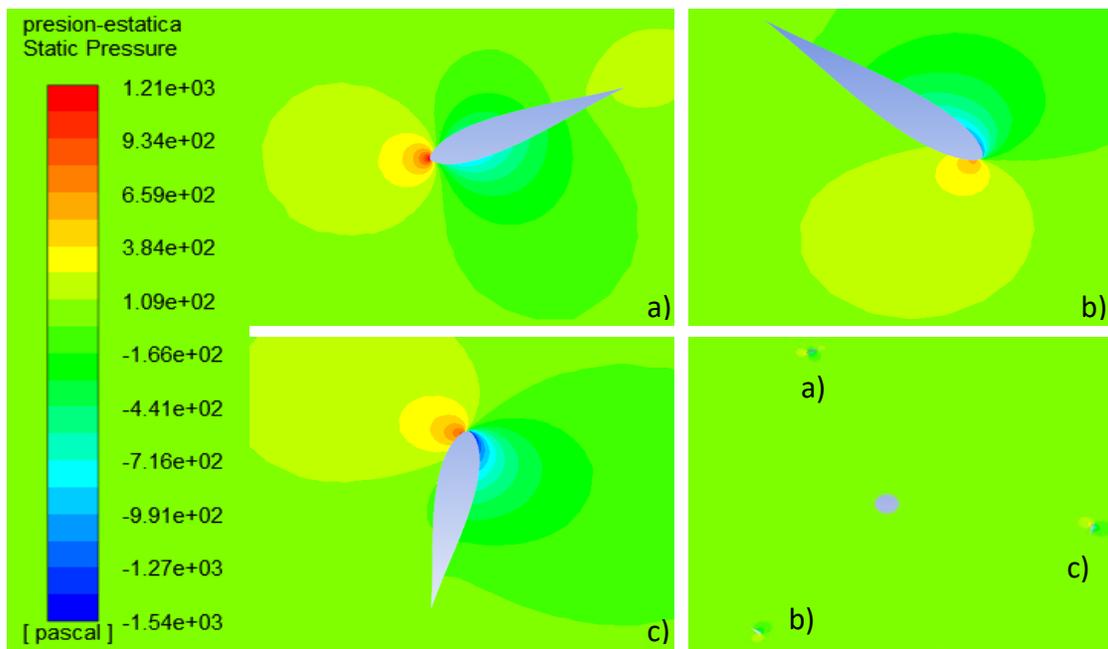


Figura 4.5. Contornos de presión estática. (a)(b)(c), Álabes de turbina.

En los contornos de velocidad total, se puede observar que el perfil aerodinámico en la parte de la punta y la cola presenta las zonas con la velocidad más alta, con una magnitud aproximada de  $57.8m/s$ .

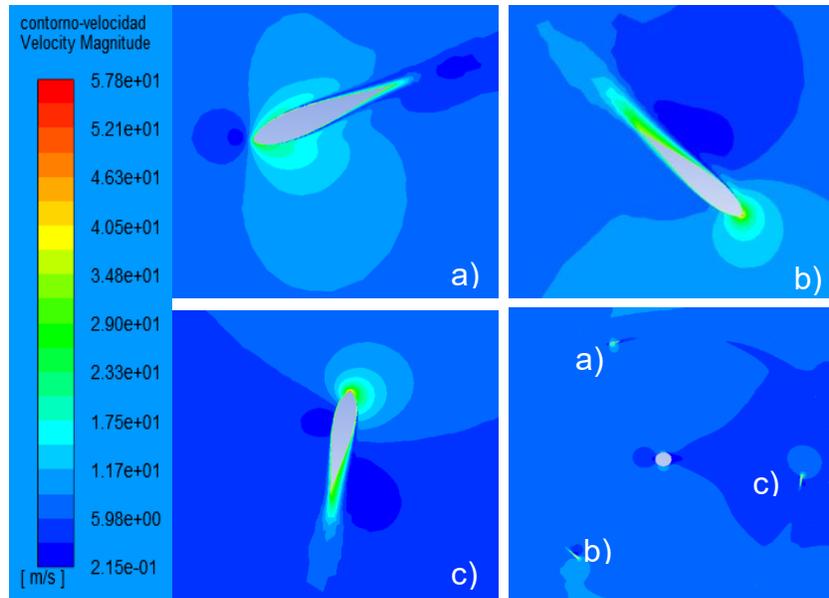


Figura 4.6. Contornos de velocidad total. (a)(b)(c), Álabes de turbina.

#### 4.1.2. Velocidad tangencial.

Los resultados del análisis numérico indican un máximo de  $36.3 \text{ m/s}$ , como se muestra en la Figura 4.7, muy similar al calculado con la ecuación general ( $v = \omega \cdot R$ ), donde  $\omega = 70 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$  y  $R = 0.515 \text{ m}$ , dando un total de  $36.05 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

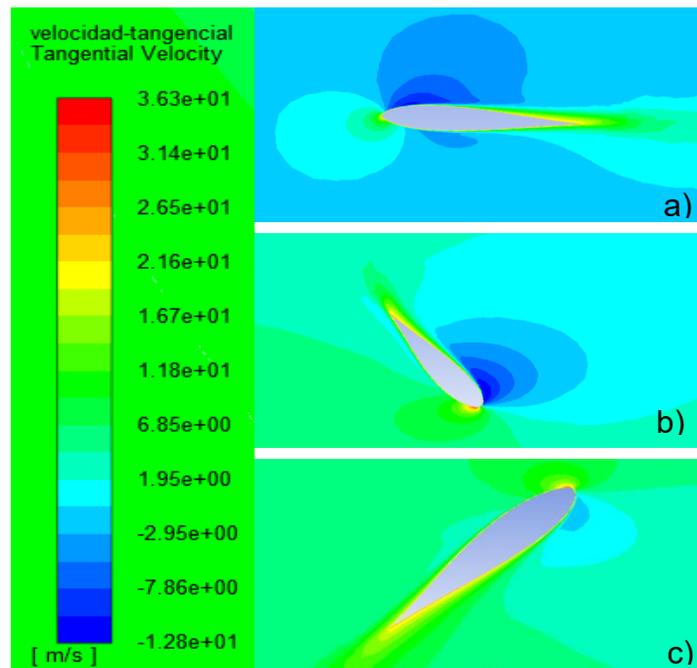


Figura 4.7. Contornos de velocidad tangencial. (a)(b)(c), Álabes de turbina.

### 4.3 Resultados de Potencia de turbina ( $P_w$ ).

El cálculo de la Potencia de las turbinas ( $P_w$ ) se realizó multiplicando la velocidad angular ( $70\frac{rad}{s}$ ) con el torque promedio obtenido por el análisis numérico. En las Tablas 4.1 y 4.2 se presentan los resultados obtenidos de cada modelo. Se observa que, en los modelos con variación de cuerda, la potencia más alta fue producida por la turbina cuyos perfiles se incrementan un 25%, generando  $P_w=185.85W$ . Por otro lado, el modelo menos óptimo fue el rotor con perfiles incrementados 10% de cuerda, produciendo  $17.29W$ .

Tabla 4.1. Resultados de Potencia de turbina en modelos con variaciones en longitud de cuerda en sus álabes.

Variación de cuerda (%)	Potencia ( $W$ )
-15	113.82
-10	49.455
-5	43.435
0 (Sin variación)	161.21
+5	64.75
+10	17.29
+15	92.68
+20	127.449
<b>+25</b>	<b>185.85</b>

Tabla 4.2. Resultados de Potencia de turbina en modelos con variaciones en espesor en sus álabes.

Variación de espesor (%)	Potencia ( $W$ )
-15	109.2
-10	46.62
-5	80.29
0 (Sin variación)	161.21
+5	62.65
+10	68.621
+15	91.7
<b>+20</b>	<b>172.55</b>
+25	44.03

## 4.2 Resultados de $C_p$

Se realizaron los cálculos del Coeficiente de Potencia con la *Ec. 13* para cada modelo geométrico, comprobando aumentos y disminuciones en la eficiencia de la turbina Darrieus. El modelo que generó un mayor coeficiente de potencia fue el que cuenta con un incremento del 25% de cuerda, teniendo un  $C_p=0.3992$ , aumentando un 15.3% con respecto al reportado por la literatura (Figura 4.8). Por el contrario, el  $C_p$  más bajó fue de 0.0371, disminuyendo 89.29% al reportado por I. Hashem (Hashem y Mohamed 2017) producido por el modelo con alargamiento de cuerda del 10% (C+10). Los resultados se pueden apreciar en las Tablas 4.3 y 4.4.

Tabla 4.3. Resultados de Coeficientes de Potencia de turbina en modelos con variaciones en espesor en sus álabes.

Variación de cuerda (%)	Coeficiente de Potencia (-)
-15	0.2445
-10	0.1062
-5	0.0933
0 (Sin variación)	0.3462
+5	0.1391
+10	0.0371
+15	0.1991
+20	0.2737
<b>+25</b>	<b>0.3992</b>

Tabla 4.4. Resultados de Potencia de turbina en modelos con variaciones en espesor en sus álabes.

Variación de espesor (%)	Coefficiente de Potencia (-)
-15	0.2345
-10	0.1001
-5	0.1724
0 (Sin variación)	0.3462
+5	0.1345
+10	0.1474
+15	0.1969
<b>+20</b>	<b>0.3706</b>
+25	0.0945

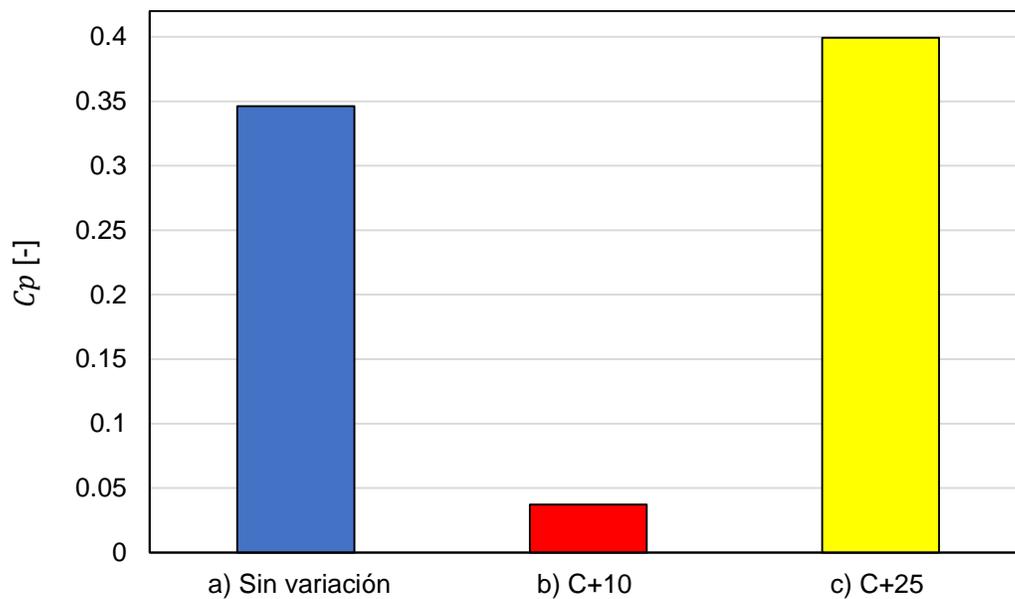


Figura 4.8. Comparación de  $C_p$ 's. (a) Reportado por la literatura (I. Hashem y Mohamed 2017), (b) Turbina con  $C_p$  mas bajo, (c) Turbina con  $C_p$  más alto.

### 4.3 Comparación de mayor y menor resultado de $C_p$ .

#### 4.3.1 Contornos de presión estática a $0^\circ$ .

En la Figura 4.9, se muestran los contornos de presión estática de la turbina con un incremento del 25% de cuerda en sus perfiles (C+25) comparada con la de incremento del 10% de cuerda (C+10), siendo los modelos con mayores y menores resultados respectivamente, mientras la turbina se encuentra en una posición de  $0^\circ$ .

Se observa que ambos dominios poseen una presión mayor ubicada en la punta de los perfiles aerodinámicos. Esto se puede deducir que ocurre al ser la zona en donde los álabes ejercen la mayor fuerza mientras rotan en sentido anti horario impactando con el flujo de viento. Se demuestra que la mayor presión la genera la turbina con un incremento de cuerda del 10% (Figura 4.9 (b)), alcanzando los  $1.29 \text{ kPa}$ , comparado con la turbina C+10 que generó  $1.05 \text{ kPa}$ . Esto se puede deber a que los álabes de la turbina C+10 cuentan con una mayor área, haciendo que la fuerza ejercida con el viento sea mayor.

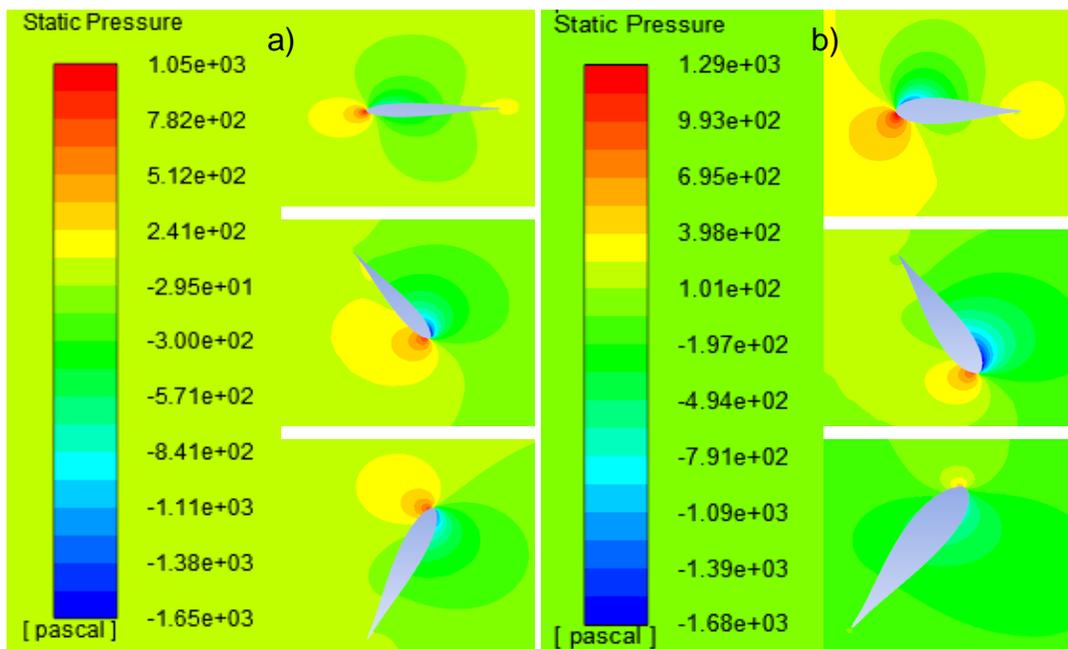


Figura 4.9. Contornos de presión estática en posición  $0^\circ$ . a) Modelo C+25, b) Modelo C+10.

#### 4.3.2 Contornos de velocidad total a 0°.

Al comparar los contornos de velocidad total a 0° de rotación (Figura 4.10), se evidencia que tanto el modelo más eficiente (C+25) como el de los resultados menores (C+10) exhiben velocidades máximas en las puntas y los bordes de salida de los perfiles. El modelo C+10, que se dirige hacia una mayor velocidad, alcanza los  $49.2 \frac{m}{s}$  en comparación con los  $46.2 \frac{m}{s}$  del modelo C+25. Sin embargo, la presencia de un área mayor en la punta de los álabes C+10 resulta en una velocidad aún más elevada en el flujo de aire.

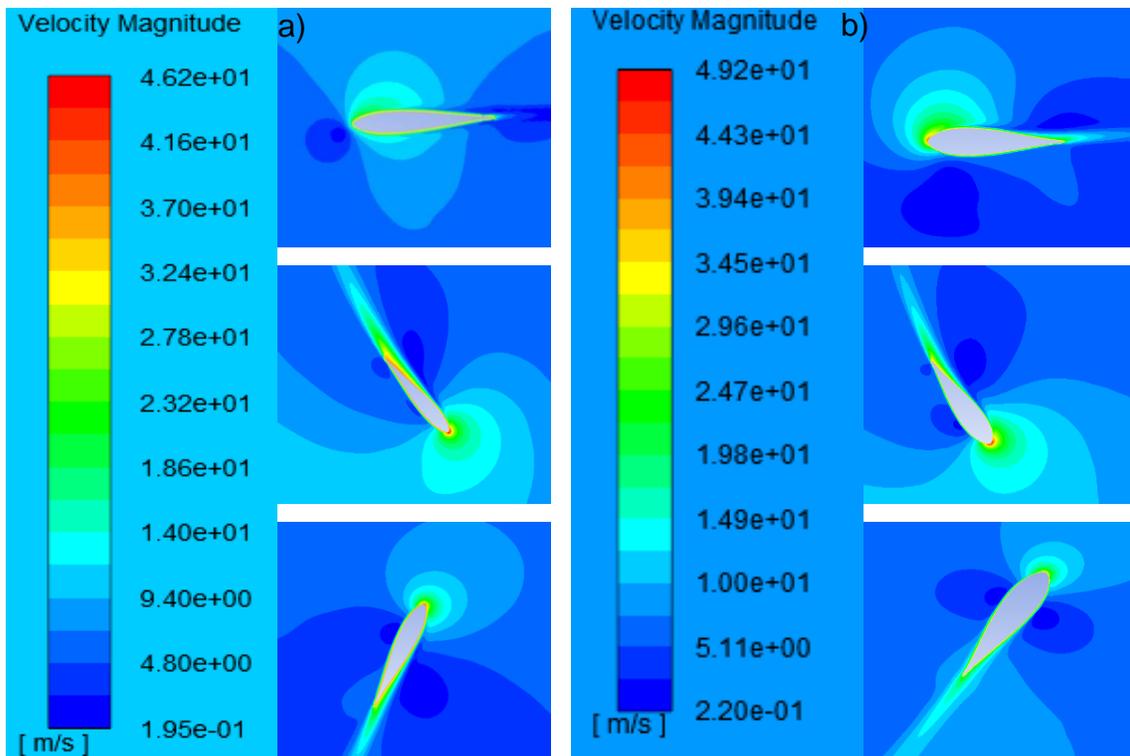


Figura 4.10. Contornos de velocidad total a 0°. a) Modelo C+25, b) Modelo C+10.

### 4.3.3 Contornos de presión estática a 45°.

Los resultados de presión estática (Figura 4.11) indican que, cuando el rotor se encuentra en una posición de 45°, esta tiende a incrementar en ambas turbinas. En el caso de la turbina C+25, la presión asciende a  $1.06\text{ kPa}$ , mientras que en el modelo C+10 alcanza los  $1.36\text{ kPa}$ . Sin embargo, se observa que en la turbina con incremento de cuerda del 25%, la presión es mayor en las zonas de los extradós e intradós, posiblemente debido a la forma más alargada de los perfiles, lo que la beneficia en esa posición específica del rotor.

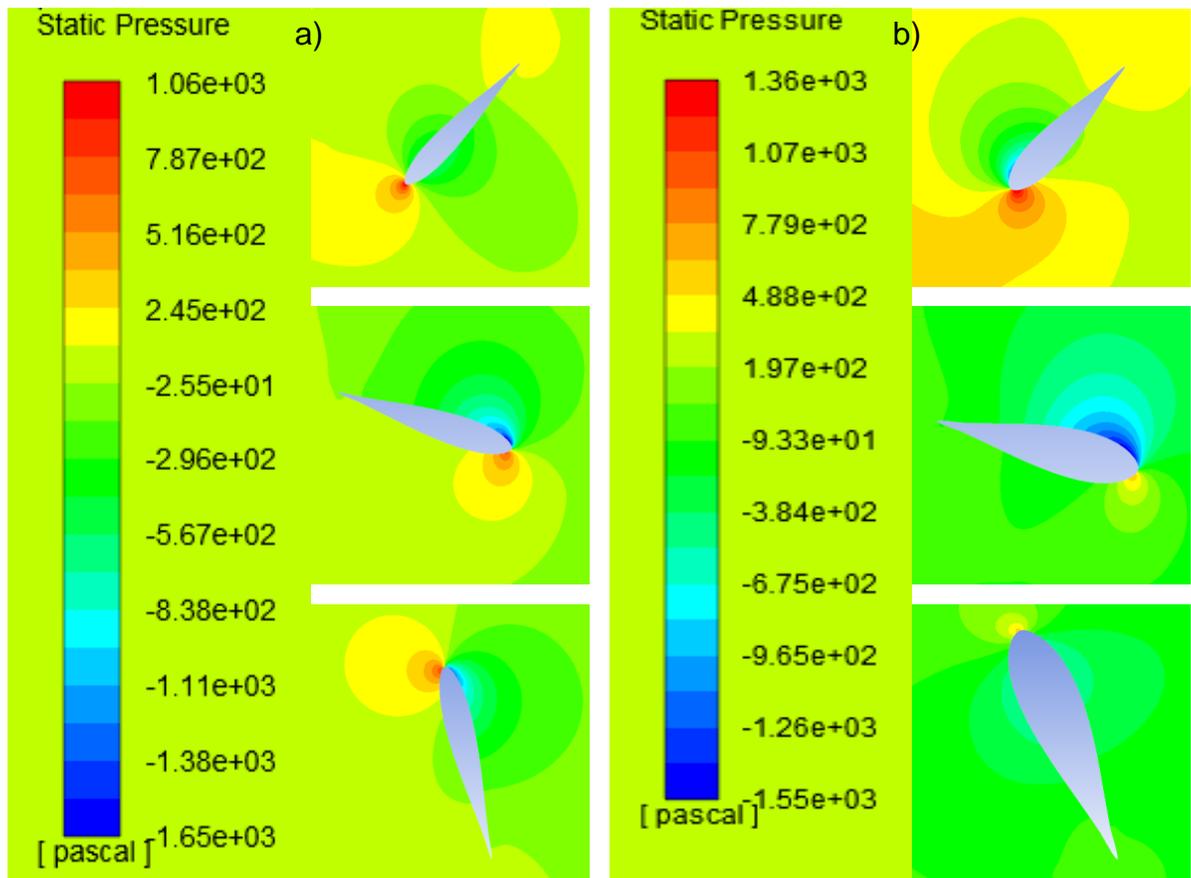


Figura 4.11. Contornos de presión estática a 45°. a) Modelo C+25, b) Modelo C+10.

#### 4.3.4 Contornos de velocidad total a 45°.

En la Figura 4.12 se presentan los contornos de velocidad de la turbina con mejores resultados (C+25) comparada con la menos óptima (C+10) cuando se encuentra en una posición de 45°. Se observa que, en esa posición, la velocidad del fluido es de mayor magnitud en el modelo con incremento del 20% de espesor, alcanzando los  $49.7 \frac{m}{s}$ . Por otra parte, el flujo en el modelo con incremento del 25% de cuerda tiene una velocidad máxima inferior de  $44.4 \frac{m}{s}$ ; sin embargo, es más aprovechado en los bordes de sus perfiles al tener un alargamiento mayor en la cuerda que el modelo C+10.

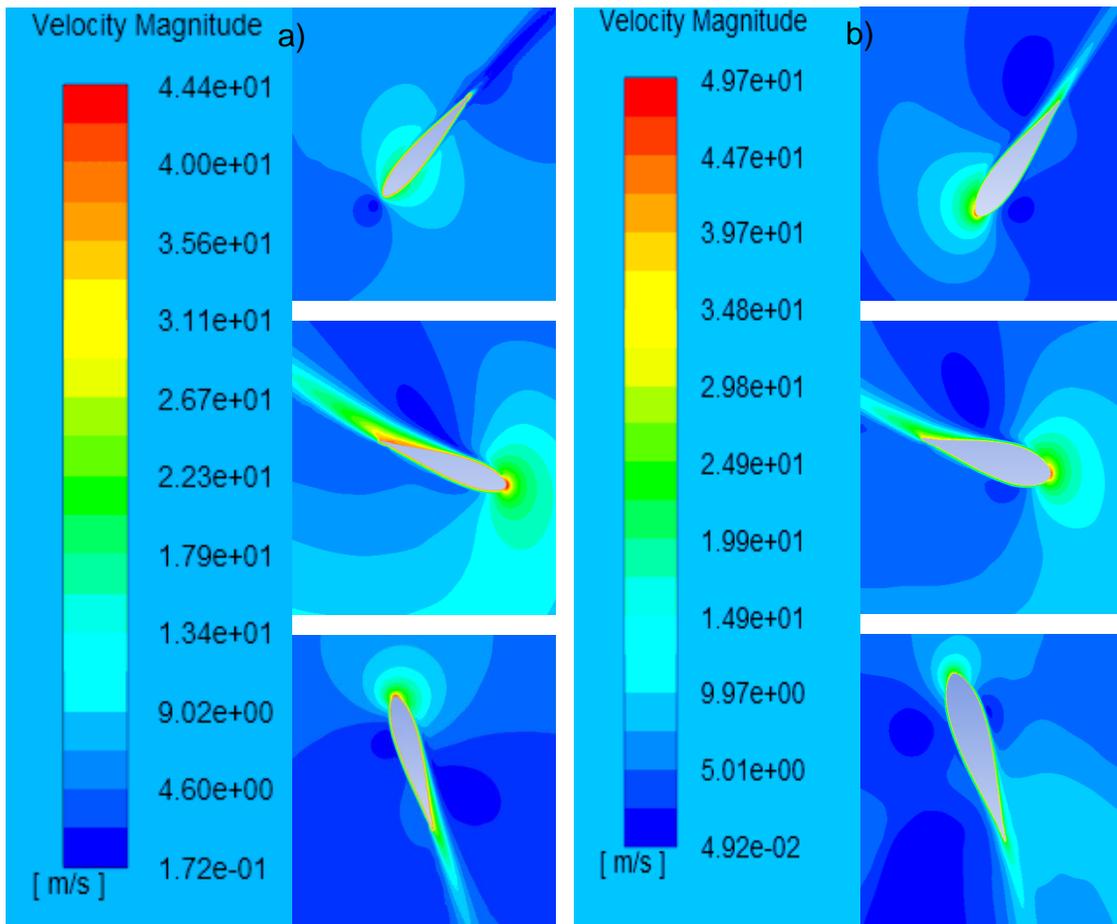


Figura 4.12. Contornos de velocidad total a 45°. a) Modelo C+25, b) Modelo C+10.

#### 4.3.4 Contornos de velocidad total a 90°.

En la Figura 4.13 se presentan los resultados de los contornos de presión estática de la turbina con un ángulo de rotación de 90°. Se observa una disminución con respecto a las posiciones de 0° y 45°, lo que sugiere que esta posición es menos favorable en ambos dominios. La turbina con incremento del 25% de cuerda ejerce una menor presión, alcanzando los 0.932kPa en comparación con el modelo C+10, que produce 1.06kPa, ubicadas principalmente en la punta y los bordes de salida de los perfiles.

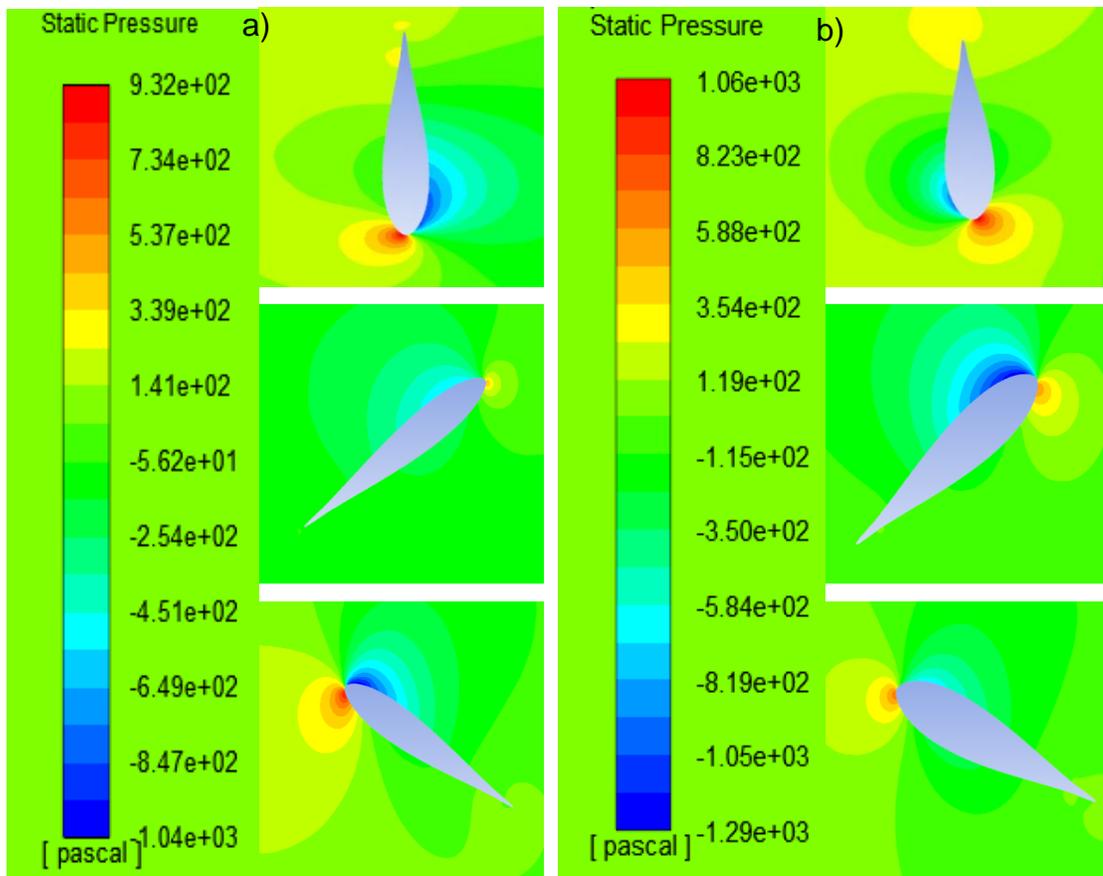


Figura 4.13. Contornos de presión estática a 90°. a) Modelo C+25, b) Modelo C+10.

#### 4.3.4 Contornos de velocidad total a 90°.

En la Figura 4.14 se presentan los resultados de velocidad total con un ángulo de rotación de 90°. Los contornos de ambos modelos indican que en esta posición es menos favorable para la turbina, ya que presenta resultados más bajos en comparación con los ángulos de ataque de 0° y 45°. El modelo con longitud de cuerda incrementada en 20% generó un flujo de viento máximo de  $46.4 \frac{m}{s}$ . Sin embargo, en el modelo C+25 se puede observar una velocidad máxima de flujo de  $36.5 \frac{m}{s}$ , predominando en los bordes de los perfiles y siendo mayormente aprovechada por los álabes de la turbina en comparación con el modelo C+10

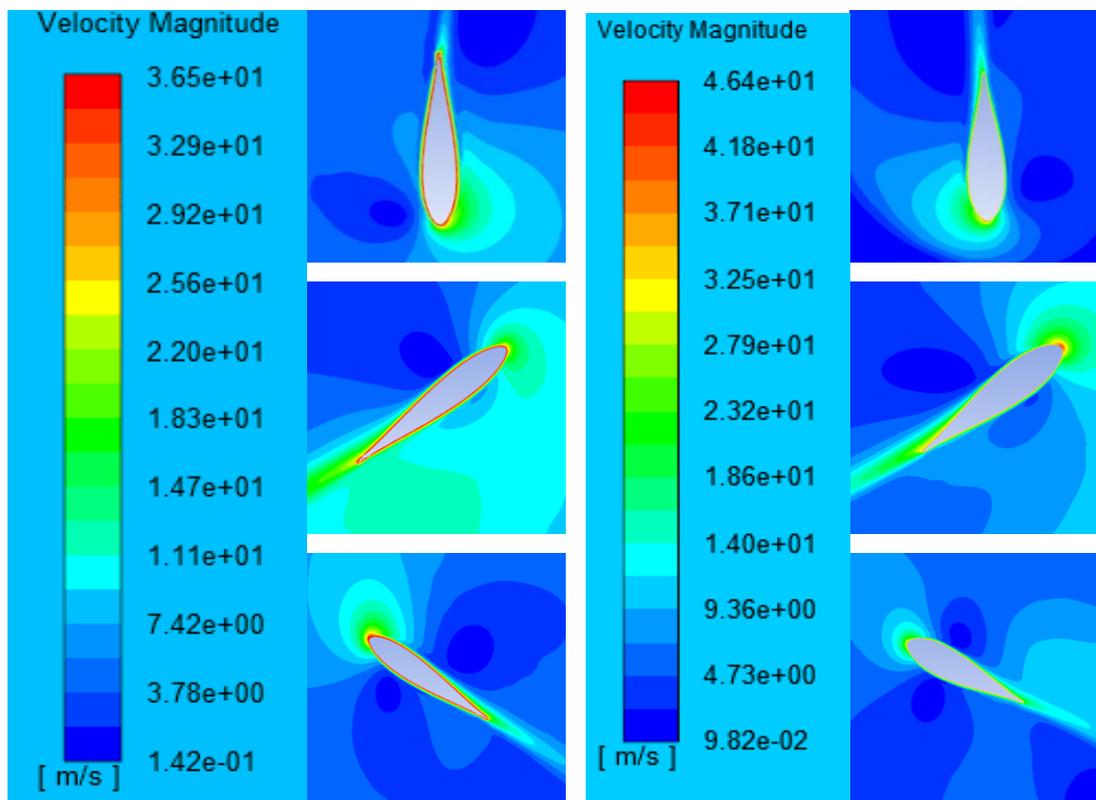


Figura 4.14. Contornos de velocidad total a 90°. a) Modelo C+25, b) Modelo C+10.

## Capítulo 5. Conclusiones finales y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

En esta investigación, se llevó a cabo un análisis numérico para evaluar cómo la modificación de la longitud de cuerda y el espesor del perfil aerodinámico modelo S1046 impacta en el torque, potencia y coeficiente de potencia de una turbina Darrieus Tipo H de tres álabes, sometida a una velocidad de viento de  $9 \frac{m}{s}$  y girando a una velocidad angular de  $70 \frac{rad}{s}$ .

- Los resultados evidenciaron que las geometrías de los perfiles aerodinámicos tienen una relación directa con el torque, potencia y coeficiente de potencia de la turbina Darrieus tipo H, alcanzando así una eficiencia máxima del 39.92% perteneciente al modelo C+25.
- Los modelos que demostraron un incremento en la eficiencia de la turbina, en comparación con los resultados reportados por los datos reportados (I. Hashem *et al.* 2017), fueron el de álabes con alargamiento de 25% de cuerda (C+25) y con incremento de 20% de espesor, obteniendo coeficientes de potencia ( $C_p$ ) de 0.3992 y 0.3706 respectivamente.
- La evaluación de los resultados demostró que la turbina con aumento del 25% en la longitud de cuerda de sus perfiles fue la más eficiente, logrando generar una potencia de 185.85W. En cambio, el modelo con incremento del 10% en el espesor de sus álabes mostró los rendimientos más bajos, con una potencia de 17.29W, aproximadamente un 89.25% inferior a los valores documentados en la literatura (I. Hashem y Mohamed 2017).

- La ejecución del presente estudio ha evidenciado que la energía cinética del viento se aprovecha de manera óptima con perfiles aerodinámicos S1046 incrementados en un 25% de su cuerda, superando los resultados reportados en la literatura en un 15.31%.

## **5.2 Recomendaciones**

Realizar investigaciones orientadas a mejorar el rendimiento de los aerogeneradores de eje vertical tipo H mediante ajustes en las longitudes de cuerda o el espesor de sus álabes, así como la exploración de perfiles aerodinámicos alternativos, se sugiere realizar análisis numéricos que abarquen una variedad de modelos geométricos. Este enfoque permitirá identificar el modelo que logre una optimización superior en el rendimiento de la turbina. Se destaca la importancia de explorar configuraciones diversas, ya que la eficiencia del aerogenerador vertical no sigue siempre una tendencia clara al aumentar o disminuir su longitud, y la exploración de diversas opciones podría conducir a mejoras significativas.

## Capítulo 6. Referencias

- A. I. Carmona, “Aerodinámica y actuaciones del avión”, editorial “Paraninfo”, 2000
- A. M. Jiménez, “Estudio de la tasa de formación de condensado en el evaporador de un sistema de acondicionamiento de aire mediante dinámica de fluidos computacional” [Tesis de maestría, Universidad Autónoma De Nuevo León, subdirección de estudios de posgrado], 2017.
- A. P. Schaffarczyk, Introduction to Wind Turbine Aerodynamics. Berlin, 2014.
- A. R. Sengupta, A. Biswas, and R. Gupta, “Studies of some high solidity symmetrical and unsymmetrical blade H-Darrieus rotors with respect to starting characteristics, dynamic performances and flow physics in low wind streams”, *Renew. Energy*, vol. 93, pp. 536– 547, 2016.
- A. R. Sengupta, A. Biswas, and R. Gupta, “The aerodynamics of high solidity unsymmetrical and symmetrical blade H-Darrieus rotors in low wind speed conditions,” *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 1-11, 2017.
- A. Rezaeiha, H. Montazeri, and B. Blocken, “Towards optimal aerodynamic design of vertical axis wind turbines: Impact of solidity and number of blades,” *Energy*, vol. 165, pp. 1129–1148, 2018
- A. Rezaeiha, H. Montazeri, B. Blocken, “Active flow control for power enhancement of vertical axis wind turbines: Leading-edge slot suction”, *Energy*, vol. 189, 2019.
- A. Rezaeiha, H. Montazeri, B. Blocken, “On the accuracy of turbulence models for CFD simulations of vertical axis wind turbines”, *Energy*, vol. 180, pp. 838-857, 2019.
- A. Rezaeiha, I. Kalkman, H. Montazeri, B. Blocken, “Effect of the shaft on the aerodynamic performance of urban vertical axis wind turbines”, *Energy Conversion and Management*, vol. 149, pp. 616-630, 2017.
- A. Subramanian et al., “Effect of airfoil and solidity on performance of small scale vertical axis wind turbine using three dimensional CFD model,” *Energy*, vol. 133, pp. 179–190, 2017.
- A. Subramanian, S. A. Yogesh, H. Sivanandan, A. Giri, V. Madhavan, M. Vivek, V. Ratna, Effect of airfoil and solidity on performance of small scale vertical axis

wind turbine using three dimensional CFD model, *Energy*, vol. 133, pp. 179-190, 2017.

A. Z. Santiago, J. G. Lopez, A. G. Manzo, A. M. Lugo, "Mecánica de Fluidos: Teoría con aplicaciones y modelados", Grupo editorial Patria, 2017.

A.R. Sengupta, A. Biswas, R. Gupta, "Comparison of low wind speed aerodynamics of unsymmetrical blade H-Darrieus rotors-blade camber and curvature signatures for performance improvement", *Renewable Energy*, Vol. 139, pp. 1412-1427, 2019.

Anderson J. D., *Fundamentals of Aerodynamics*, Third Edition, Ed. Mc Graw Hill, 2001.

ANSYS, "Ansys Fluent User's Guide," *Ansys Fluent User's Guid.*, vol. 15317, no. November, p. 2498, 2013.

B. Chi-Jeng y W. Wei-Cheng "Review of computational and experimental approaches to analysis of aerodynamic performance in horizontal-axis wind turbines HAWTs", "Renewable and Sustainable", 2016.

B. Devolder, P. Troch, and P. Rauwoens, "Performance of a buoyancy-modified k- $\omega$  and k- $\omega$  SST turbulence model for simulating wave breaking under regular waves using OpenFOAM@," *Coastal Engineering*, vol. 138, pp. 49-65, 2018.

B. P. Krishnan, M. Mathanbabu y G. Sathyamoort, "Performance estimation and redesign of horizontal axis wind turbine (HAWT) Blade", *Materials Today: Proceedings*, 2021.

C. Li, Y. Xiao, Y. lin Xu, Y. xin Peng, G. Hu, and S. Zhu, "Optimization of blade pitch in H-rotor vertical axis wind turbines through computational fluid dynamics simulations," *Appl. Energy*, vol. 212, no. December 2017, pp. 1107–1125, 2018.

C. Mendoza, "Diseño de un rotor eólico tipo Darrieus helicoidal". "Revista de Ingeniería Mecánica", 2017.

Castelli. M.R. Evaluation of the different aerodynamic databases for vertical axis wind turbine simulations, 2014.

CFD-Online, «K-epsilon Models,» [En línea]. Available: [https://www.cfd-online.com/Wiki/K-epsilon\\_models](https://www.cfd-online.com/Wiki/K-epsilon_models).

D. B. Michael., L. A. M. Danao, "The aerodynamics of a camber-bladed vertical axis wind turbine in unsteady wind", *Energy*, vol. 93, pp. 1155-1164, 2015.

D. Navarro”, Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica basado en la utilización de las energías solar y eólica, e integrado en el medio natural”, Universidad Politécnica de Cartagena, 2016.

D. S. Vainstein, J. C. Velarde, A. R. González, B. S. Sosa, “Energías renovables. experiencia y perspectivas en la ruta del Perú hacia la transición energética”, Osinergmin, 2019.

E. Leelakrishnan, M. Sunil, D. Selvaraj c , N. Vignesh, T.S. Abhesheka Raja, “Numerical evaluation of optimum tip speed ratio for darrieus type vertical axis wind turbine”, Materials Today: Proceedings, Vol. 33, pp. 4719-4722, 2020.

E. Singh, Sukanta Roy, Ke. S. Yam, M. C. Law, Numerical analysis of H-Darrieus vertical axis wind turbines with varying aspect ratios for exhaust energy extractions, Energy, vol. 277, 2023.

F. Alqurashi, M. H. Mohamed, “Aerodynamic Forces Affecting the H-Rotor Darrieus Wind Turbine”, Hindawi, vol. 2020, 2020].

F. Fang, S. Zhao, C. Qu, Y. Bai, Y. Zhang & Y. Li, “Research on Aerodynamic Characteristics of Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine with S Series Airfoils”, “International Journal of Rotating Machinery”, 2018.

G. Dumas and T. Villeneuve, “Increasing the efficiency of vertical-axis turbines through improved blade support structures,” vol. 169, 2021.

H. Battista, “Control de la calidad de potencia en sistemas de conversión de energía eólica”, Universidad Nacional De La Plata, 2000.

H. M. Mazarbhuiya, A. Biswas, and K. K. Sharma, “Performance investigations of modified asymmetric blade H-Darrieus VAWT rotors,” J. Renew. Sustain. Energy, vol. 10, no. 3, 2018.

I. Hashem, H. S. Hameed, M. H. Mohamed, An axial turbine in an innovative oscillating water column (OWC) device for sea-wave energy conversion, Ocean engineering, pp. 536-562, 2018.

I. Hashem, M.H. Mohamed, “Aerodynamic Performance Enhancements of H-rotor Darrieus Wind Turbine”, “Energy”, pp. 531-545, 2017.

IRENA, “World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway”, “Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency”, 2021

J. Chen, L. Chen, H. Xu, H. Yang, C. Ye, D. Liu, "Performance improvement of a vertical axis wind turbine by comprehensive assessment of an airfoil family", vol. 114, pp. 318-331, 2016.

J. M. Edwards, L. Angelo Danao, and R. J. Howell, "PIV measurements and CFD simulation of the performance and flow physics and of a smallscale vertical axis wind turbine," *Wind Energy*, vol. 17, no. April 2013, pp. 657–669, 2013.

J. U. Diaz, "Análisis cfd de turbina de turbocompresor", Universidade Da Coruña, 2021.

J. Ubaid, K. El Kadi, A. El-Sinawi, S. Elagrowdy, I. Janjreh, "Numerical analysis of VAWT wind turbines: Joukowski vs classical NACA rotor's blades", vol. 158, pp. 1194-1201, 2019.

J. Xamán, M. Gijón, "Dinámica de fluidos computacional para ingenieros", Editorial "Palibrio", 2016.

L. A. Puerta, *Análisis de curvas de velocidad de viento y altura: propuesta de identificación de patrones*, UPC, 2018.

L. Silva, S. Inostroza, "Optimum power generation assessment in an H-Darrieus vertical axis wind turbine via Exergy Destruction Minimization", "Energy Conversion and Management", 2021.

M. H. Mohamed, A.M. Ali, A.A. Hafiz, "CFD analysis for H-rotor Darrieus turbine as a low speed wind energy converter", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 18, pp. 1-13, 2015.

M. Hansem, "Aerodynamics of wind turbines", Editorial Earthscan, 2015.

M. Maalouly, M. Souaiby, A. ElCheikh, J.S. Issa, M. Elkhoury, "Transient analysis of H- type Vertical Axis Wind Turbines using CFD", "Energy Reports", pp. 4570-4588, 2022.

M. Maalouly, M. Souaiby, A. ElCheikh, J.S. Issa, M. Elkhoury, "Transient analysis of H-type Vertical Axis Wind Turbines using CFD", vol. 8, pp. 4570-4588, 2022.

M. Raciti Castelli, A. Englaro, E. Benini, The Darrieus wind turbine: Proposal for a new performance prediction model based on CFD, *Energy*. 36 (2011) 4919–4934. doi:10.1016/j.energy.2011.05.036.

M. Karimirad, *Offshore Energy Structures: For Wind Power, Wave Energy and Hybrid*, Springer Marine Platforms, 2014.

M.H. Mohamed, "Performance investigation of H-rotor Darrieus turbine with new airfoil shapes", "Energy 47", pp. 522-530, 2012.

M.H. Mohamed, A. Dessoky, F. Alqurashi. "Blade Shape effect on the Behavior of the H- rotor Darrieus Wind Turbine: Performance Investigation and Force Analysis". "ELSEVIER: Renewable Energy", pp. 1217-1234, 2019.

Mathew S. Wind Energy: Fundamentals: Resource Analysis and Economics, Springer, 2006.

N. Ma et al., "Airfoil optimization to improve power performance of a high-solidity vertical axis wind turbine at a moderate tip speed ratio," Energy, vol. 150, pp. 236–252, 2018.

O. Eboibi, L. Angelo, M. Danao, R. Howell, "Experimental investigation of the influence of solidity on the performance and flow field aerodynamics of vertical axis wind turbines at low Reynolds numbers," Renew. Energy, vol. 92, pp. 474–483, 2016.

P. Deshpande and X. Li, "Numerical Study of Giromill-Type Wind Turbines with Symmetrical and Non-symmetrical Airfoils," Eur. Int. J. Sci. Technol., vol. 2, no. 8, pp. 195–208, 2013.

P. Ghiasi, G. Nafaji, B. Ghobadian, A. Jafari, R. Mamat, M. F. Ghazali, "CFD-Study of the H-Rotor Darrieus wind turbine performance in Drag-Lift and lift Regime: Impact of Type, thickness and chord length of blades", Alexandria Engineering Journal, vol. 67, pp. 51-64, 2023.

P. Ghiasi, G. Najafi, B. Ghobadian, and A. Jafari, "Analytical and Numerical Solution for H-type Darrieus Wind Turbine Performance at the Tip Speed Ratio of Below One," vol. 10, no. 2, pp. 269–281, 2021.

P. Schaffarczyk, Introduction to Wind Turbine Aerodynamics. Berlin, 2014.

Q. Li, T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, K. Furukawa, and M. Yamamoto, "Effect of number of blades on aerodynamic forces on a straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine," Energy, vol. 90, pp. 784–795, 2015.

R. Martínez O., J. García, G. Urquiza B., M. Basurto, L. L. Castro G. y O. Dávalos, "Shape effect of thickness of the NREL S815 profile on the performance of the H-rotor Darrieus turbine", Renewable Sustainable Energy, 2020.

R. Martínez, "Estudio numérico y experimental del efecto del espesor máximo y la longitud de cuerda del perfil NREL S815 en la potencia de una turbina Darrieus tipo h", UAEM, 2022.

S. B. Qamar and I. Janajreh, "A comprehensive analysis of solidity for cambered darrieus VAWTs," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 30, pp. 19420–19431, 2017.

S. M. H. Karimian and A. Abdolahifar, "Performance Investigation of a New Darrieus Vertical Axis Wind Turbine", *Energy*, p. 116551, 2019.

S. Mathew, *Wind energy: Fundamentals, resource analysis and economics*. Malapuram, 2006.

S. Takahashi, Y. Ohya, T. Karasudani, K. Watanabe, Numerical and experimental studies of airfoils suitable for Vertical Axis Wind Turbines and an application of wind-energy collecting structure for higher performance, *J. Wind Eng. (2006)* 327–330.

Singh M.A., Biswas A. y Misra R.D (2015). Investigation of self-starting and high rotor solidity on the performance of a three S1210 blade H-type Darrieus rotor, *ELSEVIER: Renewable Energy*.

Singh, Anil & Biswas, Agnimitra & Misra, "Investigation of self-starting and high rotor solidity on the performance of a three S1210 blade H-type Darrieus rotor", *Renewable Energy*. pp. 381-387, 2014.

W. Tjiu, T. Marnoto, S. Mat, Darrieus vertical axis wind turbine for power generation II: Challenges in HAWT and the opportunity of multi-megawatt Darrieus VAWT development", *Renewable Energy*, nº 75. pp. 560-571, 2014.

Wilcox, David C (1998). "Modelado de turbulencia para CFD". Segunda edición. Anaheim: DCW Industries, 1998. pág. 174.

Wordpress, "Aerogeneradores Fuentes de energía." [Online]. Available: <https://fuentesdeenergiact.wordpress.com/fuentes-de-energiarenovables/eolica/aeroge>.

Y. A. Cengel, *Mecánica de fluidos (Fundamentos y aplicaciones)*, Edit. Mc Graw Gill, 2004.

Y. C. Gavilán, P. A. Valdez, A. L. Leyva, "Computational Fluid Dynamics: Review and Analysis of Applications in Engineering", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 29, pp. 93-104, 2020.

Y. Kumar, J. Ringenberg, S. Depuru, y K. Devabhaktuni, W. Lee, E. Nikolaidis, B. Andersen, A. Afjeh, "Wind energy: Trends and enabling technologies", Vol. 56, pp. 209-224, 2016.

Y. Li , S. Yang, F. Feng, K. Tagawa, “A review on numerical simulation based on CFD technology of aerodynamic characteristics of straight-bladed vertical axis wind turbines”, Energy Reports, vol. 9, pp. 4360-4379, 2023.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS



Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas



Cuernavaca, Morelos, a 06 de mayo de 2024.

## INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y

Maestría en Sustentabilidad Energética.



**DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE**  
**DIRECTOR DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN**  
**EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**  
**P R E S E N T E**

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: "DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN GEOMÉTRICA DEL PERFIL DEL ÁLABE S1046 EN LA POTENCIA Y EFICIENCIA DE UNA TURBINA EÓLICA VERTICAL TIPO H", que presenta el alumno **ALEXIS IVÁN LUNA SÁNCHEZ**, para obtener el título de la **MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**:

Atentamente

*Por una humanidad culta*

NOMBRE
<b>DR. MIGUEL ÁNGEL BASURTO PENSADO</b>
<b>DRA. LAURA LILIA CASTRO GÓMEZ</b>
<b>DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO</b>
<b>DR. JOSÉ OMAR DÁVALOS RAMÍREZ</b>
<b>DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN</b>

**PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)**

**NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.**

JJE\*MLGE/nmc.



Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209, Edificio 65.  
Tel. (777) 329 70 00, Ext. 612 / mse\_cicap@uaem.mx

**UAEM**  
RECTORÍA  
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

JUAN CARLOS GARCIA CASTREJON | Fecha:2024-05-06 15:31:32 | FIRMANTE
AafN0K1LelHPmnnPeo9t6kPhTdBTPa3SgY+LjaVfMscRFIZm16QuCD5NvP8QgJZseBTIHkxZRO/IF6/j70vogglXsmS5bIFTol1VzSYryS96Ngwps8YNTGCH+OwU+Yftmi89+vi45
IWhXouZDRzk2h9D1X+QBecBQiv6LJovuKcC9QkiTTIB8C8alDnKpEzHXvKDXpyA7jCxlOJl0rA47mj4WYRQl+6JzCma/aEJwcoRcoJ+iUP/hmic3Y25AhoEi0pafxVHD0TG7ix0jzA
QEY/HD+WWOyYjclupsOMCotUZqDKK9ul66p9NsvocWtqL7ywXh2/5Lb1PJUZ81g==

JOSE OMAR DAVALOS RAMIREZ | Fecha:2024-05-06 15:37:32 | FIRMANTE
Zwsl0V2Mqwd4wUqnZjGull0p4sYrZ0IA8n7VMMh9iX7esvOOivFbcFYnPR9e8uDHLJ3MAsk+T0teqYDLmg0ae9+E4rszELoIEzleFU+AheZjnTR5nXXyppSefL6phCVNwAhvGaw
uuR9Wuzqic2I6OS4N2VB7r+10UYcHCa64LNUqcZ2Mra5RAIZJ6kfstpHCUcl0BIUled7P0uqTdjGV7asifDderv6VV8HWJ2AfH8Ttu3JqNnQ/EPPKgtmG8ZQBt0AVk/QraKjK2t
WJeayq500kfSYApRyzwnBo+bgGR7FaM6c5ifoJFDPFRVviPuR7UmAGyY2Hi5Re775wPQ==

JOSE ANTONIO MARBAN SALGADO | Fecha:2024-05-06 15:45:29 | FIRMANTE
M1Uvan1SdaDyBpuL+3srtrmi3gviCKbxA3ML31Zi1Ci4Ae8XOuzFEs35gmSEIweIbMX/99m7EMPG2Al/KiPXShJtIckhmm0QpQLriYJDLVEcvgKbbckurb2m5aXKNFIZz/uWLFsKW
ANLgE3iq4aKLu3i2DbI/KOom8GkXUuaGVDIHvgaiO82Vma9IzF4DhNKvoVmTJkq9r+dsghY2eC4N7wKl9tbHkEcabex8Y+3Kn/h6WVYUtb0v1rd7JumJfbricykRk8mKm4q4qDB
UvJQRx/HV8dHa/T9k+FJLz7PFGVpvrQKnoZ6zcmjW6nrW1oRvcq2xrN0LS5ccCahZhhw==

LAURA LILIA CASTRO GOMEZ | Fecha:2024-05-07 11:10:45 | FIRMANTE
0jnPPLYWveq72hp7/eReK3f2271i/i6absZCb4EMRhlgsNijGuytqMcu2cdLEG79ILMLImpH8965JwWuuMh6hfLbHz87PJUPIoDBp+H42THoH5lpczb/p8tCWiqtvXQINsvOzYYsN
0WvQkheSU+7YXvx2DcEDWfPhbWTLdqPsgHZMFKE7wJkGijU0US9vMD3WnLowqPURXVOg6L+JgqYekj6INKAr69qy5f5uDN2pXMIaeRnhvQdcGUORBY2wssrRwDUHJM
BU2HH+Wk6qEgW4GAEEq9DNDYuzvmh2HFSt977IirkC+pQP4ExRema0O+1NHAsMnYtayTQ==

MIGUEL ANGEL BASURTO PENSADO | Fecha:2024-05-07 11:45:05 | FIRMANTE
SV0EOePZPEPZMIVNoNzffw9ROK0ailNDV7AhrNINi0I5MNlefjF6jjeafhgD8YS42q8dhiSYxMADsph4QGVVxm0WC++J5JDbMtkp0Q/Vb15We/wMLmdngEhnmqQAE0eOP2y9
k/ubqKCJi9GoHirj7eZIAAalfPIGB8hSKDwWc61+A9HRx9+JRN6rs38LWG3jDiAzcLwviN524gc9aUYTLAEaEWZBUWZ4YrkQCI0eT+yX9MkbXwDjSTW750q8ZqhfGtm/uaG4W
QFzEZs03B9KW6OUZwmQ90SafGNTwriH7HITqZ7D+cO+OgPVjZSSte7GZd5uX5FCPyM3KcrZEJA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



kcLyzKgBR

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/NynDoBlIBF35TnJpgTDwQ9jvFgkVkun