

Optimización paramétrica de una turbina eólica de eje vertical de álabes rectos para el Cañón del Chicamocha

Juan Diego Rosero Ariza

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magíster en Ingeniería Mecánica

Director

Jorge Luis Chacón Velasco

Doctor en Ingeniería Mecánica

Codirector

Luis Fernando García

Doctor en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Maestría en Ingeniería Mecánica
Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A mi prometida Luisa Fernanda Olarte Diaz, mis padres Clara Fabiola Ariza Ballesteros y Miguel Mauricio Rosero Valenzuela por su apoyo incondicional en los retos que se presentaron al momento de realizar la presente investigación. Su apoyo fue fundamental para el correcto desarrollo y logro de esta nueva meta.

Agradecimientos

Al profesor Jorge Luis Chacón Velasco por el apoyo académico recibido durante el desarrollo de la investigación, a la Escuela de Ingeniería Mecánica y la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) por el apoyo económico brindado para la movilización y presentación de resultados preliminares de la investigación en el Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (CIBIM 2022) que se desarrolló en la ciudad de Madrid, España.

Tabla de contenido

	Pág.
introducción	19
1. Objetivos	21
1.1 Objetivo General.....	21
1.2 Objetivos Específicos.....	21
2. Marco Teórico.....	22
2.1 Turbina Darrieus Tipo Recto	22
2.2 Turbina Savonius	25
2.3 Turbina Helicoidal	27
2.4 Parámetros Geométricos	29
2.5 Dinámica De Fluidos Computacional (Cfd)	38
2.6 Proceso De Mallado O Dominio Computacional	42
2.7 Condiciones De Contorno.....	45
2.8 Modelos De Turbulencia.....	46
2.8.1 Modelo De Turbulencia $K\omega$ - Sst	47
2.8.2 Modelo Spalart-Allmaras.....	48
2.8.3 Modelo De Turbulencia K - \mathcal{E}	48
2.9 Solucionadores	49
3. Metodología	50
3.1 Desarrollo Del Algoritmo Desarrollado Para Generar Las Dimensiones De La Turbina	52
3.2 Geometría Del Perfil Aerodinámico	54
3.3 Discretización Espacial Y Condiciones De Contorno	54

3.3.1 Zona Rotacional (“Rotate”)	55
3.3.2 Zona Fija O Ambiente.....	55
3.3.3 “Inlet” O Entrada.....	56
3.3.4 “Outlet” O Salida	56
3.3.5 “Up & Down”	56
3.3.6 “Aifoil”	56
3.3.7 “Interface Out” E “Interface In”	57
3.4 Modelo De Referencia Experimental.....	58
3.5 Propiedades Del Fluido.....	60
3.6 Control Y Modelos De Solución.....	60
3.7 Modelo De Turbulencia	61
3.8 Residuos, Criterio De Convergencia, <i>Time Steps</i> Y Factores De Relajación.....	62
4. Resultados	63
4.1 Algoritmo De Optimización.....	63
4.2 Independencia De Malla	65
4.3 Contornos De Velocidad.....	73
4.4 Contornos De Presión	74
4.5 Análisis De La Primera Propuesta De Optimización $Ad=0.25$ Y $C=0.117m$	75
4.6 Análisis De La Segunda Propuesta De Optimización $Ad=0.25$ Y $C=0.173m$	80
4.7 Análisis De La Tercera Propuesta De Optimización $Ad=0.4$ Y $C=0.0929m$	86
4.8 Análisis De La Cuarta Propuesta De Optimización $Ad=0.4$ Y $C=0.137m$	91
4.9 Análisis De La Quinta Propuesta De Optimización $Ad=1$ Y $C=0.0587m$	97
4.10 Análisis De La Sexta Propuesta De Optimización $Ad=1$ Y $C=0.0864m$	102

5. Análisis De Resultados	107
5.1 Contornos De Velocidad De La Opción 2 ($A_d=0.25$; $C=0.173$)	114
5.2 Contornos De Presión De La Opción 2 ($A_d=0.25$; $C=0.173$).....	120
5.3 Análisis De Y^+ De La Opción 2 ($A_d=0.25$; $C=0.173$).....	122
6. Conclusiones.....	123
7. Recomendaciones.....	124
Referencias Bibliográficas	125
Apéndices.....	133

Lista de tablas

	Pág
Tabla 1. Velocidad de arranque automático	34
Tabla 2. Características de los diseños VAWT propuestos	35
Tabla 3. Cp a varias velocidades de viento para diferentes modelos de turbinas.	35
Tabla 4. Situaciones simplificadas de las ecuaciones de gobierno	41
Tabla 5. Características de los parámetros de calidad	44
Tabla 6. Potencial eólico en el Cañón del Chicamocha.....	52
Tabla 7. Restricciones establecidas para desarrollo del algoritmo.	53
Tabla 8. Modelo geométrico por utilizar.	59
Tabla 9. Dimensiones del modelo geométrico a utilizar en función del radio de la turbina.	59
Tabla 10. Propiedades del fluido.	60
Tabla 11. Controles de solución.....	61
Tabla 12. Modelos de solución.	61
Tabla 13. Factores de relajación utilizados.....	62
Tabla 14. Validación del algoritmo.	63
Tabla 15. Resultados obtenidos por el algoritmo.....	64
Tabla 16. Parámetros principales de las mallas a analizar en el estudio de independencia de malla.	65
Tabla 17. Parámetros de calidad de la malla 1.....	65
Tabla 18. Parámetros de calidad de la malla 2 y 3.....	66
Tabla 19. % de Error entre los datos experimentales y el modelo 1 planteado.	67
Tabla 20. % de Error entre los datos experimentales y el modelo 2 planteado.	68

Tabla 21. % de Error entre los datos experimentales y el modelo 3 planteado.	70
Tabla 22. Parámetros de calidad de la malla opción 1 (AD=0.25 y c=0.117m).....	76
Tabla 23. Cp para cada velocidad de viento y ángulo de ataque analizado (AD=0.25 y c=0.117m).....	77
Tabla 24. Parámetros de calidad de la malla opción 2 (AD=0.25 y c=0.173m).....	81
Tabla 25. Cp para cada velocidad de viento y ángulo de ataque analizado (AD=0.25 y c=0.173m).....	82
Tabla 26. Parámetros de calidad de la malla opción 3 (AD=0.4 y c=0.0929m).....	86
Tabla 27. Cp para cada velocidad de viento y ángulo de ataque analizado (AD=0.4 y c=0.0929m).....	88
Tabla 28. Parámetros de calidad de la malla opción 4 (AD=0.4 y c=0.137m).....	91
Tabla 29. Cp para cada velocidad de viento y ángulo de ataque analizado (AD=0.4 y c=0.137m).	93
Tabla 30. Parámetros de calidad de la malla opción 5 (AD=1 y c=0.0587m).....	97
Tabla 31. Cp para cada velocidad de viento y ángulo de ataque analizado (AD=1 y c=0.0587m).	99
Tabla 32. Parámetros de calidad de la malla opción 6 (AD=1 y c=0.0864m).....	102
Tabla 33. Cp para cada velocidad de viento y ángulo de ataque analizado (AD=1 y c=0.0864m).	104
Tabla 34. Cp promedio de cada opción a V=4.5 m/s y $\alpha=0^\circ$	107
Tabla 35. Cp promedio de cada opción a V=4.5 m/s y $\alpha=10^\circ$	109
Tabla 36. Cp promedio de cada opción a V=7 m/s y $\alpha=0^\circ$	111
Tabla 37. Cp promedio de cada opción a V=7 m/s y $\alpha=10^\circ$	112

Lista de figuras

	Pág
Figura 1. Turbina eólica Darrieus	23
Figura 2. Cp en varias configuraciones de turbinas	24
Figura 3. Forma final del perfil DU-06-W-200 comparado con el perfil NACA 0018.....	30
Figura 4. Vista esquemática de la arquitectura de las turbinas Darrieus	30
Figura 5. Turbinas VAWT de álabes rectos, retorcidos a 70° y helicoidales a 120° de dos y tres álabes	34
Figura 6. Distribución de fuerzas y velocidades en el perfil del rotor Darrieus	37
Figura 7. Variación del ángulo de ataque frente al ángulo azimutal para dos relaciones de velocidad de punta de 0,5 y 1,5 a $\theta_p=0^\circ$	38
Figura 8. Discretización unidimensional por volúmenes finitos	40
Figura 9. Tipos de malla, malla no estructurada y malla estructurada	43
Figura 10. Zona estacionaria y rotacional.....	45
Figura 11. Diagrama de la metodología utilizada en el presente trabajo.....	51
Figura 12. Diagrama de flujo del algoritmo.....	53
Figura 13. Modelo geométrico planteado. del estudio de independencia de malla.	54
Figura 14. Discretización espacial del estudio de independencia de malla.	57
Figura 15. Cp vs λ opción 1.....	67
Figura 16. Cp vs λ opción 2.....	69
Figura 17. Cp vs λ opción 3.....	70
Figura 18. Cp vs λ de los modelos planteados.....	71
Figura 19. Coeficientes de sustentación (lift) y arrastre (drag) del modelo 2 planteado.	72

Figura 20. Contorno de velocidad del estudio de independencia de malla.....	73
Figura 21. Contorno de presión del estudio de independencia de malla.	75
Figura 22. Mallado en la zona rotacional (AD=0.25 y c=0.117m).....	76
Figura 23. Mallado detallado del ataque del álabe (AD=0.25 y c=0.117m).....	77
Figura 24. Cp vs λ a 4.5 m/s (AD=0.25 y c=0.117m).....	78
Figura 25. Cp vs λ a 7 m/s (AD=0.25 y c=0.117m).....	79
Figura 26. Comparativo del Cp vs λ entre el modelo de referencia y la optimización (AD=0.25 y c=0.117m).....	80
Figura 27. Mallado detallado del ataque del álabe (AD=0.25 y c=0.173m).....	81
Figura 28. Mallado detallado de la salida del álabe (AD=0.25 y c=0.173m).....	82
Figura 29. Cp vs λ a 4.5 m/s (AD=0.25 y c=0.173m).....	83
Figura 30. Cp vs λ a 7 m/s (AD=0.25 y c=0.173m).....	84
Figura 31. Comparativo del Cp vs λ entre el modelo de referencia y la optimización (AD=0.25 y c=0.173m).....	85
Figura 32. Mallado detallado zona fija y rotacional (AD=0.4 y c=0.0929m)	86
Figura 33. Mallado detallado del álabe (AD=0.4 y c=0.0929m).....	87
Figura 34. Cp vs λ a 4.5 m/s (AD=0.4 y c=0.0929m).....	88
Figura 35. Cp vs λ a 7 m/s (AD=0.4 y c=0.0929m).....	89
Figura 36. Comparativo del Cp vs λ entre el modelo de referencia y la optimización (AD=0.4 y c=0.0929m).....	90
Figura 37. Mallado detallado zona fija y rotacional (AD=0.4 y c=0.137m)	91
Figura 38. Mallado detallado del álabe (AD=0.4 y c=0.137m).....	92
Figura 39. Cp vs λ a 4.5 m/s (AD=0.4 y c=0.137m).....	93

Figura 40. C_p vs λ a 7 m/s (AD=0.4 y $c=0.137$ m).....	95
Figura 41. Comparativo del C_p vs λ entre el modelo de referencia y la optimización (AD=0.4 y $c=0.137$ m).....	96
Figura 42. Mallado detallado zona fija y rotacional (AD=1 y $c=0.0587$ m)	97
Figura 43. Mallado detallado del álabes (AD=1 y $c=0.0587$ m).....	98
Figura 44. C_p vs λ a 4.5 m/s (AD=1 y $c=0.0587$ m).....	99
Figura 45. C_p vs λ a 7 m/s (AD=1 y $c=0.0587$ m).....	101
Figura 46. Comparativo del C_p vs λ entre el modelo de referencia y la optimización (AD=1 y $c=0.0587$ m).....	101
Figura 47. Mallado detallado zona fija y rotacional (AD=1 y $c=0.0864$ m)	103
Figura 48. Mallado detallado del álabes (AD=1 y $c=0.0864$ m).....	103
Figura 49. C_p vs λ a 4.5 m/s (AD=1 y $c=0.0864$ m).....	105
Figura 50. C_p vs λ a 7 m/s (AD=1 y $c=0.0864$ m).....	105
Figura 51. Comparativo del C_p vs λ entre el modelo de referencia y la optimización (AD=1 y $c=0.0864$ m).....	106
Figura 52. Comparativo de las opciones a $V=4.5$ m/s y $\alpha=0^\circ$	108
Figura 53. Comparativo de las opciones a $V=4.5$ m/s y $\alpha=10^\circ$	109
Figura 54. Comparativo de las opciones a $V=7$ m/s y $\alpha=0^\circ$	110
Figura 55. Comparativo de las opciones a $V=7$ m/s y $\alpha=10^\circ$	113
Figura 56. Contorno de velocidad de la optimización elegida $V=4.5$ m/s; $\alpha=0^\circ$	114
Figura 57. Contorno de velocidad en el álabes $V=4.5$ m/s; $\alpha=0^\circ$	115
Figura 58. Contorno de velocidad de la optimización elegida $V=4.5$ m/s; $\alpha=10^\circ$	116
Figura 59. Contorno de velocidad en el álabes $V=4.5$ m/s; $\alpha=10^\circ$	116

Figura 60. Contorno de velocidad de la optimización elegida $V=7$ m/s; $\alpha=0^\circ$	117
Figura 61. Contorno de velocidad en el álabe $V=7$ m/s; $\alpha=0^\circ$	117
Figura 62. Contorno de velocidad de la optimización elegida $V=7$ m/s; $\alpha=10^\circ$	118
Figura 63. Contorno de velocidad en el álabe $V=7$ m/s; $\alpha=10^\circ$	119
Figura 64. Contorno de presión de la optimización elegida $V=4.5$ m/s; $\alpha=0^\circ$	120
Figura 65. Contorno de presión de la optimización elegida $V=4.5$ m/s; $\alpha=10^\circ$	121
Figura 66. Contorno de presión de la optimización elegida $V=7$ m/s; $\alpha=0^\circ$	121
Figura 67. Contorno de presión de la optimización elegida $V=7$ m/s; $\alpha=10^\circ$	122
Figura 69. Línea de ruta de la optimización elegida $V=4.5$ m/s.....	123
Figura 68. Línea de ruta de la optimización elegida $V=7$ m/s.....	123

Lista de Apéndices

Pág

APÉNDICE A. COORDENADAS DE CADA PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN 133

Lista de símbolos

- VAWT= Turbina eólica de eje vertical.
- HAWT= Turbina eólica de eje horizontal.
- C_l = Coeficiente de sustentación.
- C_d = Coeficiente de arrastre.
- σ = Solidez de la turbina.
- C_p = Coeficiente de Potencia.
- Φ = Relación altura-diámetro.
- ξ = Relación cuerda-diámetro.
- λ ó TSR= Tip speed ratio.
- A = Área barrida del rotor.
- H = Altura del rotor.
- D = Diámetro del rotor.
- R = Radio del rotor.
- c = Longitud de la cuerda.
- P_t = Energía total.
- P_d = Potencia deseada.
- ρ = Densidad del aire.
- V = Velocidad a corriente libre.
- θ = Ángulo de giro en el ciclo.
- α = Ángulo de ataque.
- T = Torque.
- ω = Velocidad angular.
- C_t = Coeficiente de fuerza radial.
- W = Velocidad local en el perfil aerodinámico.
- Re_c = Número de Reynolds basado en la cuerda.
- N = Número de álabes.
- u_i = Vector de velocidad.
- x_i = Vector de posición.
- t = Tiempo.
- t_{ji} = Tensor de tensión viscoso.
- P = Presión.
- μ = Viscosidad molecular.
- s_{ij} = Tensor de velocidad de deformación.
- Ma = Número de Mach.
- IT = Intensidad Turbulenta.
- LS = "Length Scale".
- β = Constante de modelización de la turbulencia.

σ_k y σ_ω = Números de Schmidt
turbulentos.

- γ = Coeficiente de modelo mezclado.
- ν_t = Difusividad turbulenta.
- F_1 = Coeficiente de función.
- c_{b1} , $c_{\omega1}$, k , c_{b2} = Constantes en el modelo Spallart-Allmaras.
- ν = Viscosidad turbulenta.
- d = Distancia mínima a la pared más cercana.

- f_{t2} = Factor de corrección del modelo Spallart-Allmaras.
- k = Energía cinética de la turbulencia.
- ε = Tasa de disipación de la energía.

Glosario

Coefficiente de potencia: representa la energía producida por la turbina como parte de la energía eólica total que pasa por el área barrida de la turbina.

Solidez: se define como el área de superficie desarrollada de todas las palas dividida por el área barrida.

Dinámica de fluidos computacional: consiste en el empleo de computadores y técnicas numéricas para resolver todos aquellos problemas físicos que están relacionados con el movimiento de los fluidos.

Resumen

Título: Optimización paramétrica de una turbina eólica de eje vertical de álabes rectos para el Cañón del Chicamocha *

Autor: Juan Diego Rosero Ariza **

Palabras Clave: Optimización, CFD, VAWT, baja velocidad

Descripción:

La microgeneración de energía a través de turbinas eólicas de eje vertical para bajas velocidades de viento en el departamento de Santander, Colombia, específicamente en el cañón del Chicamocha es viable. Sin embargo, existen diversos factores para el desarrollo de una turbina en la región, como lo son, la tipología de la turbina, solidez, relaciones de aspecto, perfil aerodinámico, longitud de cuerda, entre otros.

En primer lugar, se desarrolla un algoritmo en el software MATLAB R2021a, en el cual se ingresan las variables físicas de la región tales como densidad, velocidad de viento y las variables de la turbina como el número de álabes, potencia deseada y ángulo de ataque deseado. El algoritmo tiene una serie de restricciones donde se tiene en cuenta la solidez de la turbina, la longitud de la cuerda y la relación de aspecto altura/diámetro.

Una vez finalizado el algoritmo se procede a probar la optimización mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD), con el fin de predecir el desempeño que tendrá la turbina en operación. Para esto, es necesario conocer las condiciones de contorno adecuadas para llevar a cabo la simulación, la discretización de la malla y modelos de turbulencia a utilizar.

Con base en lo mencionado anteriormente, se realiza un análisis en ANSYS FLUENT de las optimizaciones generadas por el algoritmo con el cual se obtuvo el coeficiente de sustentación (C_l) y el coeficiente de arrastre (C_d), con los cuales fue posible calcular el coeficiente de potencia de cada turbina, con el cual se eligió la opción que tenga mejor rendimiento en la región de interés.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Maestría en Ingeniería Mecánica. Director: Jorge Luis Chacón Velasco. Doctor en ingeniería mecánica. Codirector: Luis Fernando García. Doctor en ingeniería mecánica.

Abstract

Title: Parametric optimization of a vertical axis straight blade wind turbine for the Chicamocha Canyon*

Author(s): Juan Diego Rosero Ariza**

Key Words: Optimization, CFD, VAWT, low speed.

Description:

The micro generation of energy through vertical axis wind turbines for low wind speeds in the department of Santander, Colombia, specifically in the Chicamocha canyon is viable. However, there are crucial factors for the development of a turbine in the region, such as the type of turbine, solidity, aspect ratios, aerodynamic profile, etc.

First, an algorithm is developed in the MATLAB R2021a software, in which the physical variables of the region such as density, wind speed and turbine variables such as the number of blades, desired power and angle of attack are entered. The algorithm has a series of restrictions where the solidity of the turbine, the chord length and the height/diameter aspect ratio are considered.

Once the algorithm is finished, the optimization is tested using computational fluid dynamics (CFD), to predict the performance that the turbine will have in operation. For this, it is necessary to know the appropriate boundary conditions to carry out the simulation, the discretization of the mesh and the turbulence models to be used.

Based on the, an analysis is carried out in ANSYS FLUENT of the optimizations generated by the algorithm with which the lift coefficient (C_l) and the drag coefficient (C_d) were obtained, with which it was possible to calculate the coefficient of power of each turbine, with which the option that has the best performance in the region of interest was chosen.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Mechanical Engineering. Master in Mechanical Engineering. Director: Jorge Luis Chacón Velasco. Doctor in mechanical engineering. Co-director: Luis Fernando García. Doctor in mechanical engineering.

Introducción

Según la Organización de las Naciones Unidas (2015), garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna es uno de los 7 Objetivos del desarrollo sostenible. El avance que se ha obtenido en este objetivo ha sido positivo ya que la energía se vuelve disponible para zonas rurales y urbanas. Este progreso ha permitido que el acceso a la electricidad en los países más pobres se acelerara.

Dentro de estas energías renovables se encuentra la energía eólica, una fuente de energía no contaminante, de bajo costo y renovable que aprovecha la energía cinética del viento, convirtiéndola en energía mecánica de rotación a través del movimiento de los álabes de un aerogenerador que posteriormente se convierte en energía eléctrica. Es por esto por lo que la generación de electricidad a partir del viento se considera económica y respetuosa con el medio ambiente (Hepbasli & Alsuhaibani, 2011).

De acuerdo con Pope et al. (2010), la turbina eólica de eje vertical (VAWT) ha demostrado una capacidad para cumplir con ciertos requisitos de generación de energía que la turbina eólica de eje horizontal (HAWT) no pueden cumplir, como por ejemplo, trabajar en altas turbulencias, fluctuaciones de viento y alta variabilidad direccional.

En investigaciones anteriores, García et al (2019) comprobaron la factibilidad de generación de energía eólica en el cañón del Chicamocha determinando la potencia eólica promedio anual, la cual es de 485 [W/m²]. Además, sugiere construir los álabes de la turbina eólica usando el perfil aerodinámico DU06W200 al ser 14% más eficiente que el comercialmente usado NACA0018. (García Rodríguez et al., 2019).

El valor óptimo de la solidez de la turbina (σ) según Paraschivoiu, (2002) está entre 0.3 y 0.4 ya que en estos valores se encuentra el pico del coeficiente de potencia (C_p), el cual permite conocer el rendimiento de la turbina.

Meana-Fernández et al. (2018) propone un σ de 0.3 con un C_p de 0.5996. Sin embargo, las dimensiones de este último son considerablemente grandes para la instalación de turbinas VAWT en la región de interés. Por otra parte, Nawfal M. (2019) sugiere un diseño con una solidez (σ) de 1.2 obteniendo un C_p 2.3 veces menor que el diseño propuesto por el primer autor. A pesar de esto, el diseño planteado obtuvo buenos resultados a bajas velocidades (3 m/s) siendo esta la velocidad crítica al ser la más baja registrada de acuerdo con García Rodríguez et al. (2019) en la región de estudio.

Con base en lo mencionado anteriormente, se realizará una optimización paramétrica de una turbina VAWT tipo Darrieus considerando el perfil asimétrico DU06W200 por medio de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD), ya que es un enfoque asequible y práctico para simular el campo de flujo alrededor de un VAWT en comparación con los experimentos que incurren en costos más altos, especialmente en el proceso de optimización del diseño. (Wong et al., 2018).

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Optimizar paramétricamente una turbina eólica de eje vertical, considerando el perfil asimétrico DU06W200, solidez de la turbina (σ), relación de altura/diámetro (Φ), cuerda/diámetro (ξ) con validación en CFD para la generación de 1kW de energía en el Cañón del Chicamocha.

1.2 Objetivos específicos

Validar el modelo CFD del diseño preliminar de los álabes en 2D de una turbina VAWT con perfil aerodinámico DU06W200 con base en la literatura.

Caracterizar la aerodinámica una turbina VAWT en 2D considerando la influencia de la solidez de la turbina (σ) en el coeficiente de potencia (C_p) para bajas velocidades de viento.

Optimizar paramétricamente una turbina VAWT en 2D por medio de la relación de altura/diámetro (Φ), cuerda/diámetro (ξ) para la obtención de 1 kW de energía con un aumento del 30% en el C_p respecto al diseño preliminar.

2. Marco teórico

El marco teórico de la presente investigación se puede dividir en los siguientes temas:

- Tipos de turbinas eólicas
- Parámetros geométricos
- Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

A continuación, se describen de manera general las tecnologías de turbinas de eje vertical.

2.1. Turbina Darrieus tipo recto

Este tipo de turbinas suele utilizarse en diseños de pequeña escala, de paso fijo y para tejados, y están disponibles comercialmente para aplicaciones domésticas y de otro tipo. (García Rodríguez et al., 2021).

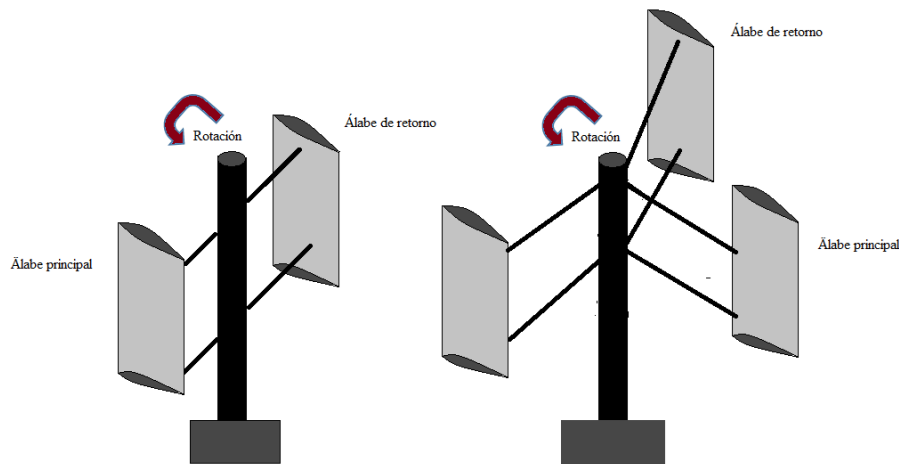
Algunas de las características más atractivas de este tipo de turbinas son la sencillez de fabricación, instalación y mantenimiento. Como puede verse en la figura 1, el diseño de rotor en H, se utilizan palas rectas que se conectan directamente al eje del rotor y generalmente tienen entre 2 y 3 álabes. Adicionalmente, este tipo de turbina tiene la capacidad de operar independientemente de la dirección del viento. (Hashem & Mohamed, 2018).

Una desventaja de este tipo de turbina es el autoarranque, que según (Meana-Fernández et al., 2018) depende de varios parámetros relacionados con el montaje de la turbina y las condiciones del flujo. Entre estos parámetros se encuentran la solidez, el número de Reynolds del flujo y el perfil aerodinámico utilizado para fabricar los álabes.

En la investigación de (Brusca et al., 2014), se analizó el diseño de una turbina de eje vertical (VAWT) con el fin de maximizar el coeficiente de potencia (C_p) de la misma, este tiene como objetivo determinar el rendimiento de la turbina eólica. Como resultado se obtuvo que para las turbinas Darrieus de álabes rectos, el C_p aumenta a medida que crece el número de Reynolds del álabes.

Figura 1.

Turbina eólica Darrieus



Nota: Adaptado de (Rosero Ariza et al., 2022)

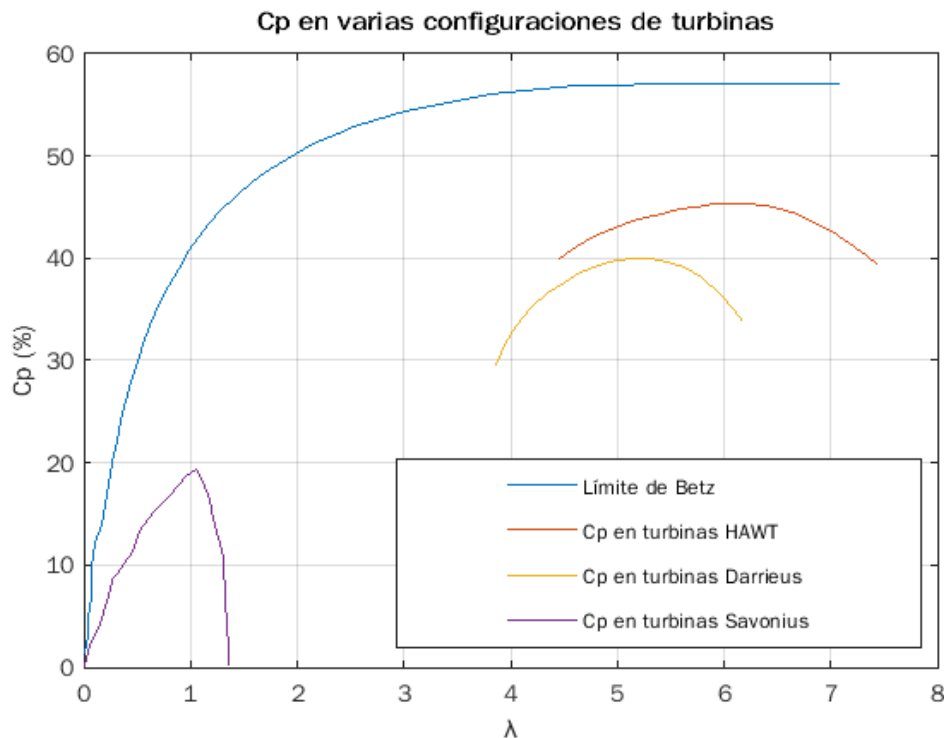
En su investigación Nawfal et al. Concluyeron que el máximo C_p posible para una turbina VAWT de álabes rectos utilizando el perfil DU06W200 a una velocidad de viento de 4.5 m/s es de 0.2606. Sin embargo, la velocidad en la punta del álabes (TSR o λ) como se observa en la figura 2 se encuentra entre 4 y 6.

Otro aspecto para tener en cuenta es la estela de las turbinas las cuales influyen directamente en el desempeño de las turbinas. Alexander & Santhanakrishnan (2020) observó

que el C_p puede aumentarse en un 10% al utilizar dos rotores en lugar de uno ya que el caudal volumétrico se logra incrementar en un 16%. No obstante, en la zona donde el rotor se encuentra en contracorriente el C_p disminuye al existir una correlación directa entre el caudal volumétrico y el C_p , por consiguiente, existirá una zona donde aumente el rendimiento de la turbina y otra donde este caiga.

Figura 2.

C_p en varias configuraciones de turbinas



Nota: Adaptado de (Rosero Ariza et al., 2022)

En el estudio experimental de (Battisti et al., 2018) se pudo observar que el flujo de viento aguas abajo del rotor a diferentes posiciones demuestran el comportamiento inestable de la estela en turbinas VAWT. Sin embargo, el funcionamiento de la turbina a altas velocidades de punta no se ve afectado por este fenómeno. Por el contrario, a bajas

velocidades de punta la turbina se ve afectada por la alta turbulencia e inestabilidad presentada.

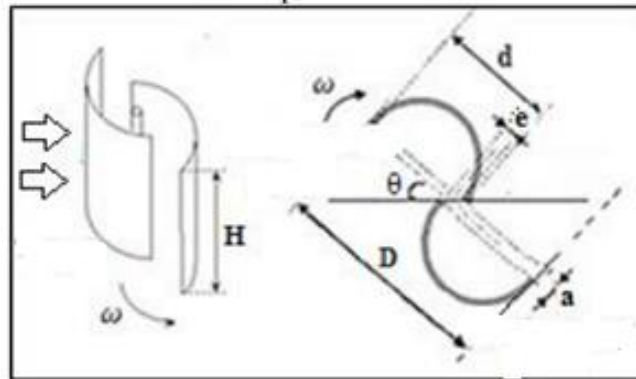
2.2. Turbina Savonius

El Savonius es un tipo de VAWT cuya característica es la forma de piezas semicilíndricas unidas a los lados opuestos de un eje vertical, el principio de funcionamiento es mediante la fuerza de arrastre, lo que significa que no puede girar más rápido que la velocidad del viento. (Zemamou et al., 2017)

De acuerdo con la investigación de (Maldar et al., 2020), el rendimiento de este tipo de turbinas Savonius convencionales ha sido analizado por medio de la dinámica de fluidos computacional (CFD), obteniendo como resultados que el C_p se encuentra entre 0.15 y 0.3 con un rango óptimo de 0.6 a 0.9. En la figura 3 se puede apreciar una turbina Savonius.

Figura 3.

Turbina Savonius.



Nota: Adaptado de (Garcia Rodriguez et al., 2021)

En Bogotá-Colombia, la investigación de (Ostos et al., 2019) consistió en la implementación de variaciones como el número de cuartos de álabe (uno, dos y tres cuartos de álabe) y el espaciado entre álabes ($D/20$ y $D/45$) al rotor convencional y perfilado para determinar qué combinación podría mostrar un mejor desempeño.

La mejor configuración se analizó con una velocidad en la punta del álabe (TSR ó λ) $TSR=0.7$ obteniendo un C_p de 0.25 con una velocidad de viento de 5 m/s con dirección constante en el eje X. El resultado obtenido concuerda con el mencionado por Maldar y el C_p ilustrado en la figura 1.

Antar & Elkhoury (2020) realizaron una optimización de la carcasa de un aerogenerador Savonius en CFD en dos dimensiones (2D). Se obtuvo un incremento máximo del 42.5% en el C_p con una relación de velocidad de punta de 0.59.

Las turbinas Savonius también pueden ser utilizados en corrientes marinas. De acuerdo con (Samadi et al., 2022), la colocación de obstáculos semicilíndricos o deflectores delante y detrás del rotor Savonius, permiten aumentar el C_p en un 150% cuando la velocidad del agua es igual o menor a 2 m/s, lo cual resulta beneficioso para los lugares donde se presente una baja velocidad. Sin embargo, a velocidades mayores a la mencionada no se logra ningún beneficio con estos obstáculos.

En la investigación de M. Shamsuddin & Kamaruddin (2023) se pudo observar que un rotor de doble etapa tiene mayor capacidad de autoarranque comparado con el de una sola etapa en cuanto a capacidad de autoarranque. La velocidad de autoarranque del rotor de doble etapa fue de 5 m/s mientras que el de una fue de 7 m/s. Esta característica es de vital

importancia debido a que permite a los aerogeneradores iniciar a generar energía con una velocidad de viento baja, siendo beneficioso para los lugares con esta característica física.

2.3. Turbina Helicoidal

El rotor helicoidal en H distribuye el perfil aerodinámico de las palas a lo largo del perímetro del rotor de manera uniforme con lo que el área barrida, así como las secciones de las palas son constantes al viento en todos los casos de rotación de la turbina. En la figura 4 se puede apreciar una turbina helicoidal.

Figura 4.

Turbina Helicoidal.



Nota: Adaptado de (Garcia Rodriguez et al., 2021)

Una característica de estas turbinas es que poseen un par regular, por lo tanto, la turbina posee una mejor regulación de la potencia de salida y por ende reduce el estrés cíclico en el tren motriz, disminuyendo el ruido producido. (Tjiu et al., 2015)

En la investigación realizada por (Wang et al., 2018), mediante simulación CFD en tres dimensiones (3D) se obtuvieron las características de flujo necesarias para calcular el C_p , obteniendo como resultado que al asumir una condición de flujo incompresible debido a la baja velocidad del viento (9.3 m/s) y asumiendo una baja intensidad turbulenta (0.5%), se logra obtener un C_p mayor comparado con una mayor intensidad turbulenta (generalmente 5%), este valor indica vórtices bien definidos generados a bajo TSR.

(Damak et al., 2013) en su investigación concluye que existe un efecto de los parámetros geométricos sobre el C_p en turbinas helicoidales Savonius y que estas últimas tienen mejor rendimiento que el tipo Savonius convencionales. El máximo coeficiente de potencia del rotor helicoidal Savonius es 0.2 a un TSR de 0.33 comparado con el 0.16 de la turbina convencional a la misma relación de velocidad. Otro aspecto para considerar es que el par en la turbina helicoidal es siempre positivo a diferencia de la convencional por tal motivo el rendimiento de la primera turbina aumenta.

En la investigación realizada por (Le et al., 2014), mediante simulaciones CFD 3D, la turbina de álabes helicoidales muestra ventajas sobre una turbina de álabes rectos del mismo tamaño, dentro de las cuales se encuentran una mejor capacidad de autoarranque y una reducción de la fluctuación del torque y RPM a una velocidad de 3 m/s. El análisis se realizó a un TSR inferior a 4 donde las turbinas de álabes rectos no poseen un rendimiento óptimo.

Respecto al autoarranque de las turbinas helicoidales, (Satrio & Utama, 2021) mediante una investigación experimental concluyó que las turbinas helicoidales presentan un arranque automático más suave que las de álabes rectos y tienen la capacidad de comenzar a operar a una velocidad más baja. La velocidad de autoarranque de las turbinas helicoidales fue

de 0.2 m/s mientras que las de álabes rectos fue de 0.3 m/s, se puede apreciar que la diferencia entre dichas velocidades es muy baja comparadas con el grado de dificultad de fabricación de las turbinas helicoidales tal como lo menciona (Garcia Rodriguez et al., 2021) en su trabajo.

Una característica de las turbinas helicoidales es la capacidad de operar con vientos altamente turbulentos, (Y. He et al., 2019) implementaron una optimización de parámetros estructurales en el álabe generando un diámetro variable con el cual logró que la turbina aumentara la velocidad de giro. El rango óptimo encontrado para la generación de energía fue entre 30-34 rpm.

A continuación, se hará una breve descripción de los parámetros geométricos relacionados con la optimización paramétrica de las turbinas VAWT.

2.4. Parámetros geométricos

El perfil aerodinámico asimétrico DU06W200 según (García Rodríguez et al., 2019), supera en un 23% el coeficiente de sustentación al perfil NACA0018 bajo las mismas condiciones de número de Reynolds. El perfil aerodinámico se puede observar en la figura 5.

En la optimización de turbinas VAWT, existe una la relación aerodinámica entre las características geométricas del rotor con el C_p de la turbina. La influencia de los principales parámetros de diseño aerodinámico se puede comparar directamente con el funcionamiento de las turbinas (Bianchini et al., 2015).

Los parámetros de diseño significativos para realizar la optimización paramétrica son:

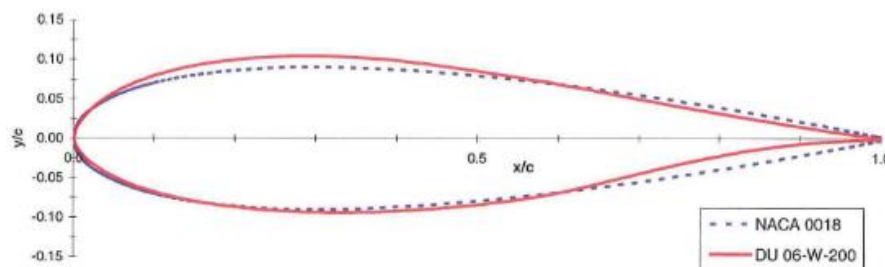
- La relación altura / diámetro ($\Phi = H / D$).
- La relación cuerda / diámetro ($\xi = c / D$).

- El área barrida del rotor (A).
- El tipo de perfil aerodinámico.

Donde H es la altura del rotor, D es el diámetro del rotor y c es la cuerda del perfil como se aprecia en la figura 6.

Figura 5.

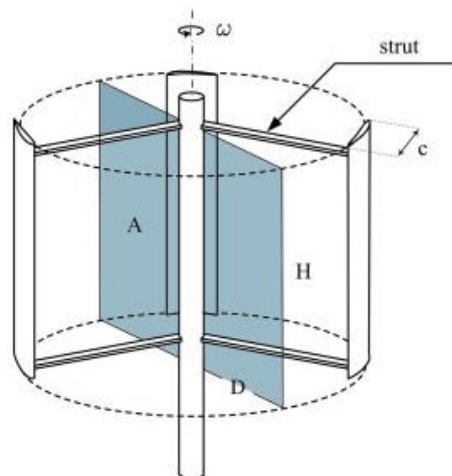
Forma final del perfil DU-06-W-200 comparado con el perfil NACA 0018



Nota. Adaptado de “The design and testing of airfoils for application in small vertical axis wind turbines” (p. 75), por (Claessens, 2006).

Figura 6.

Vista esquemática de la arquitectura de las turbinas Darrieus



Nota. Adaptado de “Design guidelines for H-Darrieus wind turbines: Optimization of the annual energy yield” (p. 682), por A. Bianchini, 2015, Energy Conversion and Management journal, 89.

El rendimiento de la turbina viene dado por el Coeficiente de potencia (C_p). Este coeficiente representa la energía producida por la turbina como parte de la energía eólica total que pasa por el área barrida de la turbina (Claessens, 2006), permitiendo determinar el desempeño que tendrá la turbina eólica en la región de estudio de la presente investigación y está representado por la ecuación 1 (Zouzou et al., 2019). Donde P_T es la energía total, ρ es la densidad del aire, V es la velocidad del viento y A es el área barrida de la turbina.

$$C_p = \frac{P_T}{P_{wind}} = \frac{P_T}{\frac{1}{2}\rho V^3 A} \quad (1)$$

$$P_T = \omega * T_{fa} \quad (2)$$

$$T_{fa} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T d\theta \quad (3)$$

Donde θ es el ángulo en el ciclo, α es el ángulo de ataque y el torque (T) está expresado en la ecuación 4, según (Islam et al., 2008), C_t es el coeficiente de fuerza radial expresado en la ecuación 5 y W es la velocidad local en el perfil aerodinámico y es expresada en la ecuación 6.

$$T = \frac{1}{2} C_t \rho A R W^2 \quad (4)$$

$$C_t = C_l \sin \alpha - C_d \cos \alpha \quad (5)$$

$$W = \sqrt{(R\omega + V \cos \theta)^2 + (V \sin \theta)^2} \quad (6)$$

La distribución de la longitud de la cuerda es una de las parametrizaciones de la geometría del álabe que más se encuentran en la literatura para la optimización de turbinas eólicas (Marinić-Kragić et al., 2018).

Sobre un perfil aerodinámico se genera diversas distribuciones de fuerzas en la superficie de este debido al flujo del aire. La velocidad del flujo sobre los perfiles aumenta en superficies convexas generando que en el lado de “succión” haya una presión media más baja comparada con el lado cóncavo o de “presión” del mismo perfil aerodinámico.

El flujo de aire sobre un perfil aerodinámico produce una distribución de fuerzas en la superficie del perfil aerodinámico. Mientras tanto, la fricción viscosa entre el aire y la superficie aerodinámica ralentiza el flujo de aire hasta cierto punto cerca de la superficie.

Según Brusca et al. (2014), el Número de Reynolds basado en la cuerda (Re_c), se puede expresar en la ecuación 7, donde c es la longitud de la cuerda, ω es la velocidad angular y v es la velocidad a corriente libre.

$$Re_c = \frac{c\omega}{v} \quad (7)$$

La solidez de la turbina (σ) se define como el área de superficie desarrollada de todas las palas dividida por el área barrida (Paraschivoiu, 2002). σ está dada por la ecuación 8, donde N representa el número de álabes, c es la longitud de la cuerda y R el radio del rotor. (Brusca et al., 2014)

$$\sigma = \frac{Nc}{R} \quad (8)$$

Donde c se puede expresar en función de la solidez de la turbina como se observa en la ecuación 9.

$$c = \frac{\sigma C_{p_{max}}}{Nb} R \quad (9)$$

Reemplazando la ecuación 9 en la ecuación 7, se observa en la ecuación 10 que el Re_c es directamente proporcional a σ y al C_p .

$$Re_c = \frac{\sigma C_{p_{max}} R w}{Nb v} \quad (10)$$

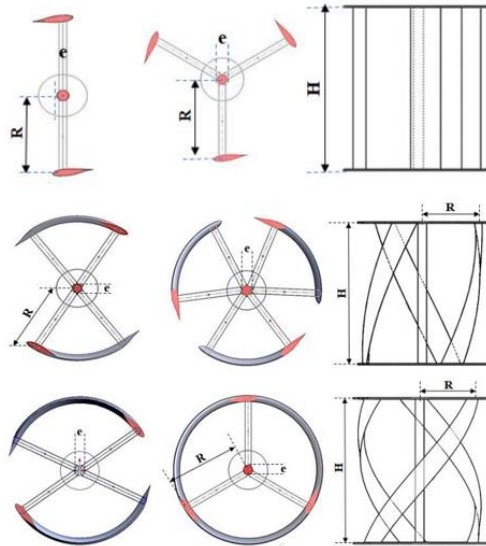
El Re_c puede llegar a ser muy bajo (especialmente en el caso de velocidades de viento bajas como es el caso de la presente investigación, puede ser inferior a 10^5), por tanto, es crítico para un correcto funcionamiento de la superficie aerodinámica. Con base en lo planteado anteriormente, se denota que los parámetros claves para la optimización de la turbina VAWT son el coeficiente de potencia y la solidez, la relación altura / diámetro y la relación cuerda / diámetro

En la figura 7, se pueden apreciar tres propuestas de álabes para una turbina eólica de eje vertical: rectos, girados a 70° y helicoidales a 120° de dos y tres álabes respectivamente. Según (Nawfal M. et al., 2019), las turbinas de álabes rectos poseen un mejor rendimiento que otras a bajas velocidades (entre 3 a 5 m/s).

Un factor crítico en la viabilidad de generación de energía con turbinas VAWT es el autoarranque de la turbina, de acuerdo con (Nawfal M. et al., 2019), a una velocidad del viento de 3 m/s, la VAWT con perfil aerodinámico DU06W200 tiene la capacidad de arranque automático como se observa en la tabla 1.

Figura 7.

Turbinas VAWT de álabes rectos, retorcidos a 70° y helicoidales a 120° de dos y tres álabes



Nota. Adaptado de “An Experimental and Numerical Investigation on Darrieus Vertical Axis Wind Turbine Types at Low Wind Speed” p. (99) por M. Nawfal, 2019. International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, 19.

Tabla 1.

Velocidad de arranque automático

Tipo DWT	Número de álabes	Velocidad de viento de autoarranque (m/s)
Rectos	2	3
	3	3
Twisted 70°	2	5.75
	3	5
Helicoidales 120°	2	6.5
	3	6

Nota. Adaptado de “An Experimental and Numerical Investigation on Darrieus Vertical Axis Wind Turbine Types at Low Wind Speed” p. (103) por M. Nawfal, 2019. International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, 19.

Meana-Fernández et al. (2018), propone un diseño optimizado para media y baja velocidad de viento el cual presenta un C_p máximo de 0.5798 y 0.5996 respectivamente, como se observa en la tabla 2. Este diseño lo realiza mediante una herramienta elaborada en Matlab, la cual permite el análisis en minutos de diferentes configuraciones para caracterizar el rendimiento aerodinámico de una VAWT. Sin embargo, con dicha herramienta no es posible modelar VAWT con un σ alto debido a que se produce una ruptura de la ecuación de momento.

Tabla 2.

Características de los diseños VAWT propuestos

Velocidad de Viento	Media	Baja
Número de álabes	3	3
Radio del rotor R	1 m	3 m
Altura del rotor H	3 m	5 m
Cuerda del álabes c	111 mm	333 mm
Solidez del rotor σ	1/3	1/3
Perfil	DU-06-W-200	DU-06-W-200
Velocidad nominal de viento	9 m/s	4.5 m/s
Potencia nominal	1.5 kW	1 kW
Máximo coeficiente de potencia	0.5798	0.5996

Nota. Adaptado de “Parametrical evaluation of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines for the proposal of optimized designs” p. (515) por A. Meana, 2018. Energy, 147.

Nawfal M. et al., (2019) concluye experimentalmente que el C_p máximo obtenido para una VAWT con características de viento similares es de 0.2606, considerando el perfil DU06W200, una velocidad de 4,5 m/s, tres alabes, como se observa en la tabla 3 y una solidez de 1.2

Tabla 3.

C_p a varias velocidades de viento para diferentes modelos de turbinas.

DWT tipo	Número de álabes	Velocidad de viento de autoarranque (m/s)
----------	------------------	---

		3	4	4.5	4.85	5.15	6.45	7.65
Rectos	2	0.2495	0.2506	0.2635	0.275	0.2895	0.3076	-
	3	0.2407	0.2494	0.2606	0.2678	0.2846	0.3065	-
Twisted 70°	2	0	0	0	0	0.0372	0.0757	0.1216
	3	0	0	0	0.0195	0.0597	0.1008	0.1323
Helicoidales 120°	2	0	0	0	0	0.0449	0.0690	0.0889
	3	0	0	0	0.0427	0.0789	0.1332	0.1465

Nota. Adaptado de “An Experimental and Numerical Investigation on Darrieus Vertical Axis Wind Turbine Types at Low Wind Speed” p. (104) por M. Nawfal, 2019. International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, 19.

De acuerdo con (Edwards, 2012), la solidez de la turbina tiene una gran influencia en el rendimiento del VAWT. Las máquinas de alta solidez alcanzan la eficiencia óptima a una relación de velocidad de punta (λ) baja y la eficiencia cae rápidamente a cualquier lado de este valor óptimo, por tal motivo, se debe tener en cuenta la influencia de la relación de velocidad de punta (TSR o λ), la cual está directamente relacionada con el ángulo de ataque, velocidad de viento y velocidad de rotación de la turbina.

Como se observa en la ecuación 11, λ es una relación entre la velocidad de la punta de la pala ($\omega.R$) y la velocidad de la corriente de viento libre. En la figura 8 se puede ver una relación entre el ángulo acimutal (θ), el ángulo de ataque (α) y la relación de velocidad (λ), esta relación es la siguiente en la ecuación 12.

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (11)$$

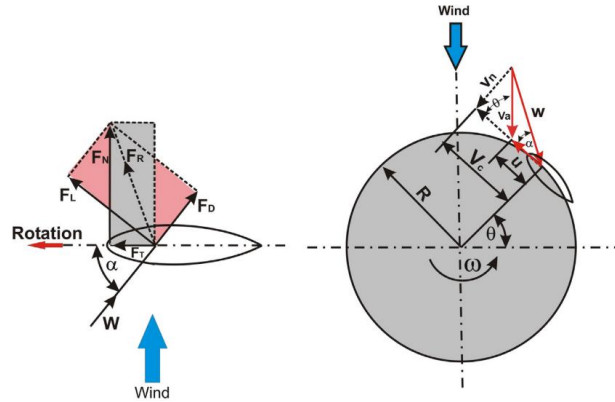
$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta} \right] \quad (12)$$

El C_p de un VAWT aumenta con el incremento de λ y alcanza un pico, tras el cual se produce un descenso a medida que se alcanzan mayores λ . Como se puede ver en la figura 9, el

ángulo de ataque (α) se evalúa a diferentes valores de λ . A mayor λ el valor de α es menor para un $\lambda=0.5$ y $\lambda=1.5$

Figura 8.

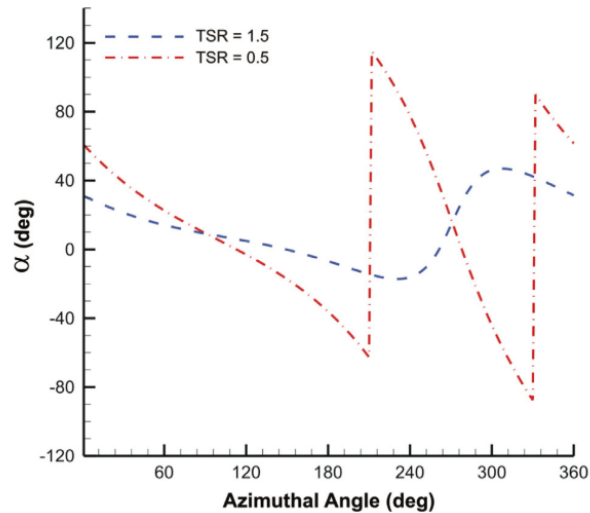
Distribución de fuerzas y velocidades en el perfil del rotor Darrieus



Nota. Adaptado de “Aerodynamic performance enhancements of H-rotor Darrieus wind turbine” p. (534) por I. Hashem, 2013. Energy, 142.

Figura 9.

Variación del ángulo de ataque frente al ángulo azimutal para dos relaciones de velocidad de punta de 0,5 y 1,5 a $\theta_p=0^\circ$



Nota. Adaptado de “Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch” p. (117) por M. Elkhoury, 2015. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 139.

A continuación, se dan los fundamentos de la dinámica de fluidos computacional.

2.5. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

El estudio en dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) consiste en el empleo de computadores y técnicas numéricas para resolver todos aquellos problemas físicos que están relacionados con el movimiento de los fluidos.

Teniendo en cuenta que el uso de la herramienta reduce sustancialmente los tiempos y costes en los nuevos diseños además de poseer un nivel de detalle alto, facilitando los estudios paramétricos, permitiendo obtener gran cantidad de información sin el costo adicional de

sensores siempre y cuando los modelos planteados se encuentren validados previamente. (Fernandez Oro, 2012).

La simulación CFD puede ser en dos dimensiones (2D) o en tres dimensiones (3D), la primera es más simple en comparación con la segunda, pero al mismo tiempo es menos precisa para flujos complejos y se limita al caso de un solo plano. Mientras que, la simulación 3D CFD proporciona una predicción precisa del campo de flujo, pero requiere un tiempo de cálculo prolongado y un gran almacenamiento de datos (Wong et al., 2018).

Una diferencia importante entre los modelos 2D y 3D es que de acuerdo con (Lanzafame et al., 2014), los primeros no consideran efectos como el vórtice de punta a diferencia de los modelos 3D, sin embargo, los modelos en 2D que utilizan el modelo de transición URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes) ha obtenido buenos resultados en la potencia mecánica y coeficiente de potencia con una sobreestimación del 6-8 % disminuyendo el costo computacional de las simulaciones 3D.

Con el análisis en CFD se pretende solucionar las ecuaciones de conservación de la masa y momento (Wilcox, 2006), descritas a continuación como la ecuación 13 y 14 respectivamente.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (13)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ji}}{\partial x_j} \quad (14)$$

Los vectores u_i y x_i son la velocidad y la posición, t es el tiempo, p es la presión, ρ es la densidad y t_{ji} es el tensor de tensión viscoso definido por la ecuación 15.

$$t_{ji} = 2\mu s_{ij} \quad (15)$$

Donde μ es la viscosidad molecular y s_{ij} es el tensor de velocidad de deformación expresado en la ecuación 16.

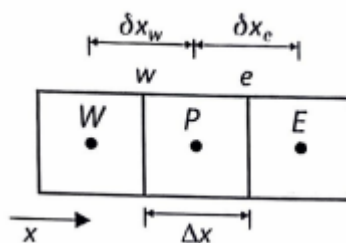
$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (16)$$

Los fenómenos físicos relacionados con los flujos y la transferencia de calor requieren las ecuaciones de Navier Stokes, existen distintos esquemas que se emplean para evaluar los flujos en las distintas caras de los volúmenes de control de una malla. (Fernandez Oro, 2012)

El método de volúmenes finitos (también conocido como método de volumen de control) divide el dominio en un número finito de celdas no superpuestas sobre las que se impone la conservación de la variable o de manera discreta como se observa en la figura 10.

Figura 10.

Discretización unidimensional por volúmenes finitos



Nota. Adaptado de “Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica computacional de fluidos (CFD) por medio del método de volúmenes finitos” p. (139), por J. Fernández, 2012, Reverte.

Donde la notación adoptada es P para el nodo actual y E, W para los nodos a la derecha (este) e izquierda (oeste) respectivamente. Se puede considerar que se presenta una variación

lineal entre cada centroide de la celda. En este método se garantiza la conservación de la variable sobre cada celda, es decir, que cada flujo entrante es igual al saliente sin importar cual sea el tamaño de la celda. Sin embargo, esta conservación no garantiza la precisión de la solución, esta depende de la discretización de la malla.

En la tabla 4 se resume las situaciones simplificadas más habituales en el ámbito de la mecánica de fluidos.

Tabla 4.

Situaciones simplificadas de las ecuaciones de gobierno

Viscosidad	Densidad	
	Incompresible ($\rho = \text{cte.}$)	Compresible ($Ma > 0,3$)
Flujo ideal, no viscoso ($\mu=0$)	Flujo ideal (potencial (si irrotacional))	Dinámica de gases ($k=0$)
Flujo en capa límite	Flujo laminar / turbulento (Función del Re)	Transferencia de calor
Flujo viscoso (separado)	Flujo laminar / turbulento (función del Re)	Transferencia de calor

Nota. Adaptado de “Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica computacional de fluidos (CFD) por medio del método de volúmenes finitos” p. (37), por J. Fernández, 2012, Reverte.

El número de Mach que se presenta sobre una turbina VAWT es muy bajo ($Ma < 0.3$), por lo tanto, los efectos de compresibilidad son casi nulos, por lo que se puede suponer que el aire tiene una densidad constante y es incompresible (Marinić-Kragić et al., 2018) (Hansen et al., 2021) (Zanforlin & Letizia, 2019) (Posa, 2020).

La capa límite es la zona del campo fluido próxima a un contorno sólido en la que se manifiestan especialmente los efectos viscosos. Debido a la viscosidad y a la condición de no deslizamiento, cerca de cualquier contorno sólido aparece un gradiente de velocidades en la dirección normal a dicho contorno.

Según (J. He et al., 2020), al analizar un fluido, las capas límite pueden dividirse en cuatro partes, ($y^+ \leq 5$), considerada como la subcapa viscosa; ($5 < y^+ \leq 30$) llamada región intermedia; ($30 < y^+ \leq 500$) conocida como la región de ley logarítmica y la capa exterior. De acuerdo con lo anterior, en el caso de las turbinas eólicas se debe prestar atención a la subcapa viscosa próxima a la superficie del álabe con el fin de resolver la subcapa laminar, para ello se debe refinar la malla hasta que y^+ sea inferior a 1 con una tasa de crecimiento de tamaño de malla de 1.2.

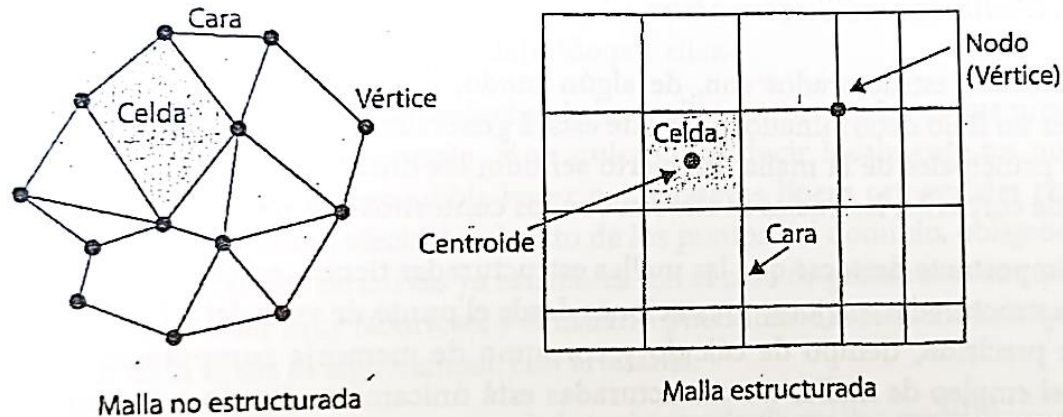
2.6. Proceso de mallado o dominio computacional

Existen dos tipos de mallas para el desarrollo de análisis en CFD, las cuales son: malla estructurada y no estructurada (Roda-Casanova & Sanchez-Marin, 2021). Estos tipos de malla se pueden apreciar en la figura 11.

La malla estructurada consta de celdas planas, las cuales poseen cuatro lados planos en el caso de simulaciones bidimensionales (2D), o seis caras volumétricas en el caso de simulaciones tridimensionales (3D). Por otra parte, una malla no estructurada consta de celdas de varias formas, las más utilizadas son los triángulos o los cuadriláteros en las simulaciones bidimensionales (2D) y tetraedros o hexaedros en el caso de las simulaciones tridimensionales (3D). (Yunus A. Çengel y John M. Cimbala, 2006)

Figura 11.

Tipos de malla, malla no estructurada y malla estructurada



Nota. Adaptado de “Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica computacional de fluidos (CFD) por medio del método de volúmenes finitos” p. (79), por J. Fernández, 2012, Reverte.

Para generar una malla óptima de elementos finitos Roda-Casanova & Sanchez-Marin, (2021), propone que para obtener resultados con un alto nivel de precisión, la malla de elementos finitos debe tener una alta densidad en aquellas regiones del modelo donde se vayan a analizar los gradientes de velocidad.

Una característica de las mallas estructuradas es que se generan menos celdas que las no estructuradas, por consiguiente, al momento de analizar las capas límite, donde se necesita una malla de alta resolución, las mallas estructuradas generan una resolución más fina y exacta que las no estructuradas en el mismo número de celdas. Mientras que en las regiones donde no se necesita una resolución alta, se considera como una buena práctica utilizar mallas no estructuradas para disminuir el costo computacional y por ende el tiempo de convergencia.

Dentro de los parámetros de calidad de la malla más importantes ya sea estructurada o no, se encuentran los siguientes: “*Aspect ratio*”, “*Skewness*” y “*Orthogonal quality*”. En la tabla 5, se puede apreciar las características de cada parámetro y como determinar si la malla generada es de buena calidad.

Tabla 5.

Características de los parámetros de calidad

Parámetro	Características	Valores óptimos
<i>Aspect ratio</i>	Representa la medida de estiramiento de la celda, para flujos anisotrópicos, una alta relación del “ <i>aspecto ratio</i> ”, pueden generar buenos resultados con menos celdas. Se recomienda evitar los cambios repentinos y grandes de en las proporciones de las celdas donde se presenta un gradiente fuerte.	Altos valores en este parámetro afectan la asimetría de la celda lo cual puede impedir precisión y convergencia
<i>Skewness</i>	Se define como la diferencia entre la forma de la celda y la forma de una celda equilátera de volumen equivalente. Las celdas que están muy sesgadas pueden llegar a generar que la solución diverja o que por el contrario de como resultado valores imprecisos.	Para las celdas de cuadriláteros se recomienda que los vértices estén cercanos a 90°, mientras que para las celdas triangulares cerca de 60° y todos los ángulos menores a 90°. Para mallas triangulares y/o tetraédricas debe mantenerse por debajo de 0.95, con un valor promedio significativamente más bajo
<i>Orthogonal quality</i>	Se refiere a la calidad de todo tipo de celdas, está se calcula para cada una de estas usando el vector desde el centroide de la celda hasta cada una de sus caras.	La ortogonalidad mínima para cualquier celda debe ser superior a 0.01, las celdas de mejor calidad tendrán una ortogonalidad cercada a 1.

Nota. Adaptado de “ANSYS Fluent User's Guide ANSYS” p. (132), por Ansys Inc. 2013.

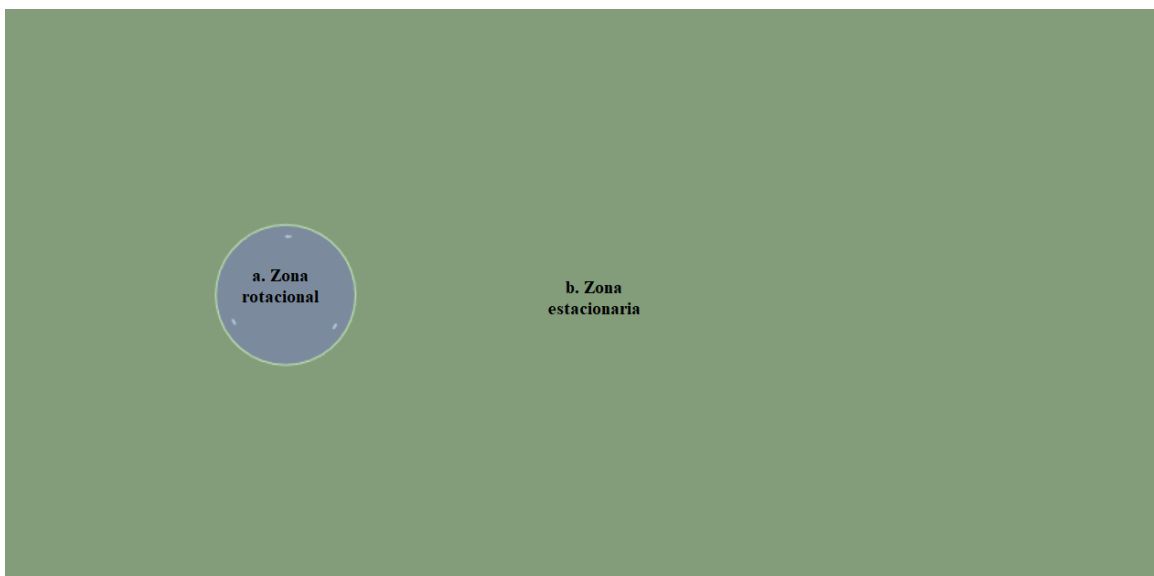
2.7. Condiciones de contorno

En la investigación realizada por (Balduzzi et al., 2016), el dominio computacional para turbinas VAWT en función del diámetro de la turbina en simulaciones 2D no estacionarias es de al menos 60D de ancho, 40D aguas arriba del rotor y 100D aguas abajo del rotor. También sugiere utilizar una región estacionaria (es decir una región donde no se generará ninguna rotación) y una rotacional (donde va a generarse una velocidad angular para simular la rotación de la turbina) para este tipo de simulaciones como se puede observar en la figura 12.

Por otra parte, (Alexander & Santhanakrishnan, 2020) presenta unas dimensiones similares a las presentadas por Balduzzi, estos autores concuerdan con las dimensiones de ancho y aguas arriba del rotor, sin embargo, difieren en la dimensión aguas abajo ya que Alexander sugiere que la medida sea de 143D debido a que al aumentar esta configuración se logra obtener un mejor resultado en el cálculo del C_p de las turbinas en simulaciones 2D no estacionarias.

Figura 12.

Zona estacionaria y rotacional



Nota. Elaboración propia

Mediante una simulación en 2D, (Bausas & Danao, 2015) sugiere dividir el mallado general en dos submallas distintas, una estacionaria ubicada en la zona rectangular, la cual determina el dominio de cálculo global. La segunda ubicada en el rotor, es una zona interior circular que debe girar a la misma velocidad angular del rotor.

Los valores de Intensidad Turbulenta (IT) y “*Lenght Scale*” (LS) por defecto de acuerdo con (Ansys Inc, 2013), son 5% y 1m respectivamente para flujos turbulentos a bajas velocidades de viento, sin embargo, dichas propiedades fueron calculadas mediante las ecuaciones 17 y 18 de la siguiente manera.

$$IT = 0.16 * Re_c^{-1/8} \quad (17)$$

$$LS = 0.007 * c \quad (18)$$

2.8. Modelos de turbulencia

Los modelos de turbulencia pueden utilizarse para obtener un análisis cuantitativo y cualitativo del rendimiento no estacionario de las turbinas. De igual manera, el análisis estacionario permite calcular los coeficientes de par estático de diferentes configuraciones. (Mohamed, 2013).

Según Franchina et al. (2019), los modelos de turbulencia tienen gran importancia en la calidad de la solución numérica, debido a los ángulos de ataque y a la pérdida de sustentación en el perfil aerodinámico. La mayoría de los investigadores se centran en las capacidades de los modelos RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) debido al costo computacional de los

enfoques LES (*Large-eddy simulation*) o DNS (*Direct Numerical Simulation*). Dentro de los modelos RANS más utilizados en las simulaciones de turbinas VAWT son el modelo $k\omega$ -SST, el modelo Spalart-Allmaras y el modelo $k\text{-}\epsilon$.

2.8.1. Modelo de turbulencia $k\omega$ -SST

Este modelo de turbulencia de dos ecuaciones es empírico basado en ecuaciones de transporte modelo para la energía cinética k de la turbulencia y la tasa de disipación específica ω .

El modelo opera bajo los modelos $k\text{-}\omega$ en la pared mientras que en la región lejana opera según el modelo $k\text{-}\epsilon$. La relación de estos modelos permite una buena transición y por ende una predicción estimativa de los remolinos característicos de las turbinas eólicas. El modelo se puede observar en las ecuaciones 19 y 20 (Eltayesh et al., 2021)(Meneses-Prado et al., 2018)

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta * k\rho\omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (19)$$

$$\rho \frac{D\omega}{Dt} = \frac{\gamma}{v_t} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta * \rho\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho(1 - F_1)\sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (20)$$

Donde β es una constante de modelización de la turbulencia, σ_k y σ_ω son números de Schmidt turbulentos, γ es un coeficiente de modelo mezclado, v_t es la difusividad turbulenta y F_1 es un coeficiente de función.

Este modelo ha sido diseñado para evitar la sensibilidad de flujo libre que se presenta en el modelo estándar. Adicionalmente posee la capacidad de calcular con precisión la separación de flujo de superficies lisas (se logra obtener una mayor precisión en las características de la capa límite) como es el caso de los álabes de las turbinas eólicas, reducción de la divergencia en los

análisis, predicción efectiva el flujo del gradiente de presión por tal motivo, es uno de los más utilizados en flujos aerodinámicos. (Li et al., 2023)(Wong et al., 2018)

2.8.2. *Modelo Spalart-Allmaras*

Este modelo de turbulencia de una ecuación según (Shukla & Kaviti, 2017) es diseñado especialmente para aplicaciones aeroespaciales en las que intervienen parámetros relacionados con cuerpos espaciales o aéreos, como el perfil aerodinámico. La variable considerada en este modelo es la viscosidad cinemática, que se asimila en las regiones que no se ven afectadas por fuertes efectos viscosos, como la región cercana a la pared. El modelo está descrito en la ecuación 21.

$$\frac{\partial \hat{v}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \hat{v}}{\partial x_j} = c_{b1}(1 - f_{t2})\hat{S}\hat{v} - \left[c_{\omega 1}f_{\omega} - \frac{c_{b1}}{k^2}f_{t2} \right] \left(\frac{\hat{v}}{d} \right)^2 + \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + \hat{v}) \frac{\partial \hat{v}}{\partial x_j} \right) + c_{b2} \frac{\partial \hat{v}}{\partial x_i} \frac{\partial \hat{v}}{\partial x_i} \right] \quad (21)$$

Donde c_{b1} , $c_{\omega 1}$, k , c_{b2} y σ son constantes en el modelo. La viscosidad cinemática es v , d es la distancia mínima a la pared más cercana y f_{t2} es un factor de corrección numérico del modelo.

2.8.3. *Modelo de turbulencia k- ϵ*

Este modelo de turbulencia al igual que el modelo de turbulencia $k\omega$ -SST ha demostrado ser muy útil para lograr predecir la estructura y las propiedades del flujo alrededor de las VAWT. (Roy & Saha, 2013)

El modelo de turbulencia k estándar contiene las formulaciones de transporte para la energía cinética de la turbulencia (k) y la tasa de disipación de energía (ϵ). Este modelo se expresa como sigue en las ecuaciones 22 y 23.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (22)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (23)$$

Una de las desventajas de este modelo es la insensibilidad a los gradientes de presión adversos y la separación de la capa límite. Por lo general, predicen una separación retrasada y reducida en relación con las observaciones. Por tal motivo al utilizar este modelo de turbulencia, las evaluaciones de diseño de una turbina eólica pueden resultar muy optimistas en el análisis de la capa límite.

2.9. Solucionadores

Existen diferentes solucionadores o “*solvers*”, los cuales utilizan métodos de solución numéricos dentro de los más reconocidos se encuentran el algoritmo “PISO” por sus siglas en inglés “*Presion-Implicit with Splitting of Operators*”, el cual es un procedimiento de cálculo basado en la presión y velocidad para dar solución a las ecuaciones de Navier Stokes, este solucionador no es iterativo y utiliza un paso de tiempo o “time step” de gran tamaño con el fin de reducir el tiempo computacional. Este solucionador es utilizado en el estudio de turbinas eólicas ya que el flujo en este tipo de aplicaciones como se mencionó en la sección 1.3 se puede asumir como incompresible y este “*solver*” es adecuado para este tipo de flujos (Toudarbari et al., 2021).

Otro algoritmo ampliamente utilizado es el “*SIMPLE*” por sus siglas en inglés “*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*” el cual es un método iterativo que calcula los gradientes de presión y velocidad. Es un algoritmo utilizado constantemente en el análisis de turbinas eólicas ya que los resultados obtenidos en los cálculos de coeficientes en los álabes son consistentes con los datos experimentales, al igual que se presentan ajustes más fáciles y buena estabilidad en la solución. (Li et al., 2023)(Balduzzi et al., 2016)

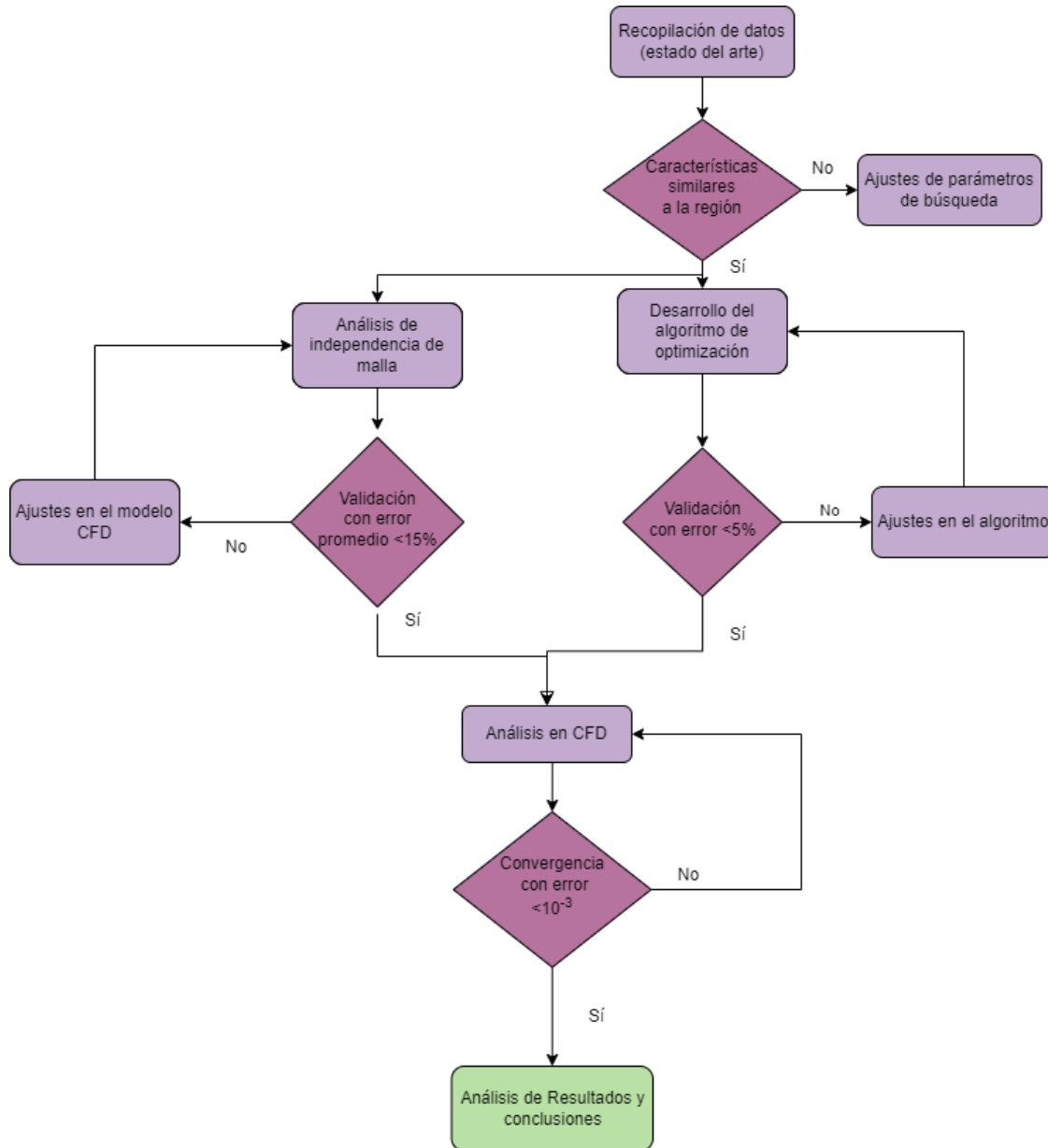
Finalmente, el algoritmo “*COUPLED*” resuelve las ecuaciones de gobierno acopladas entre sí simultáneamente. Es por tal motivo que este “*solver*” puede llegar a tardar más tiempo de convergencia por iteración, sin embargo, el número de iteraciones necesarias para que la solución converja puede ser significativamente menor. Este solucionador es ocupado principalmente cuando el flujo es compresible. En las simulaciones donde haya una convergencia difícil de lograr se ha recomendado utilizar este “*solver*”. (Mohotti et al., 2022)

3. Metodología

Para realizar la optimización paramétrica de una turbina eólica de eje vertical para las condiciones del Cañón del Chicamocha se utilizó la metodología descrita en la figura 13.

Figura 13.

Diagrama de la metodología utilizada en el presente trabajo.



Nota. Elaboración propia

Con esta metodología se desarrolló la optimización paramétrica de una turbina VAWT para bajas velocidades de viento con las condiciones de viento del cañón del Chicamocha descrito en la tabla 6, así como el planteamiento numérico descrito en la sección anterior.

Tabla 6.*Potencial eólico en el Cañón del Chicamocha*

Lugar	Velocidad promedio anual (m/s)	Potencia eólica promedio anual (W/m ²)
Mesa de los Santos	5.9	306.188
Río Chicamocha	6.9	485.115
PANACHI	4.3	86.643

Nota. Adaptado de “Chicamocha canyon wind energy potential and VAWT airfoil selection through CFD modeling” p. (62) por Garcia. L, 2019. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 94.

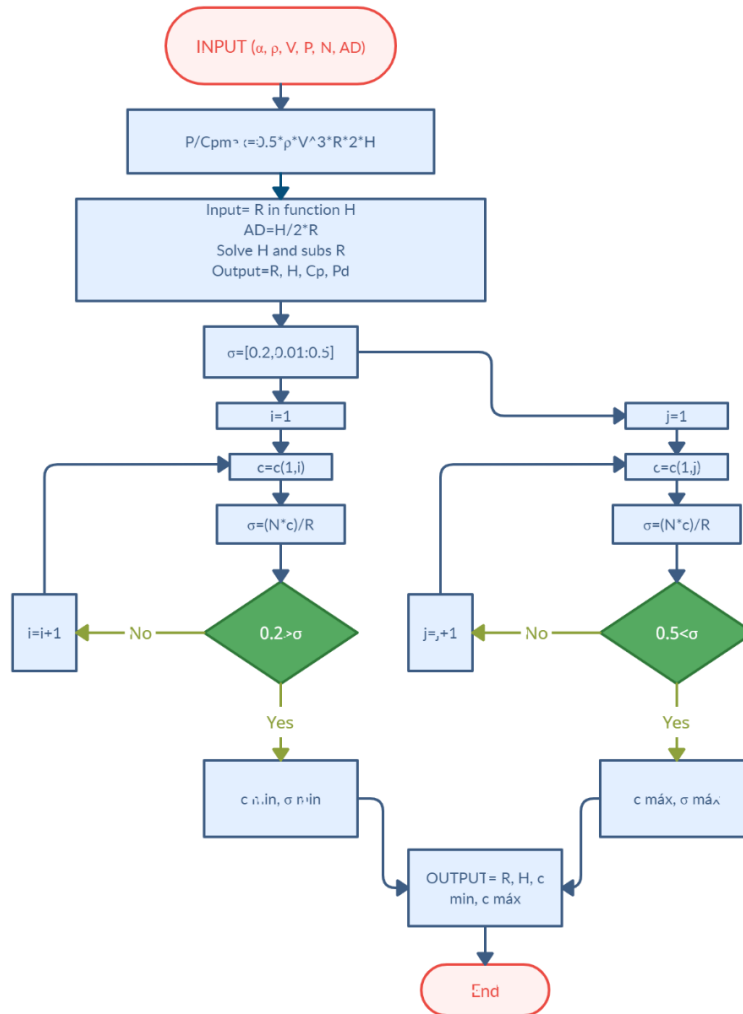
3.1. Desarrollo del algoritmo desarrollado para generar las dimensiones de la turbina

Se desarrolló un algoritmo de optimización en el software MATLAB R2021a, en el cual como variables de entrada se tienen las variables físicas de la región como densidad de viento (ρ), velocidad de viento (V) y las variables de la turbina tales como el número de álabes (N), potencia deseada (P_d) y ángulo de ataque (α). Como variables de salida se obtienen las dimensiones de la turbina como el radio (R), altura (H), dos longitudes de cuerda posibles (c), por lo tanto, dos posibles valores de la solidez de la turbina (σ).

El algoritmo se desarrolló con una serie de restricciones las cuales se obtuvieron de la revisión bibliográfica realizada en la cual se obtuvieron tanto los valores máximos como los mínimos para cada uno de acuerdo con características físicas similares a las del territorio de interés. Estas restricciones se pueden apreciar en la tabla 7, mientras que el diagrama de flujo del algoritmo se puede apreciar en la figura 14.

Figura 14.

Diagrama de flujo del algoritmo



Nota. Elaboración propia.

Tabla 7.

Restricciones establecidas para desarrollo del algoritmo.

Restricciones del algoritmo	
Variable	Rango de operación
AD	[0.25-2]
Cp máx	0.5926 (Límite de Betz)

σ	[0.2-0.5]
Tip Speed Ratio (λ)	[4-6]

Nota. Elaboración propia.

3.2. Geometría del perfil aerodinámico

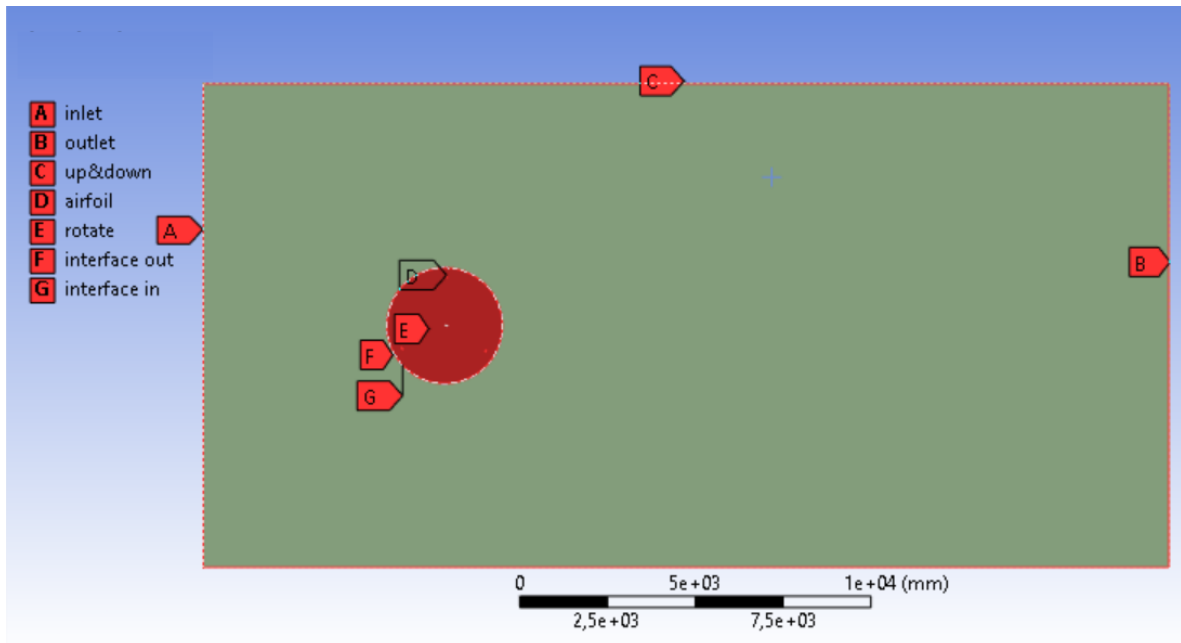
Para generar el perfil aerodinámico seleccionado (DU06W200), se utilizó la herramienta Airfoil Tools (Airfoil Tools, s/f) con la cual se puede importar el perfil y ajustarlo según la longitud de la cuerda que se desee. Como se analizaron seis posibles longitudes de cuerda, se realizó el procedimiento para cada uno. En el Anexo A se pueden apreciar las coordenadas generadas para cada longitud de cuerda.

3.3. Discretización espacial y condiciones de contorno

Para realizar la simulación de la turbina se impusieron unas condiciones de contorno, las cuales asemejan la situación real de operación de la turbina. Dichas condiciones se detallan a continuación y se pueden apreciar en la figura 15:

Figura 15.

Modelo geométrico planteado



Nota. Elaboración propia.

3.3.1. Zona rotacional (“rotate”)

En esta zona circular se configuró una velocidad angular la cual simulará el movimiento rotacional de la turbina eólica. Se utilizaron elementos triangulares con capas de inflación cerca de las superficies de los álabes para asegurar que $y^+ \leq 1.0$ ya que según (Ostos et al., 2019), con un valor inferior a 1 se espera resolver la subcapa viscosa en la capa límite turbulenta para obtener mejores soluciones cerca de la pared del álabe, esto también fue confirmado por (Balduzzi et al., 2016)(Bausas & Danao, 2015)(Antar & Elkhoury, 2020)(Roy & Saha, 2013).

3.3.2. Zona fija o ambiente

En esta zona se simula la circulación en corriente libre del aire, es rectangular y fija la cual determina el tamaño general del dominio.

3.3.3. *“Inlet” o entrada*

En esta zona se introducen los datos de entrada al sistema como velocidad del viento de forma vectorial (*“Velocity inlet”*) con el fin de determinar el ángulo de ataque. Para realizar el estudio de independencia de malla la velocidad que se configuró fue de 4.5 m/s. En el análisis de las optimizaciones propuestas se utilizarán dos velocidades presentes en la región del Cañón del Chicamocha, la velocidad crítica cuyo valor es 4.5 m/s y la velocidad máxima la cual es 7 m/s. En la relación de turbulencia tanto para el estudio de independencia de malla como para el análisis de las optimizaciones se utilizó la opción de *“Intensity”* y *“Length Scale”* las cuales fueron calculadas según las ecuaciones 17 y 18 para cada caso a analizar.

3.3.4. *“Outlet” o salida*

En esta zona se introducen las presiones de salidas del aire. Se trabajó con la condición *“Pressure Outlet”* especificando una presión manométrica de cero Pascales (0 Pa) tanto en el estudio de independencia de malla como en el análisis de las optimizaciones propuestas.

3.3.5. *“Up & down”*

En esta zona se representó la parte superior e inferior de la superficie de control a simular, fueron configuradas como paredes del tipo *“symmetry”* con el fin de que las paredes no tengan efecto en la simulación de la turbina.

3.3.6. *“Aifoil”*

Esta zona fue configurada como una pared y está representando los álabes de la turbina eólica, en esta zona se realizó un refinamiento de 3, adicionalmente se generaron 20 capas de

“*inflation*”, ya que se consideró una condición de no deslizamiento, además al presentarse un cambio en el gradiente de velocidades es necesario realizar un mallado con capas de “*inflation*” para capturar con precisión la región de la capa límite para cualquier flujo turbulento limitado por la pared. Para los tres álabes se seleccionó la condición de contorno “*Wall*” con la opción “*Moving*” con el objetivo de identificar las partes móviles del sistema.

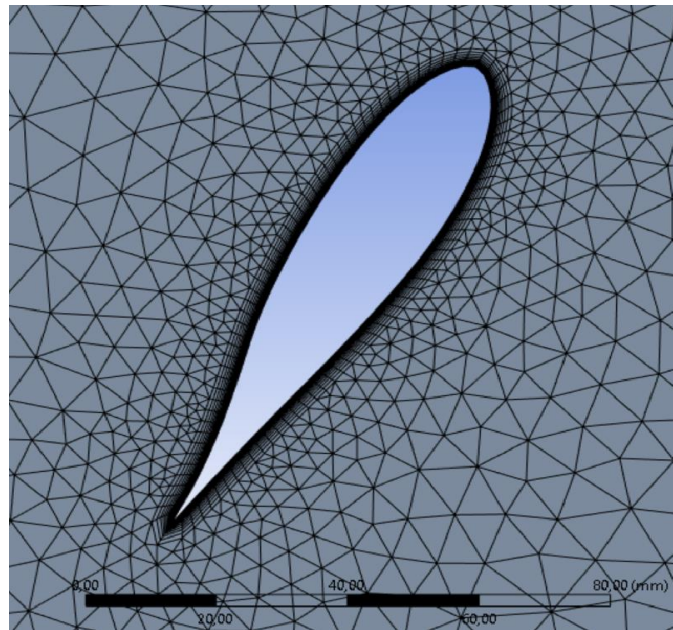
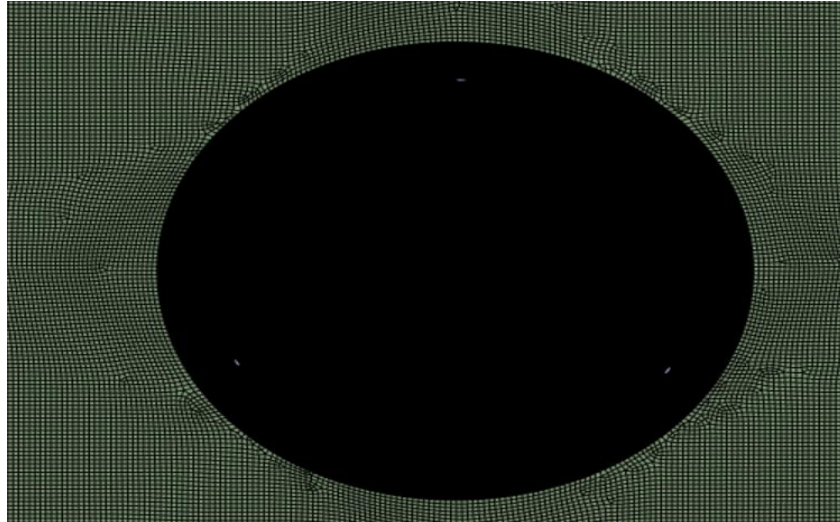
3.3.7. “*Interface out*” e “*Interface in*”

Se realizó una interfase entre las zona fija y rotacional la cual está compuesta por dos subsecciones. La primera fue llamada “*interface-out*” para referirse a la parte de la zona fija y la segunda “*interface-in*” siendo está la subsección de la zona rotacional.

Para comenzar con el estudio de independencia de la malla se utilizaron elementos triangulares en la región rotacional, la cual es la zona que necesita una malla más densa según se especificó en la sección anterior y elementos rectangulares en la zona estacionaria. Se pueden observar más detalles en la figura 16.

Figura 16.

Discretización espacial del estudio de independencia de malla.



Nota. Elaboración propia.

3.4. Modelo de referencia experimental

Para lograr realizar un correcto análisis de independencia de malla se tomó como referencia los datos experimentales de Lanzafame et al., (2014). El modelo geométrico se realizó en función del radio de la turbina con el fin de que sea escalable en la siguiente fase de la investigación. Este modelo se puede apreciar en las tablas 8 y 9.

Tabla 8.*Modelo geométrico por utilizar.*

Modelo geométrico	
Variable	Dimensión
Perfil aerodinámico [-]	NACA 4518
Número de álabes (N) [-]	3
Altura del álabes (H) [m]	0.7
Longitud de la cuerda (c) [m]	0.1
Radio de la turbina (R) [m]	0.3
Velocidad de viento (V) [m/s]	8
Velocidad angular (ω) [rads/s]	8.04 - 44.1
Tip Speed Ratio (λ)	0.30 - 1.65

Nota. Adaptado de “2D CFD modeling of H-Darrieus Wind Turbines using a transition turbulence model” p. (133) por Lanzafame. R, 2014. Energy Procedia, 45.

Tabla 9.*Dimensiones del modelo geométrico a utilizar en función del radio de la turbina*

Dimensiones geométrico	
Variable	Dimensión
L	30R
L1	10R
L2	20R
H	10R
D-R	2.4R

Nota. Elaboración propia.

3.5. Propiedades del fluido

El fluido a modelar para la simulación de la turbina Darrieus de álabes rectos, es una corriente de aire que fluye con velocidades de 4.5 m/s y 7 m/s. Las propiedades del fluido se describen en la tabla 10.

Tabla 10.

Propiedades del fluido.

Fluido: aire	
Propiedad	Valor
Densidad	1.225 kg/m ³
Viscosidad	1.7894e ⁻⁵
Velocidad	4.5m/s-7m/s
Presión	0 Pa
Temperatura	300K

Nota. Elaboración propia.

3.6. Control y modelos de solución

En esta sección se detallan las opciones seleccionadas del programa de CFD utilizado “*Fluent*” para resolver de forma numérica las ecuaciones de la mecánica de fluidos. Se consideró utilizar la opción de “*CFX*” también del programa “*Ansys*”, sin embargo, el tiempo de convergencia aumentaba considerablemente y las variaciones en los resultados obtenidos no justificaban el tiempo y costo computacional utilizado. En la tabla 11 se encuentran los controles de solución utilizados para el estudio de independencia de malla y el análisis de las optimizaciones, mientras que en la tabla 12 se enuncian los modelos de solución.

Tabla 11.*Controles de solución.*

Ecuaciones	Valor
Acoplamiento Presión-Velocidad	Algoritmo <i>SIMPLE</i>
Gradiente	<i>Least Squares Cell Based</i>
Presión	<i>Second Order</i>
Momento	<i>Second Order Upwind</i>
Energía cinética turbulenta	<i>Second Order Upwind</i>
Tasa de disipación específica	<i>Second Order Upwind</i>
Formulación transitoria	<i>Second Order Implicit</i>

Nota. Elaboración propia.**Tabla 12.***Modelos de solución.*

Ecuaciones	Valor
<i>Solver</i>	<i>Pressure Based</i>
<i>Velocity formulation</i>	<i>Absolute</i>
<i>Time</i>	<i>Transient</i>
<i>Space</i>	<i>2D space planar</i>

Nota. Elaboración propia.

3.7. Modelo de turbulencia

Como se mencionó en la sección 1.9 del presente documento, los modelos de turbulencia permiten obtener análisis cualitativos de las turbinas eólicas, teniendo en cuenta el número de Mach que se presenta sobre una turbina VAWT es muy bajo ($Ma < 0.3$), asumiendo una densidad

constante del aire y una compresibilidad casi nula (incompresible), el modelo de turbulencia que mejor se ajusta es el $k\omega$ -SST como se especificó en la sección 1.9.2 del presente documento y cuyas ecuaciones se pueden observar en el mismo apartado mencionado con anterioridad.

3.8. Residuos, criterio de convergencia, *time steps* y factores de relajación

Debido a que la solución que se genera en las simulaciones CFD es numérica, los residuos o residuales representan los errores relativos entre iteraciones consecutivas para las variables que se estén analizando, en la presente investigación se analizó el Coeficiente de sustentación (Cl) y el Coeficiente de arrastre (Cd) debido a que con estas variables es posible calcular el Coeficiente de potencia de la turbina y por lo tanto conocer el rendimiento de esta. Para garantizar resultados fiables se estableció un criterio de convergencia de 10^{-3} en los residuos de los cálculos de los coeficientes mencionados.

El “time step” hace referencia al tiempo que demora la turbina en dar una vuelta. Para la presente investigación se tomaron 1000 “time steps”, con 20 iteraciones por cada uno. Adicionalmente, los factores de relajación que deben ser utilizados debido a la no linealidad de las ecuaciones permiten controlar los cambios en las variables, estos factores de relajación se obtuvieron de (Ansys Inc, 2013) y se pueden apreciar en la tabla 13.

Tabla 13.

Factores de relajación utilizados.

Factores de relajación	
Factor	Valor
Presión	0.3
Densidad	1
Momento	0.7

Energía cinética turbulenta	0.8
Viscosidad Turbulenta	1

Nota. Adaptado de “ANSYS Fluent User's Guide ANSYS” p. (1418), por Ansys Inc. 2013.

4. Resultados

En este capítulo se expresarán los resultados obtenidos del algoritmo de optimización realizado, estudio de independencia de malla y análisis de las seis configuraciones planteadas por el algoritmo las cuales serán comparadas con una turbina eólica que opera en condiciones semejantes a la de la región de interés.

4.1. Algoritmo de optimización

En primer lugar, se desarrolló un algoritmo en el software MATLAB R2021a, en el cual se obtiene el radio, longitud de cuerda y altura de álabes de una turbina Darrieus de álabes rectos para baja velocidad de viento (4.5 m/s) siendo está la velocidad crítica en la región del Cañón del Chicamocha.

El algoritmo fue validado introduciendo variables físicas ($\rho=1.225$ kg/m³, $P=1$ kW, $V=4.5$ m/s), $C_{pmax}=0.5996$, $N=3$) tomadas de (Meana-Fernández et al., 2018) para validar el correcto funcionamiento del mismo, los resultados y errores se pueden apreciar en la tabla 14. El algoritmo desarrollado se puede apreciar en el Apéndice B.

Tabla 14.

Validación del algoritmo.

Error en las características de la VAWT entre Meana y el algoritmo propuesto			
Variable	Valor obtenido por Meana	Valor obtenido por el algoritmo planteado	% Error
R (m)	3	3	0%

H (m)	5	4.99	0.2%
c2 (m)	0.333	0.333	0%
σ_2	0.333	0.333	0

Nota. Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla 14, el algoritmo presenta un error casi nulo (0.2%) como valor máximo en la altura de la turbina. Una vez validado el algoritmo se procede a introducir las variables físicas de la región de estudio con el fin de conocer las opciones de turbinas a analizar en CFD.

El algoritmo estuvo programado para analizar las restricciones de la tabla 7 cada 0.1 m, este valor fue caracterizado de esta manera ya que utilizar una variación inferior no sería viable al momento de la fabricación de la turbina en una investigación futura. Al final se obtuvieron seis diferentes configuraciones las cuales se pueden apreciar en la tabla 15, las cuales serían validadas y comparadas más adelante en análisis CFD.

Tabla 15.

Resultados obtenidos por el algoritmo.

Resultados obtenidos del algoritmo desarrollado				
Variables de entrada				
ρ (kg/m ³)	V (m/s)	N	Pd (W)	C _p máx
1.225	4.5	3	100	0.5996
Variables de salida				
AD	R (m)	H (m)	c ₁ (m)	c ₂ (m)
0.25	1.73	0.864	0.117	0.173
0.4	1.37	1.09	0.0929	0.137
1	0.864	1.73	0.0587	0.0864

Nota. Elaboración propia.

Se puede apreciar en la tabla 15 que se obtuvieron tres configuraciones diferentes de relación Altura-Diámetro (AD) las cuales fueron 0.25-0.4 y 1; cada una de estas con dos longitudes de cuerda diferentes (c_1 y c_2) para un total de 6 posibles configuraciones a analizar.

4.2. Independencia de malla

Se realizó un estudio comparativo de tres mallas diferentes en donde se analizó el C_p en cada una de ellas vs los datos experimentales como se mencionó en la sección 2.3 del presente documento. Para proceder con el comparativo se inició con una malla de 218647 elementos totales y se fue refinando o modificando el parámetro de “Intensity (IT)” y “Length Scale (LS)”, las características de estas mallas se pueden evidenciar en la tabla 16 mientras que los parámetros de calidad se pueden apreciar en las tablas 17 y 18.

Tabla 16.

Parámetros principales de las mallas a analizar en el estudio de independencia de malla

Parámetros principales de las mallas a analizar				
Malla	IT y LS	Elementos totales	y+	Elementos en “rotate”
Malla 1 / (Opción 1)	IT=5% LS=1	218647	0.85	139826
Malla 2 / (Opción 2)	IT=4.11% LS=1	889968	0.76	750142
Malla 2/ (Opción 3)	IT=4.11% LS=0.007	889968	0.76	750142

Nota. Elaboración propia.

Tabla 17.

Parámetros de calidad de la malla 1.

Parámetros de calidad de la malla 1

Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio	Valor óptimo
<i>Aspect Ratio</i>	3.0012	54.821	3.300	Evitar grandes cambios en general
<i>Skewness</i>	5.07e-7	0.9032	6.51e-2	<0.95
<i>Orthogonal quality</i>	7.68e-2	0.9	0.84	Valores cercanos a 1

Nota. Elaboración propia.

Tabla 18.

Parámetros de calidad de la malla 2 y 3.

Parámetros de calidad de la malla 2 y 3				
Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio	Valor óptimo
<i>Aspect Ratio</i>	1.0004	52.338	1.305	Evitar grandes cambios en general
<i>Skewness</i>	2.07e-7	0.8588	5.51e-2	<0.95
<i>Orthogonal quality</i>	9.68e-2	1	0.96	Valores cercanos a 1

Nota. Elaboración propia.

Una vez determinados los valores de calidad se esperaría que con las mallas 2 y 3 obtengan mejores resultados que la malla 1 debido a que presentan una mejor calidad. Posteriormente se procedió a realizar las respectivas simulaciones. Los resultados comparativos se pueden observar en la figura 15, donde se puede determinar que las mallas 2 y 3 se acercan más a los datos experimentales, la diferencia entre estas dos mallas es el valor configurado de LS, en la malla dos se dejó un valor recomendado en la sección 1.8 del presente documento, mientras que en la malla tres este valor fue calculado por medio de la ecuación 18.

En las tablas 19, 20 y 21 se puede apreciar los valores comparativos entre los datos experimentales y las opciones planteadas, mientras que en las figuras 17, 18 y 19 se pueden apreciar las gráficas de Coeficiente de potencia vs velocidad en la punta del álabe de cada opción.

Tabla 19.

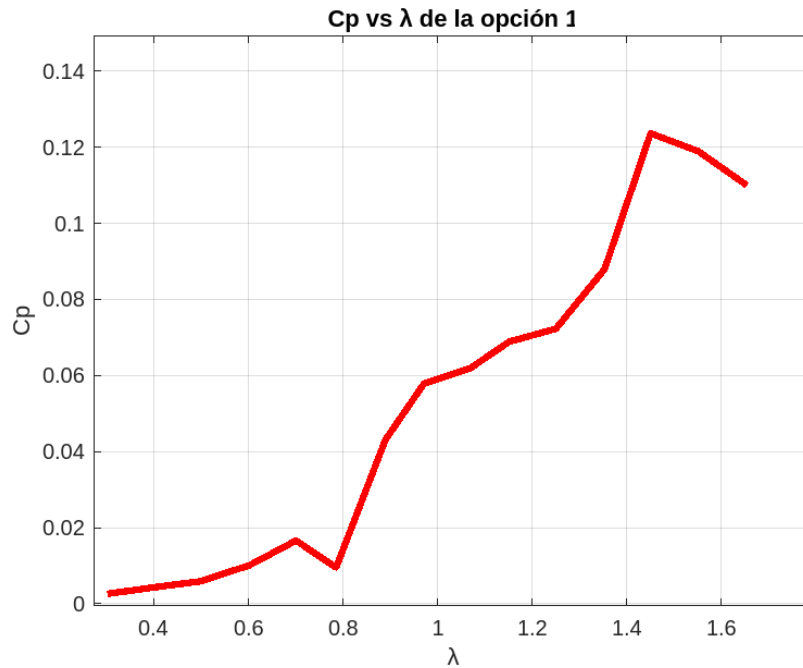
Porcentaje de error de Error entre los datos experimentales y el modelo 1 planteado.

% de Error en el Cp			
λ	Cp Experimental	Cp del modelo 1	% Error
0.30152	0.00715	0.0026	63.6363636
0.40024	0.00775	0.0043	44.516129
0.49896	0.00876	0,0059	32.6484018
0.60198	0.00988	0,0101	2.22672065
0.7007	0.01045	0,0166	58.8516746
0.76938	0.015	0,0095	36.6666667
0.88956	0.03618	0,0431	19.1265893
0.97112	0.05883	0,0579	1.58082611
1.06984	0.08282	0,062	25.1388553
1.15139	0.09086	0,0689	24.1690513
1.25012	0.098	0,0723	26.2244898
1.35313	0.10879	0,088	19.1102123
1.45185	0.1139	0,1237	8.60403863
1.55058	0.11373	0,119	4.63378176
1.65359	0.11604	0,11	5.20510169
% Error promedio			24.8225935

Nota. Elaboración propia.

Figura 17.

Cp vs λ opción 1.



Nota. Elaboración propia.

Tabla 20.

Porcentaje de Error entre los datos experimentales y el modelo 2 planteado.

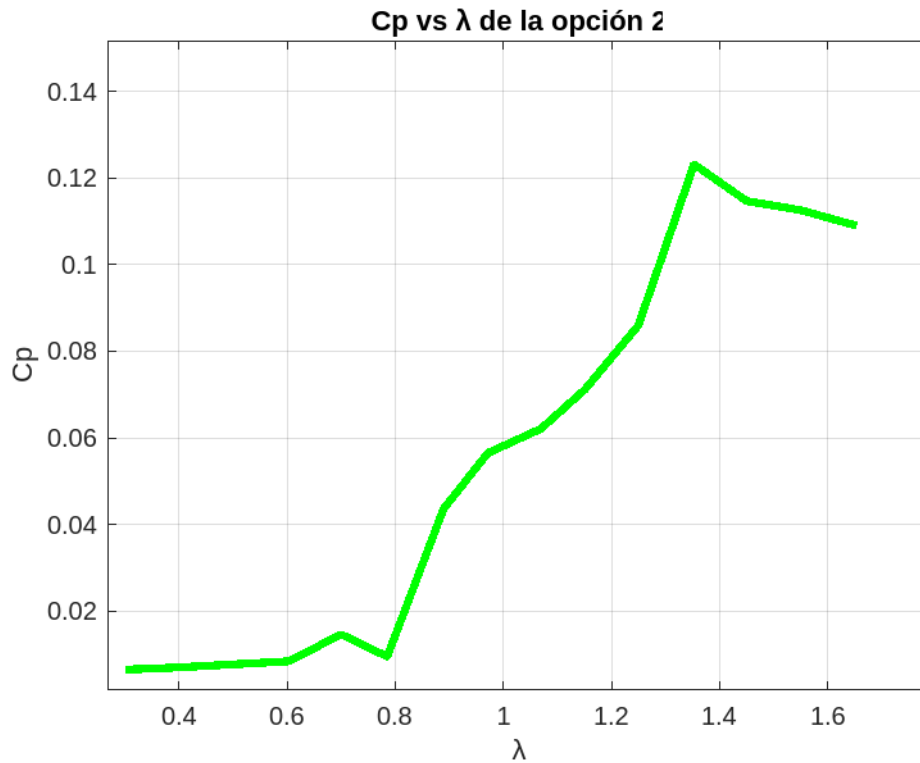
% de Error en el Cp			
λ	Cp Experimental	Cp del modelo 2	% Error
0.30152	0.00715	0.0065	9.09090909
0.40024	0.00775	0.007	9.67741935
0.49896	0.00876	0.0077	12.1004566
0.60198	0.00988	0.0084	14.9797571
0.7007	0.01045	0.0146	39.7129187
0.76938	0.015	0.0095	36.6666667
0.88956	0.03618	0.0436	20.5085683
0.97112	0.05883	0.0565	3.96056434
1.06984	0.08282	0.0621	25.0181116

1.15139	0.09086	0.0712	21.6376843
1.25012	0.098	0.0860	12.244898
1.35313	0.10879	0.1232	13.2457027
1.45185	0.1139	0.1147	0.7023705
1.55058	0.11373	0.1126	0.99358129
1.65359	0.11604	0.109	6.06687349
% Error promedio			15.1070988

Nota. Elaboración propia.

Figura 18.

C_p vs λ opción 2.

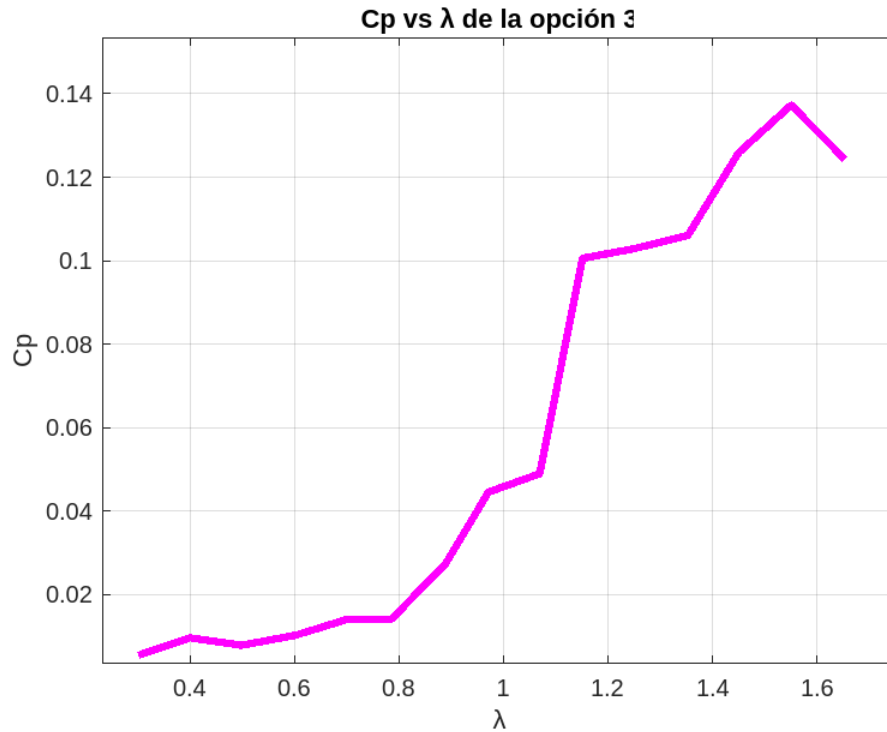


Nota. Elaboración propia.

Tabla 21.*Porcentaje de Error entre los datos experimentales y el modelo 3 planteado.*

% de Error en el Cp			
λ	Cp Experimental	Cp del modelo 3	% Error
0.30152	0.00715	0.0055	23.0769231
0.40024	0.00775	0.0097	25.1612903
0.49896	0.00876	0.0079	9.8173516
0.60198	0.00988	0.0103	4.25101215
0.7007	0.01045	0.0141	34.9282297
0.76938	0.015	0.0141	6
0.88956	0.03618	0.0275	23.9911553
0.97112	0.05883	0.0446	24.1883393
1.06984	0.08282	0.049	40.835547
1.15139	0.09086	0.1006	10.7197887
1.25012	0.098	0.1029	5
1.35313	0.10879	0.1061	2.47265374
1.45185	0.1139	0.1259	10.5355575
1.55058	0.11373	0.1373	20.724523
1.65359	0.11604	0.1243	7.11823509
% Error promedio			16.5880404

Nota. Elaboración propia.**Figura 19.***Cp vs λ opción 3.*



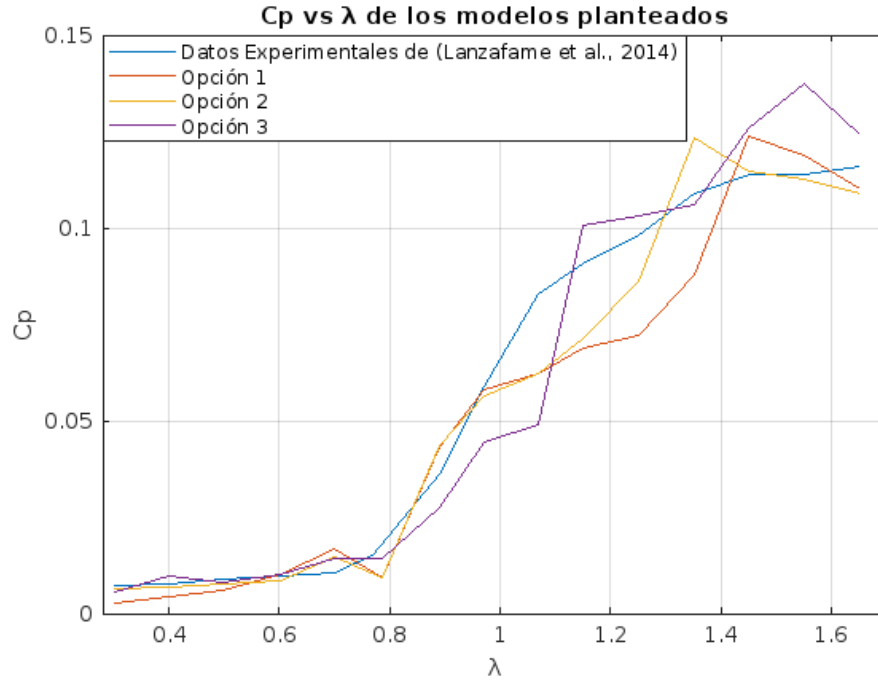
Nota. Elaboración propia.

Un aspecto para resaltar es que a bajos valores de λ , aumentar el número de elementos no conlleva a cambios significativos, sin embargo, las diferencias más notorias se pueden apreciar a partir de $\lambda > 1$ donde el aumento de elementos ya juega un papel significativo. En la figura 20 puede apreciarse un comparativo entre los datos experimentales y los datos obtenidos en la presente investigación.

Los datos que se tuvieron en cuenta para realizar el cálculo del coeficiente de potencia fueron los coeficientes de sustentación y arrastre (“*lift*” y “*drag*” respectivamente), los cuales pueden apreciarse en la figura 21.

Figura 20.

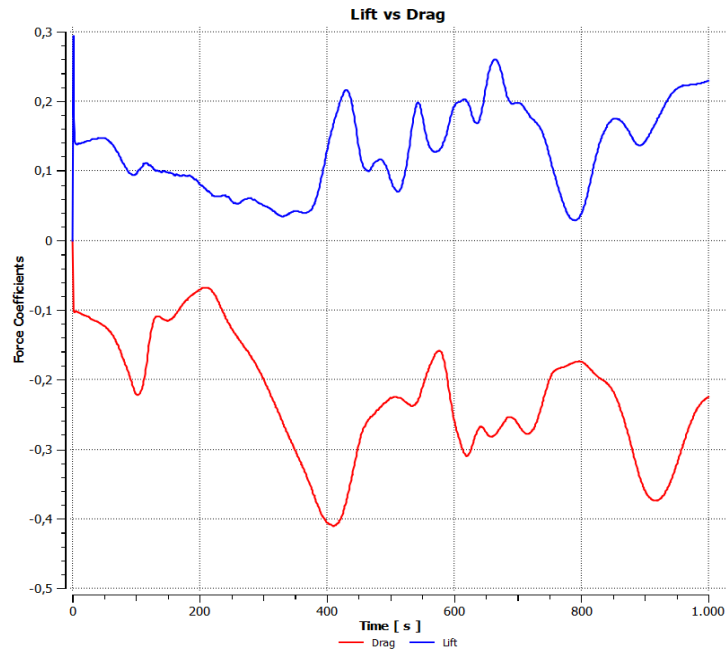
Cp vs λ de los modelos planteados.



Nota. Elaboración propia.

Figura 21.

Coefficientes de sustentación (lift) y arrastre (drag) del modelo 2 planteado.



Nota. Elaboración propia.

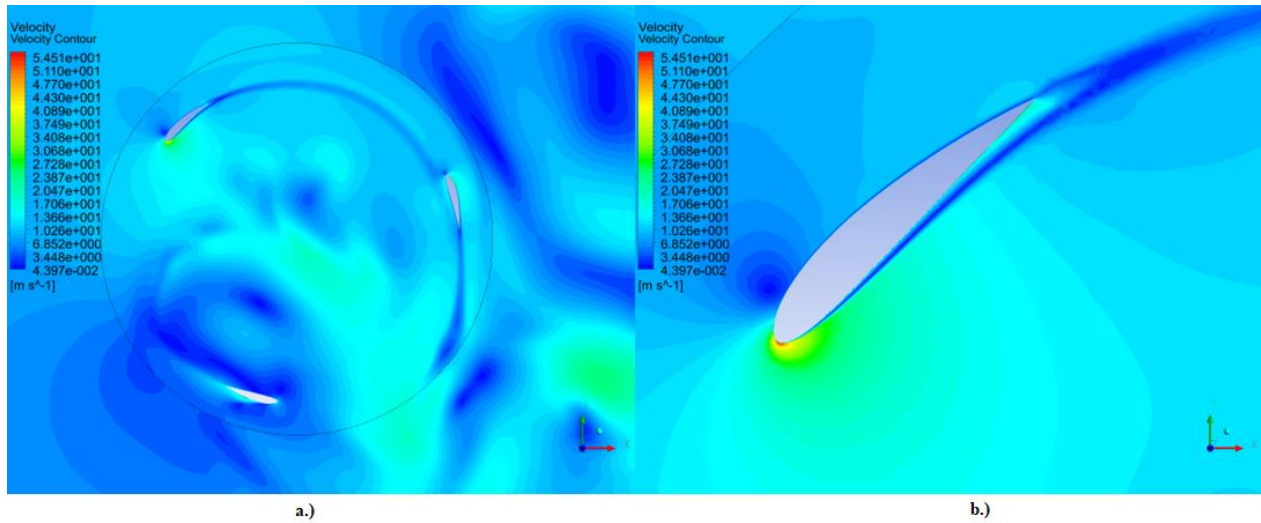
Se pudo concluir que la malla 2 (opción 2 en la figura 18) presenta resultados más cercanos a los datos experimentales con un error promedio de 15.10% mientras que la malla 3 (opción 3 en la figura 18) presentó un error promedio de 16.58% y finalmente la malla 1 (opción 1 en la figura 18) obtuvo un error promedio de 24.82%.

4.3. Contornos de velocidad

En esta sección se presentan los contornos de velocidad de la simulación realizada con una escala de colores de 100 niveles donde se puede apreciar las zonas donde se tiene más o menos velocidad. En la figura 22, en la parte a.) se puede observar los contornos de velocidad generales presentados, donde se visualiza que cada álabe deja una estela con una velocidad de alrededor a 3.44 m/s, la cual influye directamente en el ataque del siguiente álabe. Adicionalmente, las mayores velocidades se presentan en el borde de ataque de cada perfil como lo indica la parte b.) de la misma figura mencionada con anterioridad.

Figura 22.

Contorno de velocidad del estudio de independencia de malla.



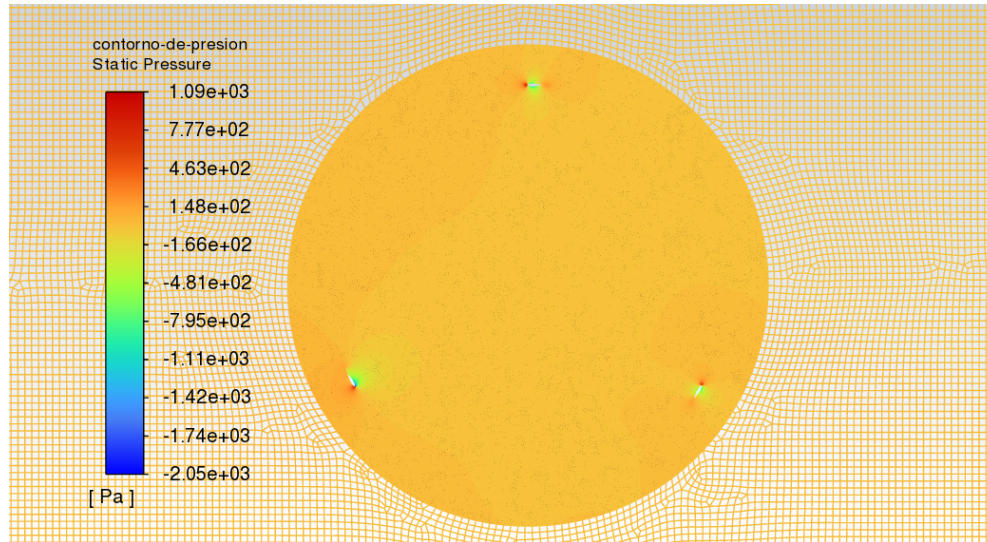
Nota. Elaboración propia.

4.4. Contornos de presión

En esta sección se presentan los contornos de presión de la simulación realizada con una escala de colores de 100 niveles donde se puede apreciar las zonas donde se tiene más o menos presión. En la figura 23 puede observarse que las mayores presiones se presentan en el borde ataque, mientras que en la salida del álabe se presentan presiones de alrededor de 463 Pa.

Figura 23.

Contorno de presión del estudio de independencia de malla.



Nota. Elaboración propia.

Se puede apreciar que, en las zonas cercanas a la pared del álabe, en el intradós se presenta baja presión ya que en este lugar se presentan algunos torbellinos como consecuencia del desprendimiento de la capa límite. El valor aproximado de estas presiones es de alrededor de -481 Pa.

4.5. Análisis de la primera propuesta de optimización $AD=0.25$ y $c=0.117m$

Se realizó el análisis de la primera propuesta de optimización hallada mediante el algoritmo planteado en la sección 3.1. Para esto se generó una malla de 2049914 elementos totales, 1096056 de elementos en la zona rotacional y 953837 elementos en la zona fija. Adicionalmente se utilizó el parámetro “*Inflation*” con 20 capas y una tasa de crecimiento de 1.2. En la tabla 22 se puede apreciar los parámetros de calidad de la malla mientras que en las figuras 24 y 25 el detalle del mallado realizado.

Tabla 22.

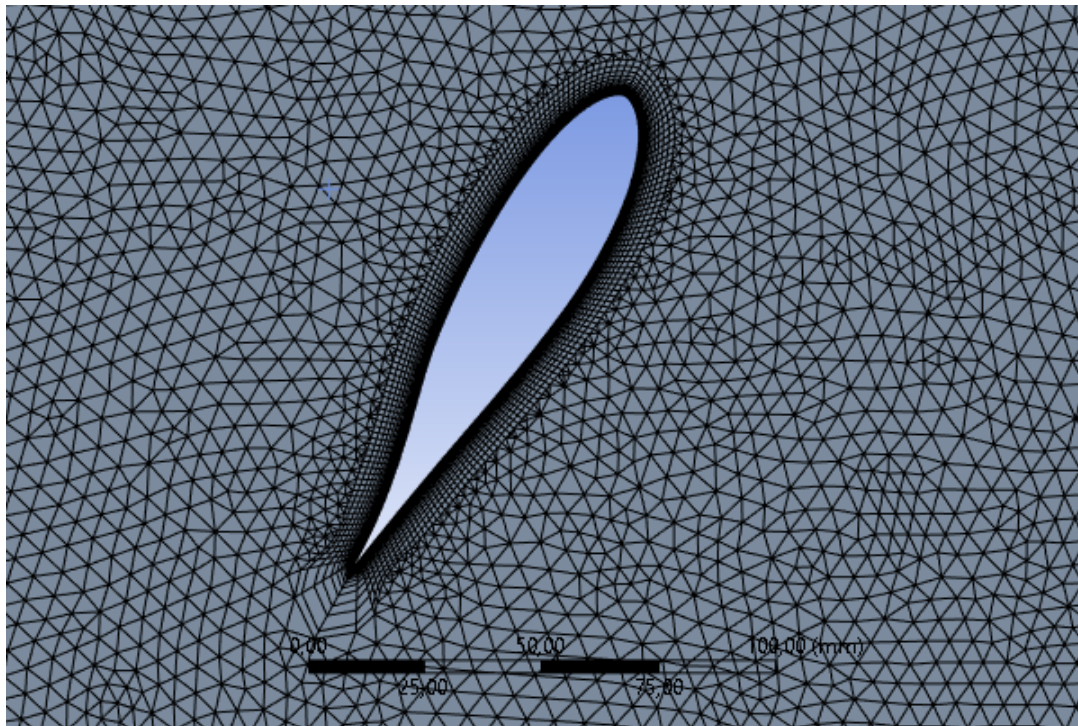
Parámetros de calidad de la malla opción 1 (AD=0.25 y c=0.117m)

Parámetro	Parámetros de calidad de la malla				Valor óptimo
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio	Desviación Estándar	
<i>Aspect Ratio</i>	1	181.11	1.1774	0.9	Evitar grandes cambios en general
<i>Skewness</i>	1.30e-10	0.99	4.83e-2	8.09e-2	<0.95
<i>Orthogonal quality</i>	1.23e-2	1	0.98	3.93e-2	Valores cercanos a 1

Nota. Elaboración propia.

Figura 24.

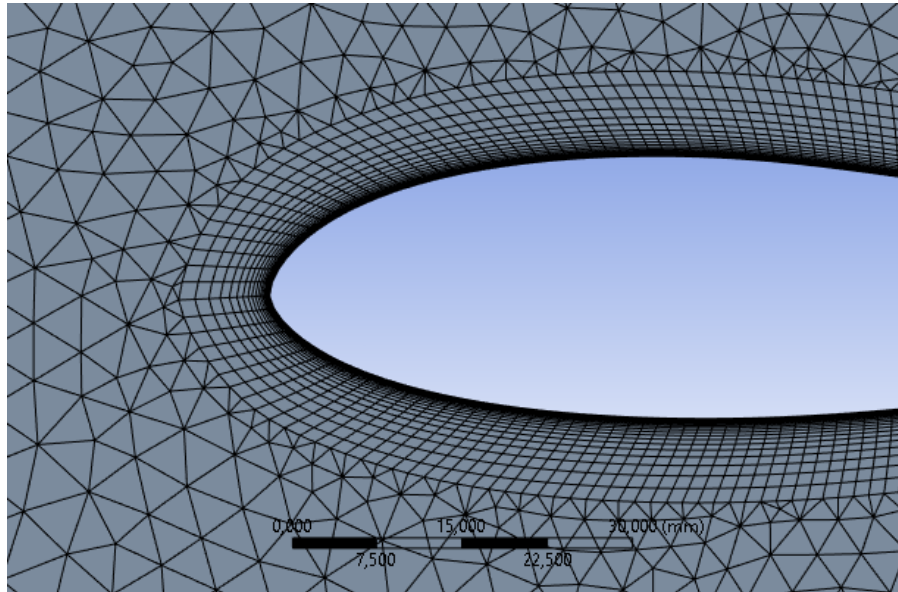
Mallado en la zona rotacional (AD=0.25 y c=0.117m)



Nota. Elaboración propia.

Figura 25.

Mallado detallado del ataque del álabe ($AD=0.25$ y $c=0.117m$)



Nota. Elaboración propia.

Con el fin de conocer el rendimiento de la turbina, se calculó el C_p a dos velocidades, una crítica (4.5 m/s) y una máxima (7 m/s), estas velocidades fueron analizadas a dos ángulos de ataque, uno crítico (0°) y el ángulo ideal (10°). En la tabla 23 se presentan los resultados obtenidos para cada velocidad y ángulo de ataque analizado. En las figuras 26 y 27 se puede apreciar la gráfica de C_p vs λ para las velocidades de 4.5 m/s y 7 m/s respectivamente.

Tabla 23.

C_p para cada velocidad de viento y ángulo de ataque analizado ($AD=0.25$ y $c=0.117m$)

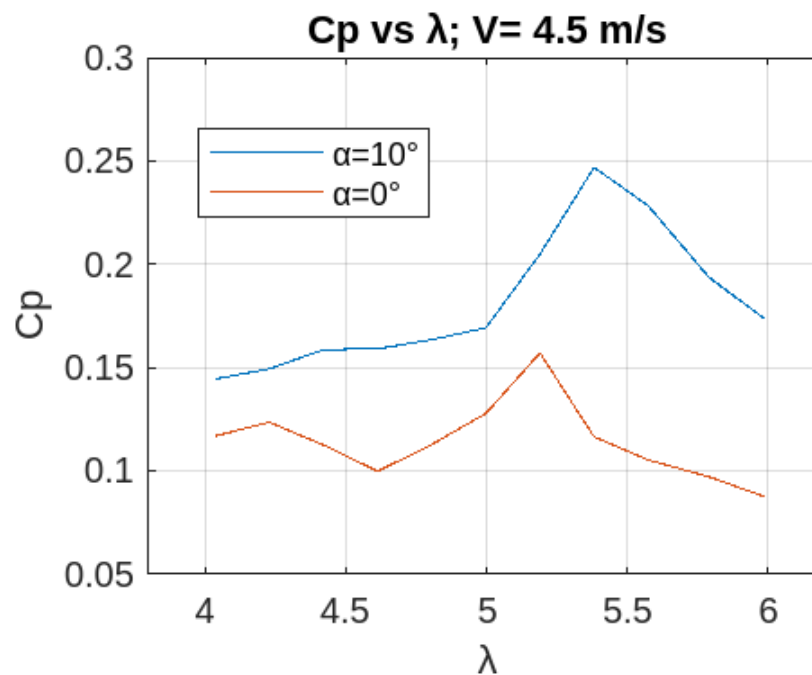
AD=0.25 y c=0.117m				
λ	Cp a V=4.5 m/s y	Cp a V=4.5 m/s y	Cp a V=7 m/s y	Cp a V=7 m/s y

	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=10^\circ$	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=10^\circ$
4.0367	0.1169	0.1445	0.12	0.1765
4.2289	0.1235	0.1494	0.135	0.1894
4.4211	0.1125	0.1587	0.1425	0.2064
4.6133	0.0998	0.1591	0.16	0.21
4.8056	0.1128	0.1635	0.1628	0.215
4.9979	0.1278	0.1693	0.17	0.22
5.19	0.1571	0.2049	0.173	0.23
5.3822	0.1165	0.24695	0.165	0.2695
5.5744	0.10528	0.2284	0.1528	0.243
5.79	0.0972	0.1938	0.149	0.238
5.99	0.0874	0.1734	0.101874	0.2

Nota. Elaboración propia.

Figura 26.

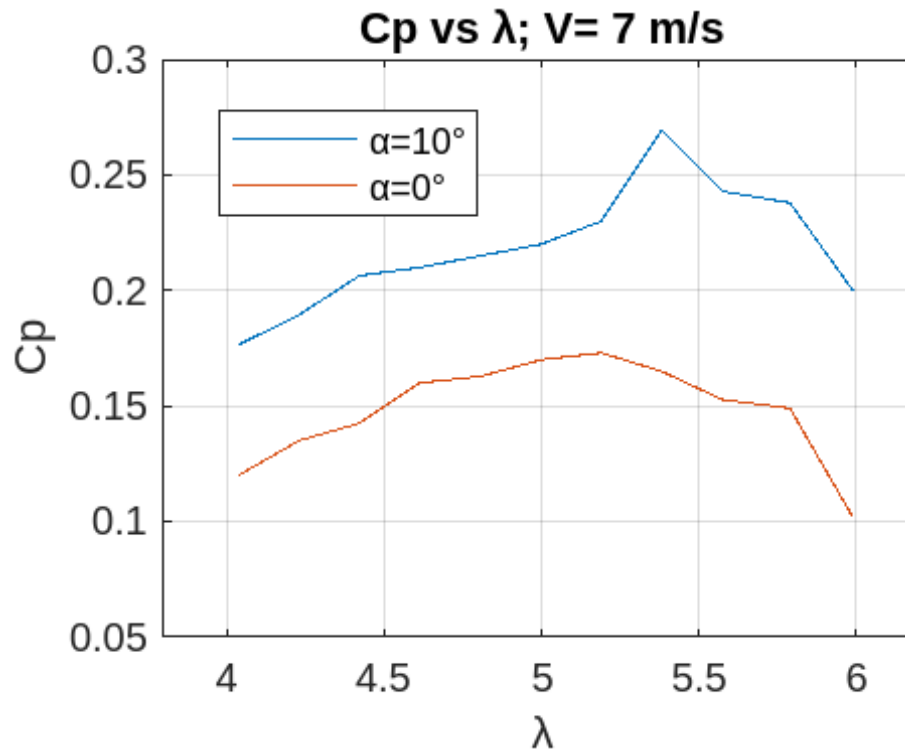
C_p vs λ a 4.5 m/s ($AD=0.25$ y $c=0.117m$)



Nota. Elaboración propia.

Figura 27.

C_p vs λ a 7 m/s ($AD=0.25$ y $c=0.117m$)



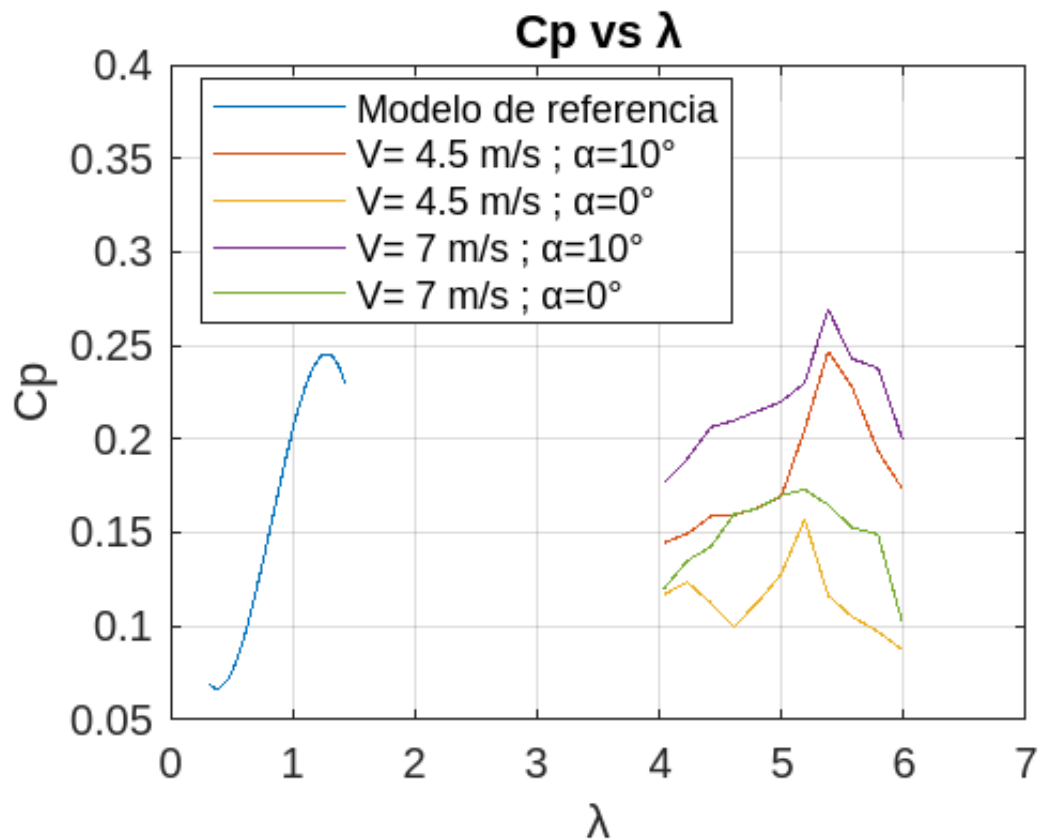
Nota. Elaboración propia.

Se puede apreciar en la figura 26 que el valor máximo de C_p alcanzado es de 0.24695 a un λ 5.38 con un ángulo de ataque de 10° , por otra parte, en la figura 27 el valor máximo de C_p alcanzado es de 0.2695 al mismo valor de 5.38, lo que corresponde a un aumento del 9,1%. El valor mínimo de C_p alcanzado es de 0.0879 a un ángulo de ataque de 0° y 4.5 m/s como se puede apreciar en la figura 26, mientras que a 7 m/s el valor mínimo es de 0.101874, esto corresponde a un aumento del 15,9%.

Se puede apreciar en la figura 28 que a pesar de que al aumentar la velocidad de viento el C_p aumentó en la optimización, no se presentó un incremento significativo en el desempeño de la turbina ni se produjo una mejora respecto al modelo de referencia.

Figura 28.

Comparativo del C_p vs λ entre el modelo de referencia y la optimización ($AD=0.25$ y $c=0.117m$)



Nota. Elaboración propia.

4.6. Análisis de la segunda propuesta de optimización $AD=0.25$ y $c=0.173m$

Se realizó el análisis de la segunda propuesta de optimización hallada mediante el algoritmo planteado en la sección 3.1. Para esto se generó una malla de 2658949 elementos totales, 1772406 de elementos en la zona rotacional y 886543 elementos en la zona fija.

Adicionalmente se utilizó el parámetro “*Inflation*” con 20 capas y una tasa de crecimiento de 1.2. En la tabla 24 se puede apreciar los parámetros de calidad de la malla mientras que en las figuras 29 y 30 el detalle del mallado realizado.

Tabla 24.

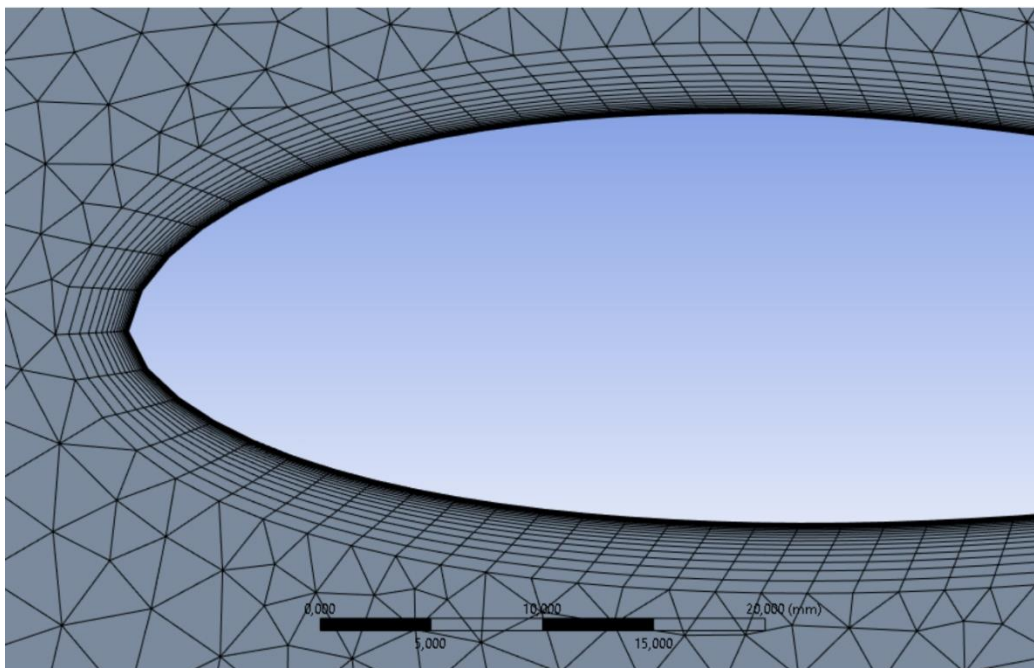
Parámetros de calidad de la malla opción 2 ($AD=0.25$ y $c=0.173m$)

Parámetro	Parámetros de calidad de la malla				Valor óptimo
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio	Desviación Estándar	
<i>Aspect Ratio</i>	1	200	1.71	0.75	Evitar grandes cambios en general
<i>Skewness</i>	1.31e-10	1	3.02e-2	5.57e-2	<0.95
<i>Orthogonal quality</i>	0.29	1	0.99	3.31e-2	Valores cercanos a 1

Nota. Elaboración propia.

Figura 29.

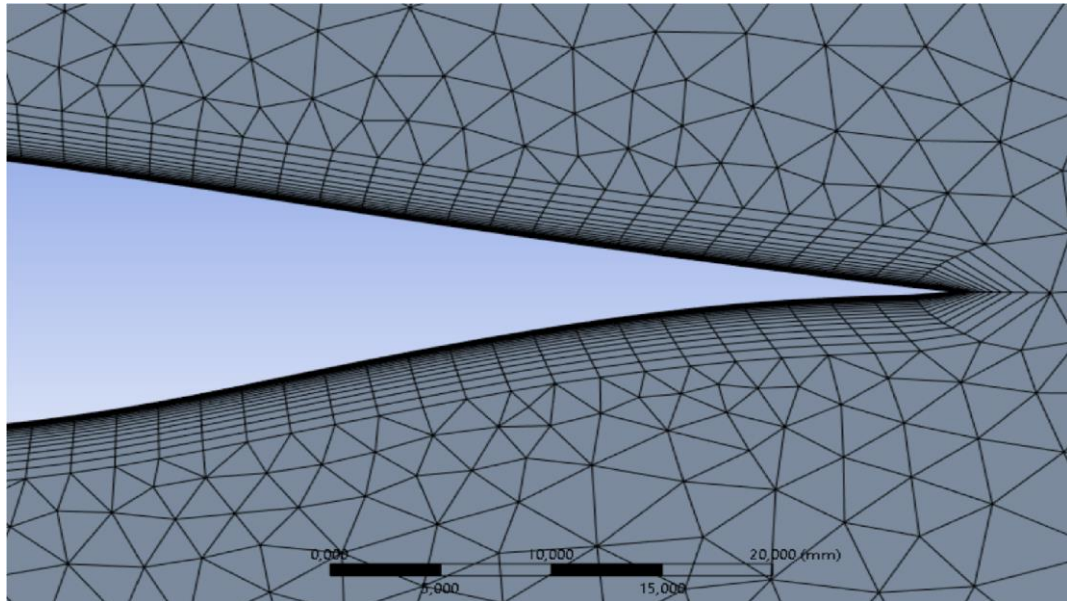
Mallado detallado del ataque del álabe ($AD=0.25$ y $c=0.173m$)



Nota. Elaboración propia.

Figura 30.

Mallado detallado de la salida del álabe ($AD=0.25$ y $c=0.173m$)



Nota. Elaboración propia.

Con el fin de conocer el rendimiento de la turbina, se calculó el C_p a dos velocidades, una crítica (4.5 m/s) y una máxima (7 m/s), estas velocidades fueron analizadas a dos ángulos de ataque, uno crítico (0°) y el ángulo ideal (10°). En la tabla 25 se presentan los resultados obtenidos para cada velocidad y ángulo de ataque analizado. En las figuras 31 y 32 se puede apreciar la gráfica de C_p vs λ para las velocidades de 4.5 m/s y 7 m/s respectivamente.

Tabla 25.

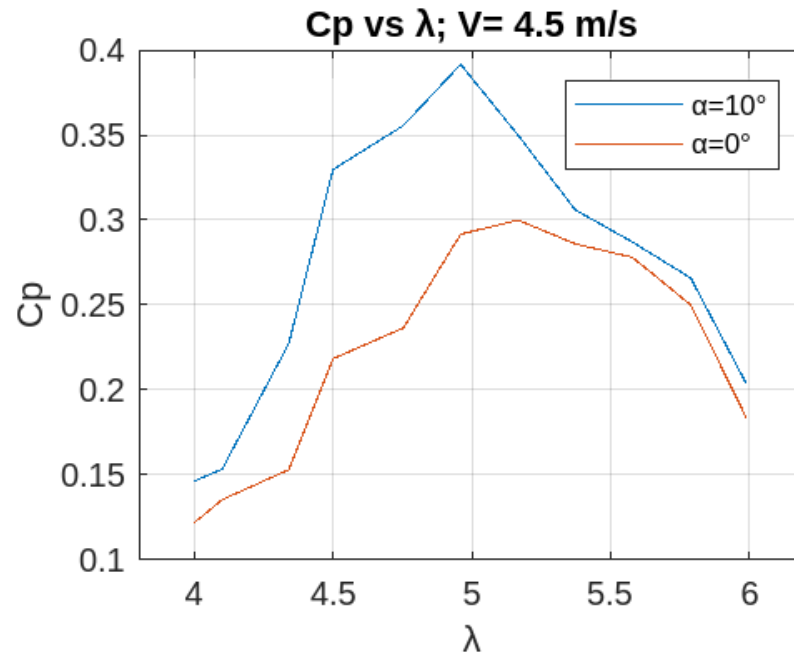
C_p para cada velocidad de viento y ángulo de ataque analizado ($AD=0.25$ y $c=0.173m$)

AD=0.25 y c=0.173m				
λ	Cp a V=4.5 m/s y $\alpha=0^\circ$	Cp a V=4.5 m/s y $\alpha=10^\circ$	Cp a V=7 m/s y $\alpha=0^\circ$	Cp a V=7 m/s y $\alpha=10^\circ$
4	0.1219	0.1464	0.13	0.1964
4.1	0.1354	0.1534	0.14	0.24
4.34	0.153	0.2273	0.163	0.273
4.5	0.2184	0.3298	0.2284	0.3598
4.7533	0.2365	0.3556	0.2475	0.38
4.96	0.2916	0.3916	0.301	0.427
5.1667	0.3	0.35	0.31	0.38
5.3733	0.286	0.306	0.296	0.337
5.58	0.278	0.287	0.272	0.32
5.79	0.25	0.2658	0.259	0.287
5.99	0.1837	0.2037	0.22	0.27

Nota. Elaboración propia.

Figura 31.

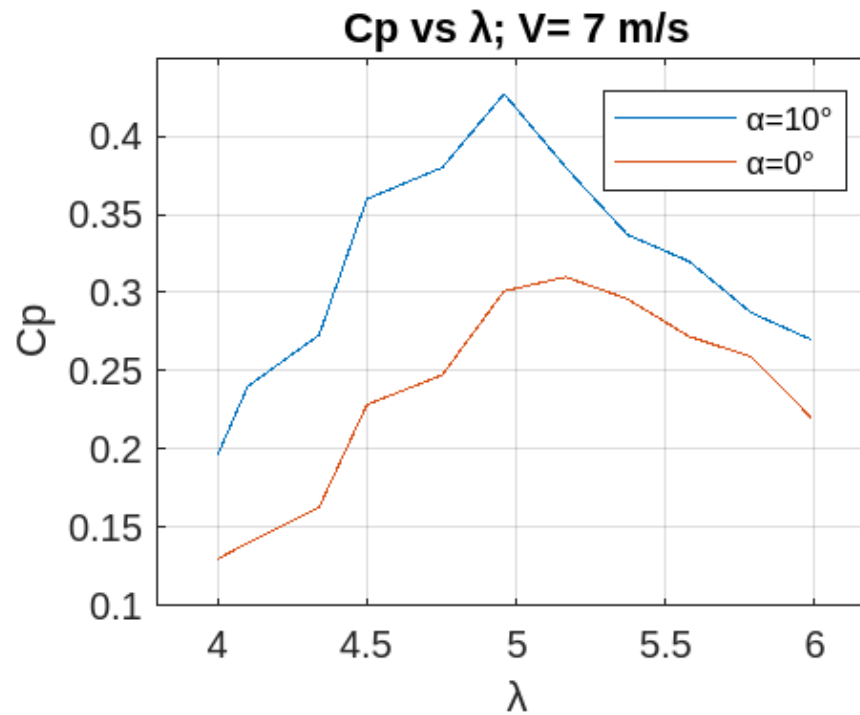
Cp vs λ a 4.5 m/s (AD=0.25 y c=0.173m)



Nota. Elaboración propia.

Figura 32.

Cp vs λ a 7 m/s ($AD=0.25$ y $c=0.173m$)



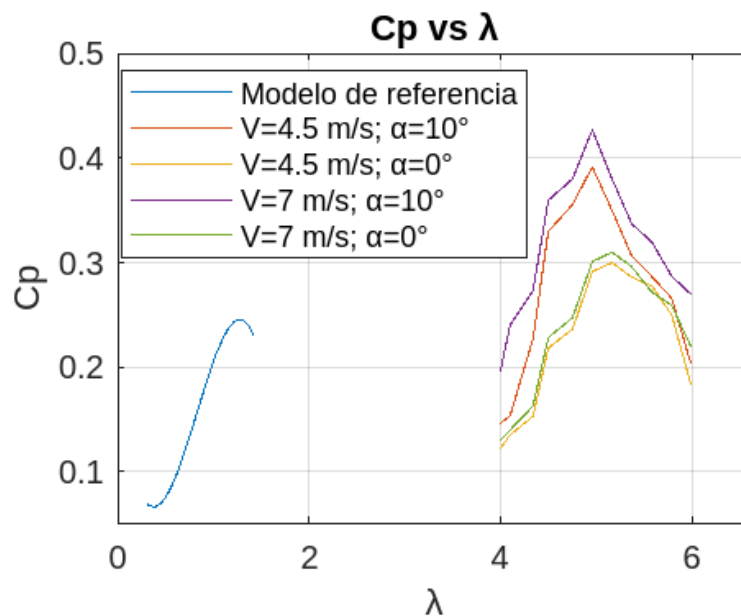
Nota. Elaboración propia.

Se puede apreciar en la figura 31 que el valor máximo de C_p alcanzado es de 0.3916 a un λ 4.96 con un ángulo de ataque de 10° , por otra parte, en la figura 32 el valor máximo de C_p alcanzado es de 0.427 al mismo valor de λ y ángulo de ataque, lo que corresponde a un aumento del 9%. El valor mínimo de C_p alcanzado es de 0.1219 a un ángulo de ataque de 0° y 4.5 m/s de velocidad como se puede apreciar en la figura 32, mientras que a 7 m/s el valor mínimo es de 0.13, esto corresponde a un aumento del 6,6%.

Se puede apreciar en la figura 33 que al aumentar la velocidad de viento el C_p aumentó en la optimización, adicionalmente se presenta un mejor rendimiento en el desempeño de la turbina respecto al modelo de referencia ya que se presentó un mayor C_p en la mayoría de λ analizados.

Figura 33.

Comparativo del C_p vs λ entre el modelo de referencia y la optimización ($AD=0.25$ y $c=0.173m$)



Nota. Elaboración propia.

4.7. Análisis de la tercera propuesta de optimización $AD=0.4$ y $c=0.0929m$

Se realizó el análisis de la tercera propuesta de optimización hallada mediante el algoritmo planteado en la sección 3.1. Para esto se generó una malla de 594745 elementos totales, 186393 de elementos en la zona rotacional y 408331 elementos en la zona fija. Adicionalmente se utilizó el parámetro “*Inflation*” con 20 capas y una tasa de crecimiento de 1.2. En la tabla 26 se puede apreciar los parámetros de calidad de la malla mientras que en las figuras 34 y 35 el detalle del mallado realizado.

Tabla 26.

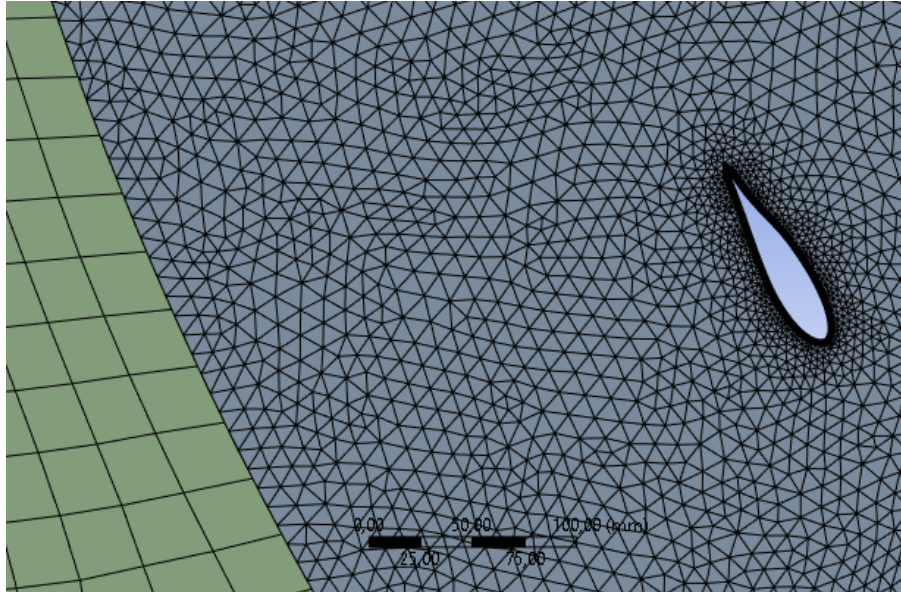
Parámetros de calidad de la malla opción 3 ($AD=0.4$ y $c=0.0.0929m$)

Parámetros de calidad de la malla					
Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio	Desviación Estándar	Valor óptimo
<i>Aspect Ratio</i>	1	949	1.4	0.56	Evitar grandes cambios en general
<i>Skewness</i>	1.31e-10	0.99	2.14e-2	4.89e-2	<0.95
<i>Orthogonal quality</i>	2.41e-3	1	0.99	3.07e-2	Valores cercanos a 1

Nota. Elaboración propia.

Figura 34.

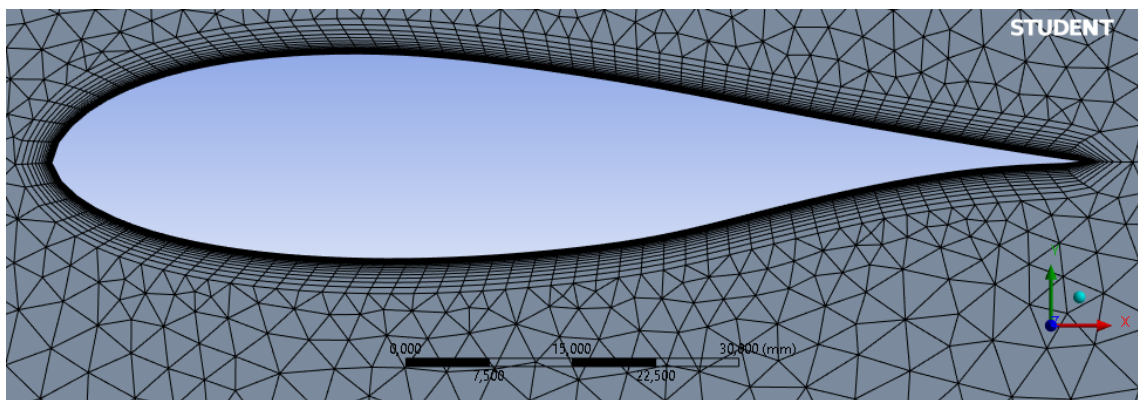
Mallado detallado zona fija y rotacional ($AD=0.4$ y $c=0.0929m$)



Nota. Elaboración propia.

Figura 35.

Mallado detallado del ábabe ($AD=0,4$ y $c=0,0929m$)



Nota. Elaboración propia.

Con el fin de conocer el rendimiento de la turbina, se calculó el C_p a dos velocidades, una crítica (4.5 m/s) y una máxima (7 m/s), estas velocidades fueron analizadas a dos ángulos de ataque, uno crítico (0°) y el ángulo ideal (10°). En la tabla 27 se presentan los resultados

obtenidos para cada velocidad y ángulo de ataque analizado. En las figuras 36 y 37 se puede apreciar la gráfica de C_p vs λ para las velocidades de 4.5 m/s y 7 m/s respectivamente.

Tabla 27.

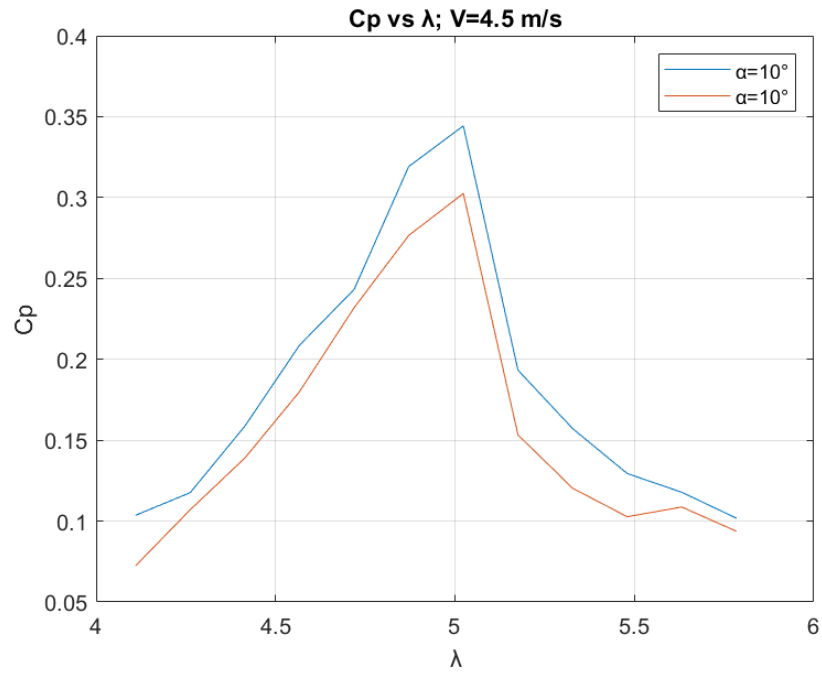
C_p para cada velocidad de viento y ángulo de ataque analizado (AD=0.4 y c=0.0929m).

AD=0.4 y c=0.0929m				
λ	C _p a V=4.5 m/s y $\alpha=0^\circ$	C _p a V=4.5 m/s y $\alpha=10^\circ$	C _p a V=7 m/s y $\alpha=0^\circ$	C _p a V=7 m/s y $\alpha=10^\circ$
4.11	0.0724	0.1036	0.10724	0.1036
4.2622	0.10705	0.1176	0.1305	0.1176
4.4144	0.139	0.1587	0.167	0.1587
4.5667	0.18	0.2087	0.212	0.2087
4.7189	0.2319	0.2432	0.26319	0.2432
4.8711	0.2766	0.3192	0.3026	0.3192
5.0233	0.3025	0.3443	0.3295	0.3443
5.1756	0.1533	0.1933	0.205	0.1933
5.3278	0.1203	0.1572	0.178	0.1572
5.48	0.1027	0.1294	0.157	0.1294
5.6322	0.1087	0.1178	0.149	0.1178
5.7844	0.0937	0.1018	0.137	0.1018

Nota. Elaboración propia.

Figura 36.

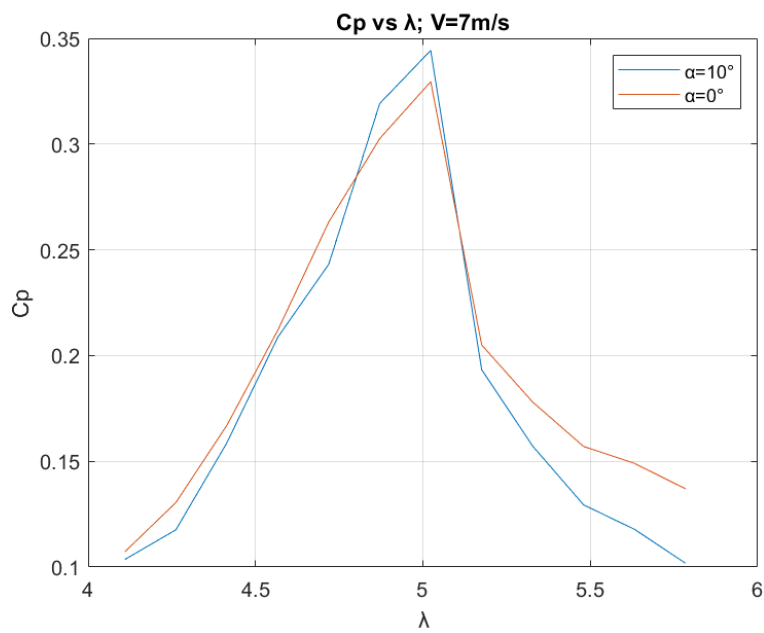
C_p vs λ a 4.5 m/s (AD=0.4 y c=0.0929m)



Nota. Elaboración propia.

Figura 37.

Cp vs λ a 7 m/s ($AD=0.4$ y $c=0.0929m$)



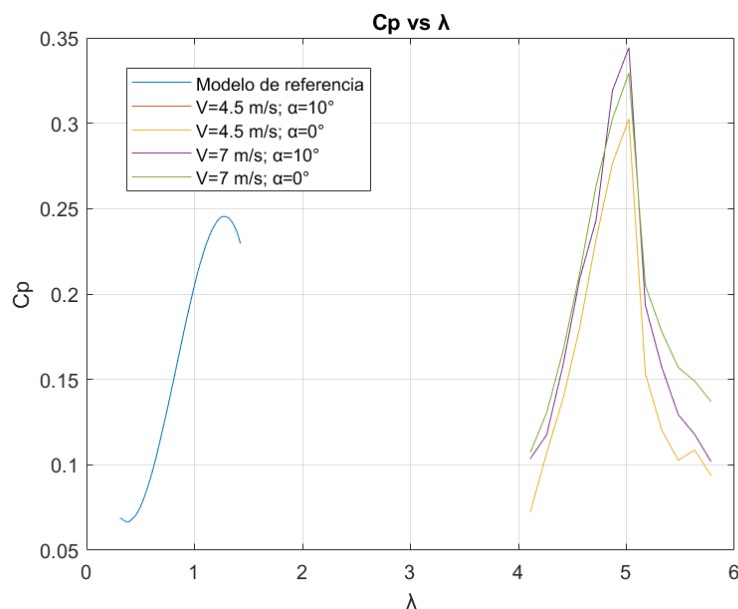
Nota. Elaboración propia.

Se puede apreciar en la figura 34 que el valor máximo de C_p alcanzado es de 0.3443 a un λ de 5.0233 con un ángulo de ataque de 10° al igual que el valor máximo de la figura 35. El valor mínimo de C_p alcanzado es de 0.0724 a un ángulo de ataque de 0° , $\lambda=4.11$ y 4.5 m/s de velocidad como se puede apreciar en la figura 34, mientras que a 7 m/s el valor mínimo es de 0.1018 a un ángulo de ataque de 0° y $\lambda=5.7844$, esto corresponde a un aumento del 40,6%.

Se puede apreciar en la figura 38 que al aumentar la velocidad de viento el C_p no aumentó considerablemente, ni presentó mayor cambio al modificar los ángulos de ataque en la optimización. Adicionalmente, se presenta un mejor rendimiento en el desempeño de la turbina respecto al modelo de referencia, ya que se presentó un mayor C_p en la mayoría de λ analizados. Del mismo modo, se observa que el desempeño de la turbina tiende a mantenerse constante sin importar la velocidad de viento.

Figura 38.

Comparativo del C_p vs λ entre el modelo de referencia y la optimización ($AD=0.4$ y $c=0.0929m$)



Nota. Elaboración propia.

4.8. Análisis de la cuarta propuesta de optimización $AD=0.4$ y $c=0.137m$

Se realizó el análisis de la cuarta propuesta de optimización hallada mediante el algoritmo planteado en la sección 3.1. Para esto se generó una malla de 593528 elementos totales, 185174 de elementos en la zona rotacional y 408331 elementos en la zona fija. Además, se utilizó el parámetro “*Inflation*” con 20 capas y una tasa de crecimiento de 1.2. En la tabla 28 se evidencia los parámetros de calidad de la malla mientras que en las figuras 39 y 40 el detalle del mallado realizado.

Tabla 28.

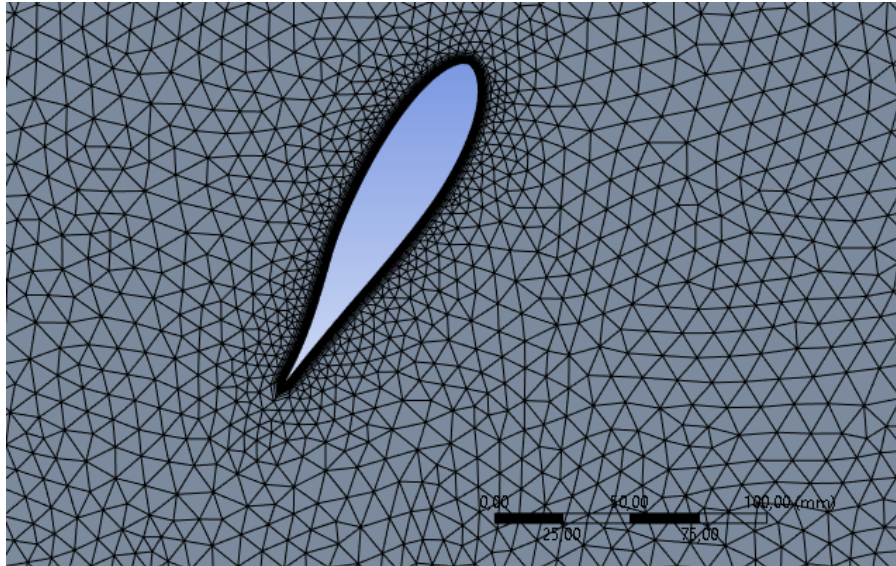
Parámetros de calidad de la malla opción 4 ($AD=0.4$ y $c=0.137m$)

Parámetros de calidad de la malla					
Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio	Desviación Estándar	Valor óptimo
<i>Aspect Ratio</i>	1	949	1.4	0.56	Evitar grandes cambios en general
<i>Skewness</i>	1.31e-10	0.99	2.14e-2	4.89e-2	<0.95
<i>Orthogonal quality</i>	2.41e-3	1	0.99	3.1e-2	Valores cercanos a 1

Nota. Elaboración propia.

Figura 39.

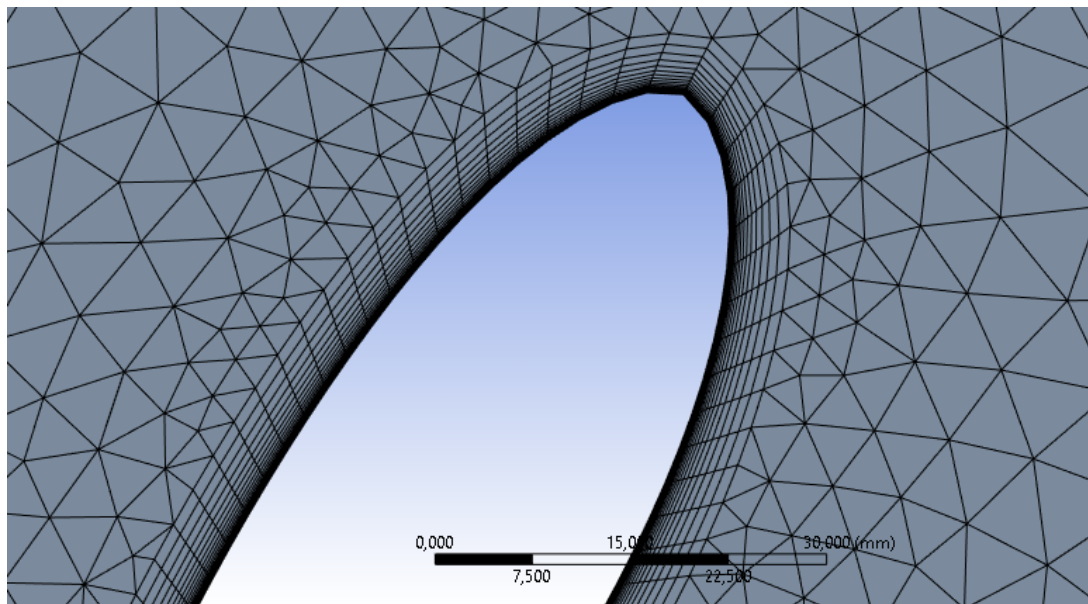
Mallado detallado zona fija y rotacional ($AD=0.4$ y $c=0.137m$)



Nota. Elaboración propia.

Figura 40.

Mallado detallado del álabe ($AD=0.4$ y $c=0.137m$)



Nota. Elaboración propia.

Con el fin de conocer el rendimiento de la turbina, se calculó el C_p a dos velocidades, una crítica (4.5 m/s) y una máxima (7 m/s), estas velocidades fueron analizadas a dos ángulos de ataque, uno crítico (0°) y el ángulo ideal (10°). En la tabla 29 se presentan los resultados obtenidos para cada velocidad y ángulo de ataque analizado. En las figuras 41 y 42 se puede apreciar la gráfica de C_p vs λ para las velocidades de 4.5 m/s y 7 m/s respectivamente.

Tabla 29.

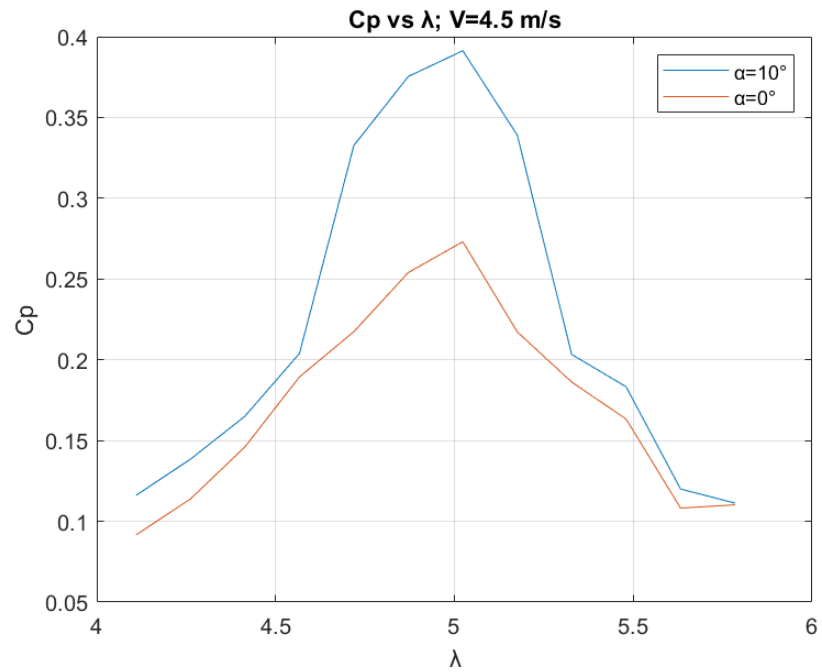
C_p para cada velocidad de viento y ángulo de ataque analizado (AD=0.4 y c=0.137m).

AD=0.4 y c=0.137m				
λ	C _p a V=4.5 m/s y $\alpha=0^\circ$	C _p a V=4.5 m/s y $\alpha=10^\circ$	C _p a V=7 m/s y $\alpha=0^\circ$	C _p a V=7 m/s y $\alpha=10^\circ$
4.11	0.0916	0.1161	0.12	0.14
4.2622	0.1139	0.1385	0.1305	0.165
4.4144	0.1461	0.1651	0.139	0.191
4.5667	0.1894	0.2039	0.175	0.239
4.7189	0.2174	0.3327	0.212	0.37
4.8711	0.254	0.3754	0.246	0.3954
5.0233	0.2731	0.3913	0.2954	0.413
5.1756	0.2173	0.3391	0.317	0.3691
5.3278	0.1862	0.2033	0.273	0.24
5.48	0.1633	0.1833	0.2462	0.2233
5.6322	0.1082	0.12	0.224	0.18
5.7844	0.1102	0.1113	0.175	0.179

Nota. Elaboración propia.

Figura 41.

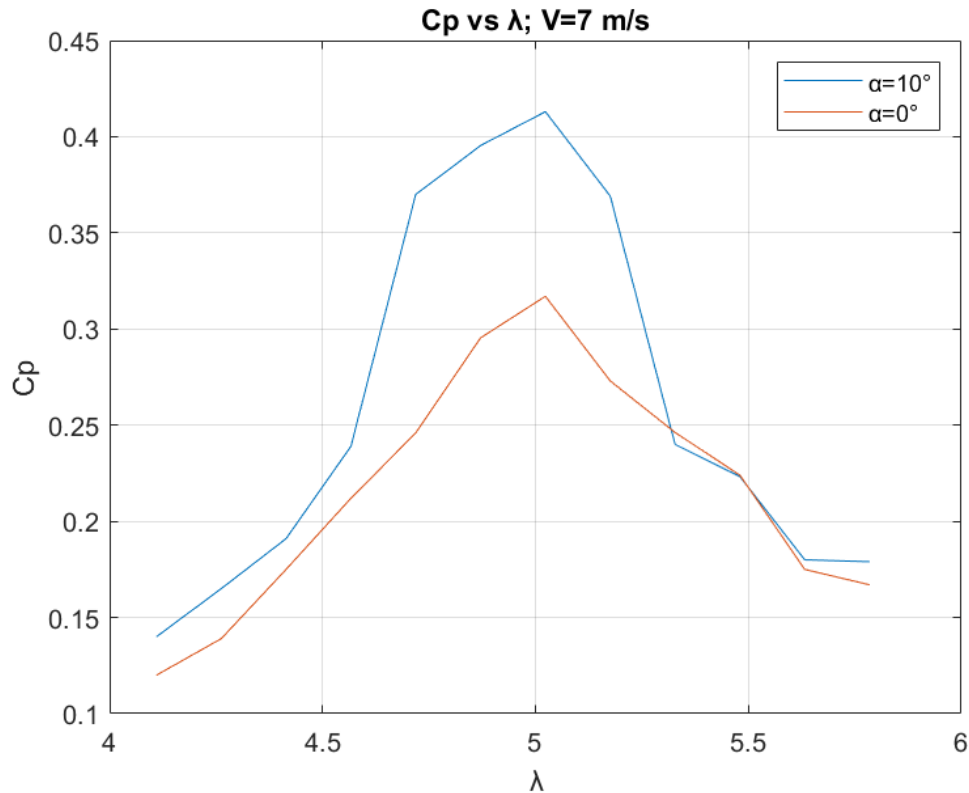
C_p vs λ a 4.5 m/s (AD=0.4 y c=0.137m)



Nota. Elaboración propia.

Figura 42.

C_p vs λ a 7 m/s ($AD=0.4$ y $c=0.137m$)

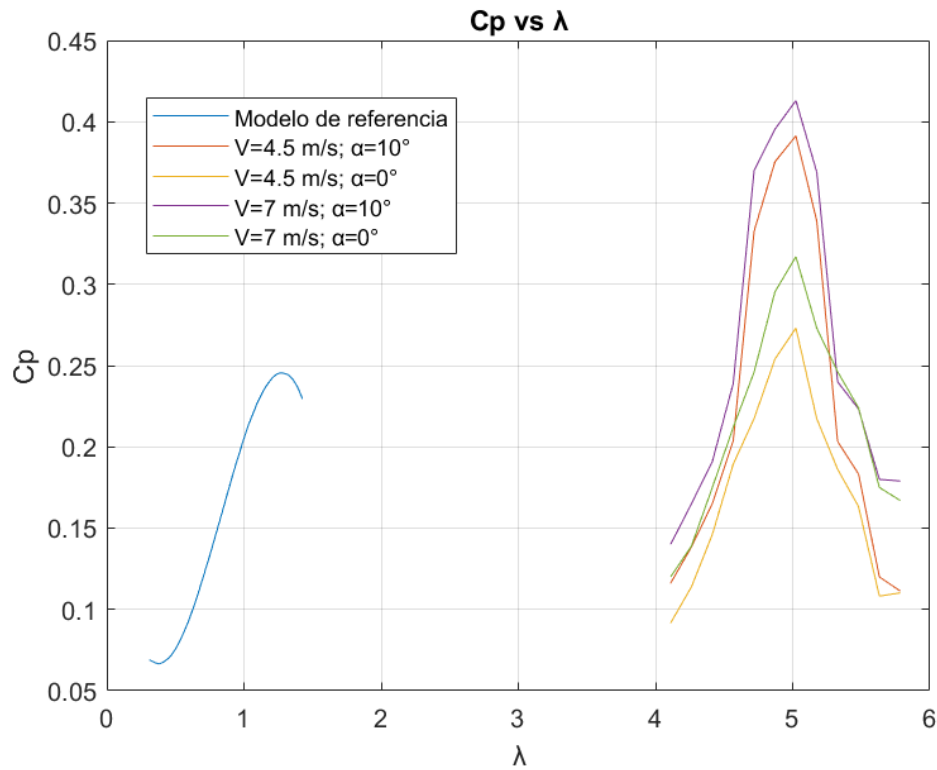


Nota. Elaboración propia.

De acuerdo con lo anterior, en la figura 41 que el valor máximo de C_p alcanzado es de 0.3913 a un λ de 5.0233 con un ángulo de ataque de 10° y velocidad de 4.5 m/s, mientras que a una velocidad de 7 m/s a igual valor de λ y ángulo de ataque como se observa en la figura 42, el C_p máximo fue de 0.413 lo que representa un aumento del 5,54%. El valor mínimo de C_p alcanzado es de 0.0916 a un ángulo de ataque de 0° , $\lambda=4.11$ y 4.5 m/s de velocidad, lo cual se evidencia en la figura 41, mientras que a 7 m/s el valor mínimo es de 0.14 a un ángulo de ataque de 0° y $\lambda=4.11$, esto corresponde a un aumento del 52,8%.

Figura 43.

Comparativo del C_p vs λ entre el modelo de referencia y la optimización ($AD=0.4$ y $c=0.137m$)



Nota. Elaboración propia.

En la figura 43 al aumentar la velocidad de viento el C_p aumentó considerablemente y presentó una mejoría al modificar los ángulos de ataque en la optimización. Asimismo, se presenta un mejor rendimiento en el desempeño de la turbina respecto al modelo de referencia ya que se presentó un mayor C_p en la mayoría de λ analizados. Se observa que el desempeño de la turbina logra alcanzar el valor de 0.4 lo cual es favorable.

4.9. Análisis de la quinta propuesta de optimización $AD=1$ y $c=0.0587m$

Se realizó el análisis de la quinta propuesta de optimización hallada mediante el algoritmo planteado en la sección 3.1. Para esto se generó una malla de 310020 elementos totales, 76900 de elementos en la zona rotacional y 233099 elementos en la zona fija. Para ello, se utilizó el parámetro “*Inflation*” con 20 capas y una tasa de crecimiento de 1.2. En la tabla 30, los parámetros de calidad de la malla mientras que en las figuras 44 y 45 el detalle del mallado realizado.

Tabla 30.

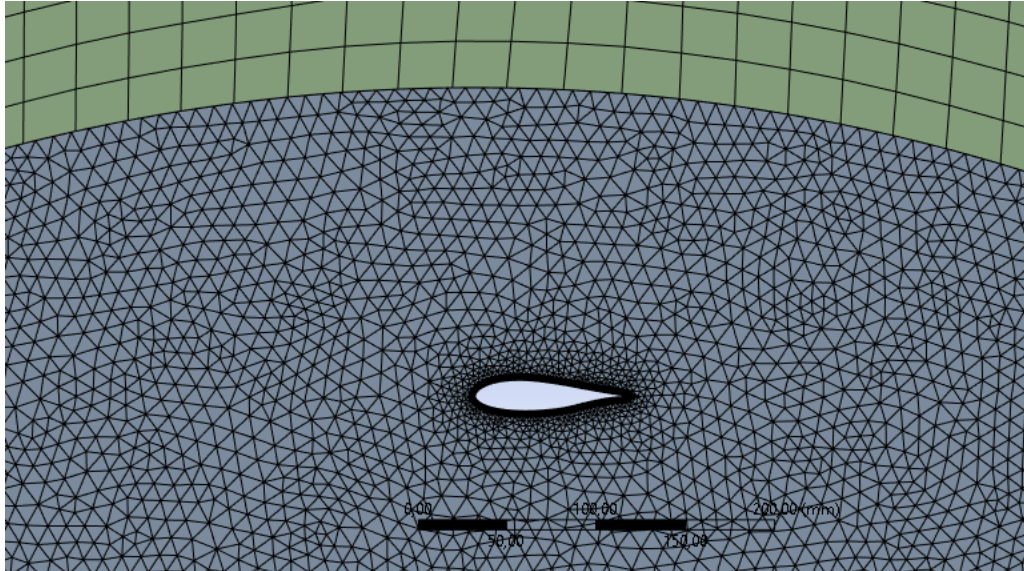
Parámetros de calidad de la malla opción 5 ($AD=1$ y $c=0.0587m$)

Parámetros de calidad de la malla					
Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio	Desviación Estándar	Valor óptimo
<i>Aspect Ratio</i>	1	995	1.6	0.74	Evitar grandes cambios en general
<i>Skewness</i>	1.31e-10	0.99	2.83e-2	5.26e-2	<0.95
<i>Orthogonal quality</i>	2.30e-3	1	0.99	3.5e-2	Valores cercanos a 1

Nota. Elaboración propia.

Figura 44.

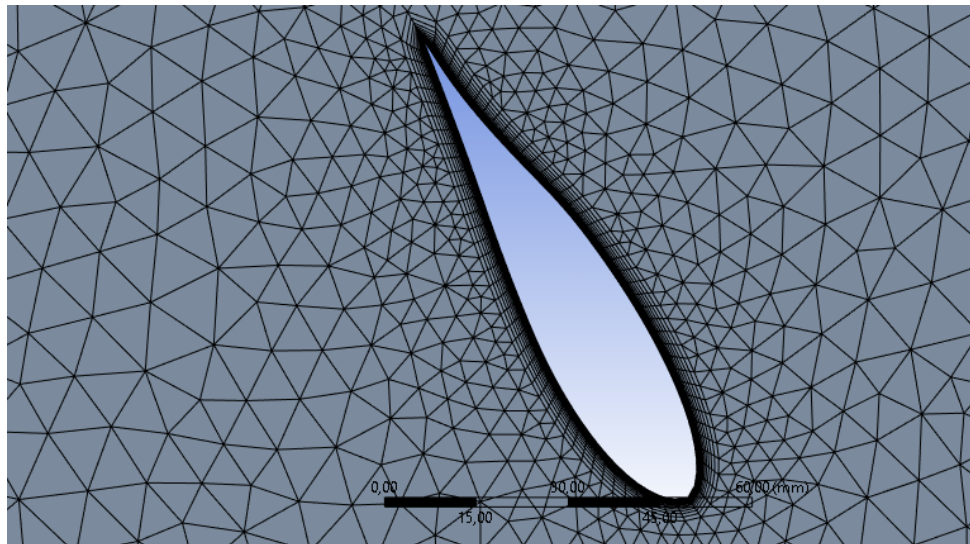
Mallado detallado zona fija y rotacional ($AD=1$ y $c=0.0587m$)



Nota. Elaboración propia.

Figura 45.

Mallado detallado del álabes ($AD=1$ y $c=0.0587m$)



Nota. Elaboración propia.

Con el fin de conocer el rendimiento de la turbina, se calculó el C_p a dos velocidades, una crítica (4.5 m/s) y una máxima (7 m/s), estas velocidades fueron analizadas a dos ángulos de

ataque, uno crítico (0°) y el ángulo ideal (10°). En la tabla 31 se presentan los resultados obtenidos para cada velocidad y ángulo de ataque analizado. En las figuras 46 y 47, se muestra la gráfica de C_p vs λ para las velocidades de 4.5 m/s y 7 m/s respectivamente.

Tabla 31.

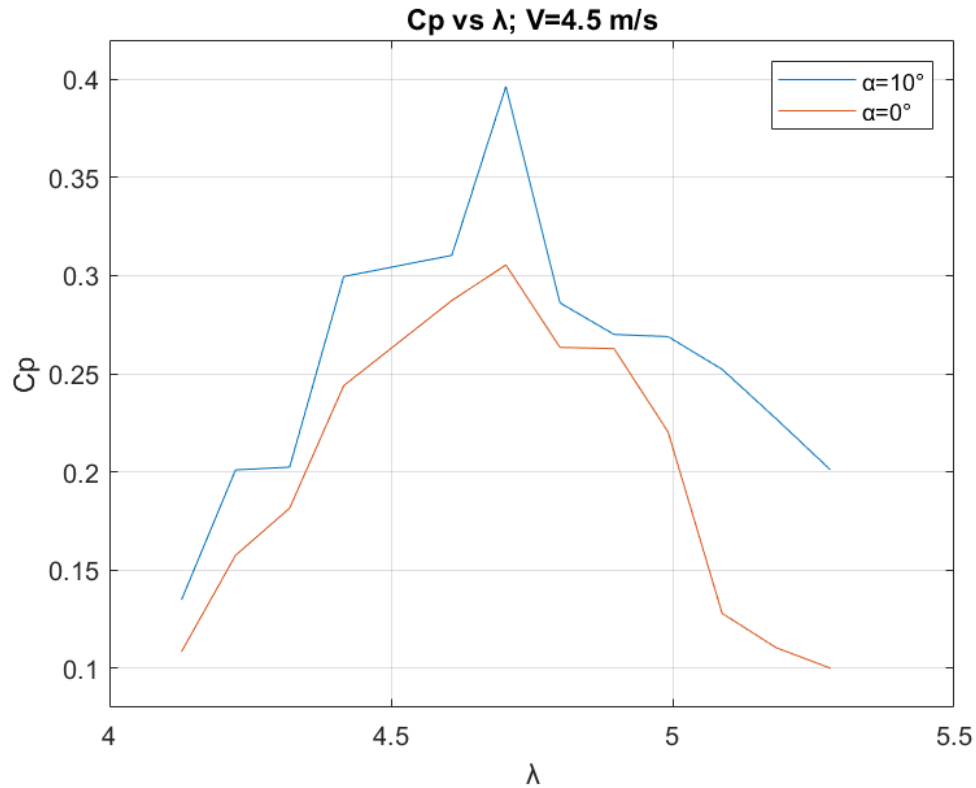
C_p para cada velocidad de viento y ángulo de ataque analizado (AD=1 y c=0.0587m).

AD=1 y c=0.0587m				
λ	Cp a V=4.5 m/s y $\alpha=0^\circ$	Cp a V=4.5 m/s y $\alpha=10^\circ$	Cp a V=7 m/s y $\alpha=0^\circ$	Cp a V=7 m/s y $\alpha=10^\circ$
4.1280	0.1084	0.1348	0.134	0.158
4.224	0.1575	0.2010	0.175	0.219
4.32	0.1815	0.2024	0.2015	0.22
4.4160	0.2439	0.2995	0.259	0.3095
4.6080	0.2873	0.3103	0.29	0.3203
4.7040	0.3054	0.3363	0.324	0.387
4.8	0.2634	0.2861	0.2834	0.361
4.896	0.2628	0.27	0.278	0.34
4.992	0.2203	0.26890	0.23	0.314
5.0880	0.1279	0.2522	0.15	0.298
5.1840	0.1104	0.227	0.14	0.2578
5.28	0.10	0.2011	0.132	0.22

Nota. Elaboración propia.

Figura 46.

C_p vs λ a 4.5 m/s (AD=1 y c=0.0587m)

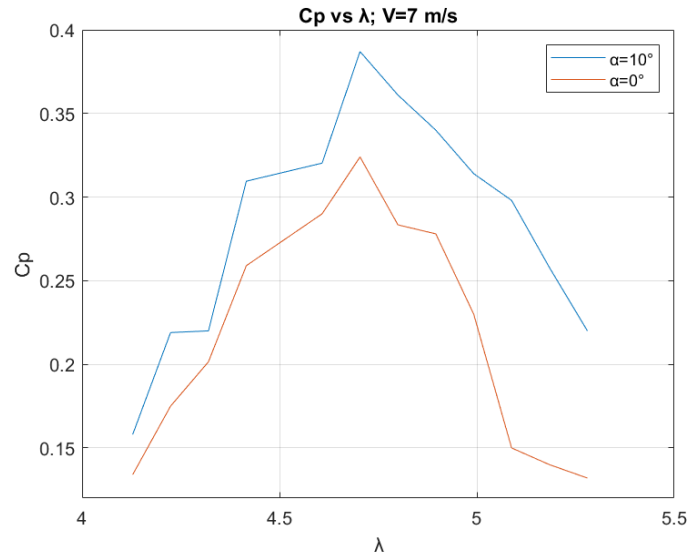


Nota. Elaboración propia.

En la figura 46 el valor máximo de C_p alcanzado es de 0.3363 a un λ de 4.7040 con un ángulo de ataque de 10° y velocidad de 4.5 m/s, mientras que a una velocidad de 7 m/s a igual valor de λ y ángulo de ataque como se observa en la figura 47, el C_p máximo fue de 0.387 lo que representa un aumento del 15,07%. El valor mínimo de C_p alcanzado es de 0.10 a un ángulo de ataque de 0° , $\lambda=5.28$ y 4.5 m/s de velocidad como se puede apreciar en la figura 46, mientras que a 7 m/s el valor mínimo es de 0.158 a un ángulo de ataque de 0° y $\lambda=4.128$, esto corresponde a un aumento del 58%.

Figura 47.

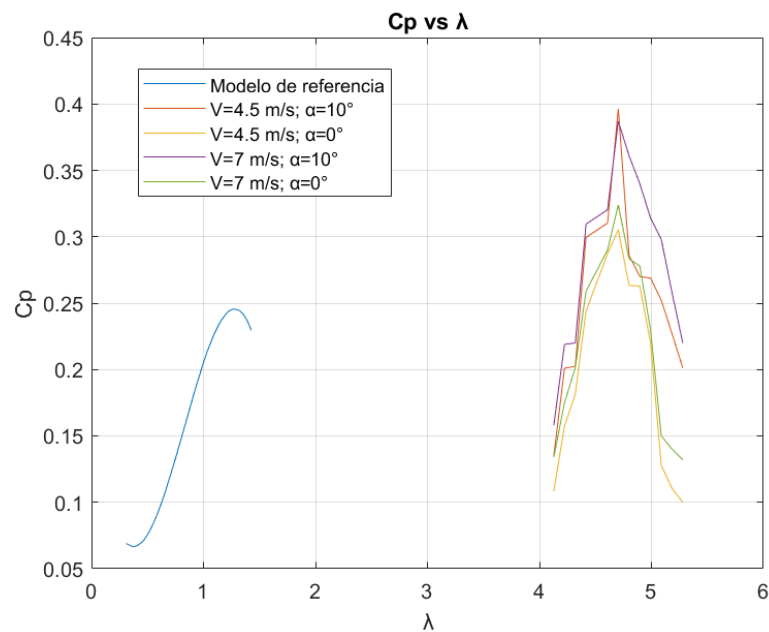
C_p vs λ a 7 m/s ($AD=1$ y $c=0.0587m$)



Nota. Elaboración propia.

Figura 48.

Comparativo del C_p vs λ entre el modelo de referencia y la optimización ($AD=1$ y $c=0.0587m$)



Nota. Elaboración propia.

Se puede apreciar en la figura 48 que al aumentar la velocidad de viento el C_p aumentó considerablemente, sin embargo, no se presenta una mejoría significativa al modificar los ángulos de ataque en la optimización, adicionalmente se presenta un mejor rendimiento en el desempeño de la turbina respecto al modelo de referencia ya que se presentó un mayor C_p en la mayoría de λ analizados.

4.10. Análisis de la sexta propuesta de optimización $AD=1$ y $c=0.0864m$

Se realizó el análisis de la sexta propuesta de optimización hallada mediante el algoritmo planteado en la sección 3.1. Para esto se generó una malla de 1138666 elementos totales, 794881 de elementos en la zona rotacional y 343764 elementos en la zona fija. Adicionalmente se utilizó el parámetro “*Inflation*” con 20 capas y una tasa de crecimiento de 1.2. En la tabla 32 se puede apreciar los parámetros de calidad de la malla mientras que en las figuras 49 y 50 el detalle del mallado realizado.

Tabla 32.

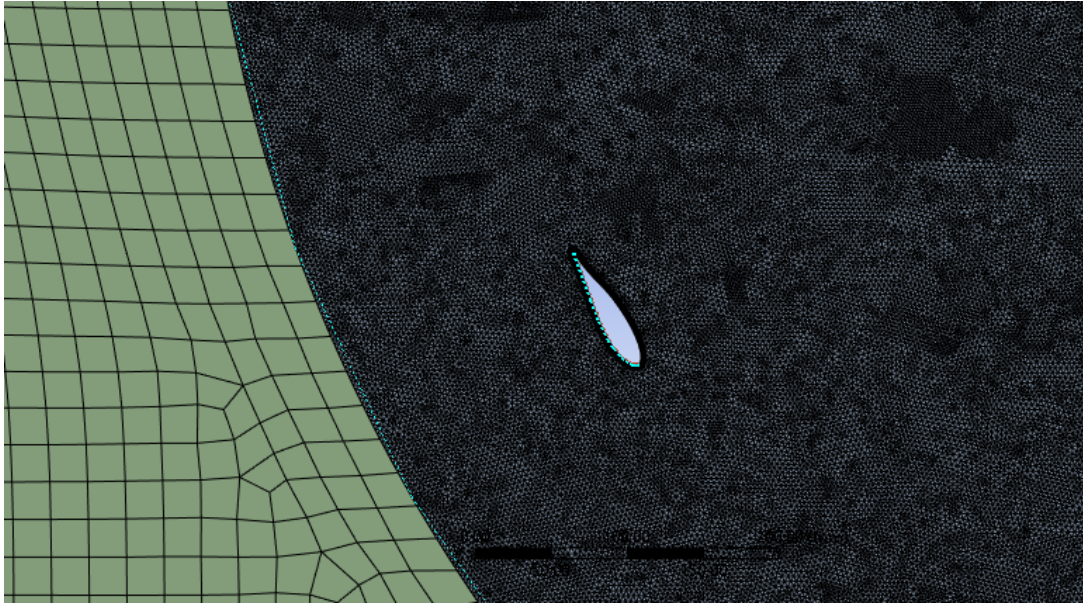
Parámetros de calidad de la malla opción 6 ($AD=1$ y $c=0.0864m$)

Parámetros de calidad de la malla					
Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio	Desviación Estándar	Valor óptimo
<i>Aspect Ratio</i>	1	995	1.3	0.38	Evitar grandes cambios en general
<i>Skewness</i>	1.31e-10	0.99	4.24e-2	5.58e-2	<0.95
<i>Orthogonal quality</i>	2.30e-3	1	0.98	3.60e-2	Valores cercanos a 1

Nota. Elaboración propia.

Figura 49.

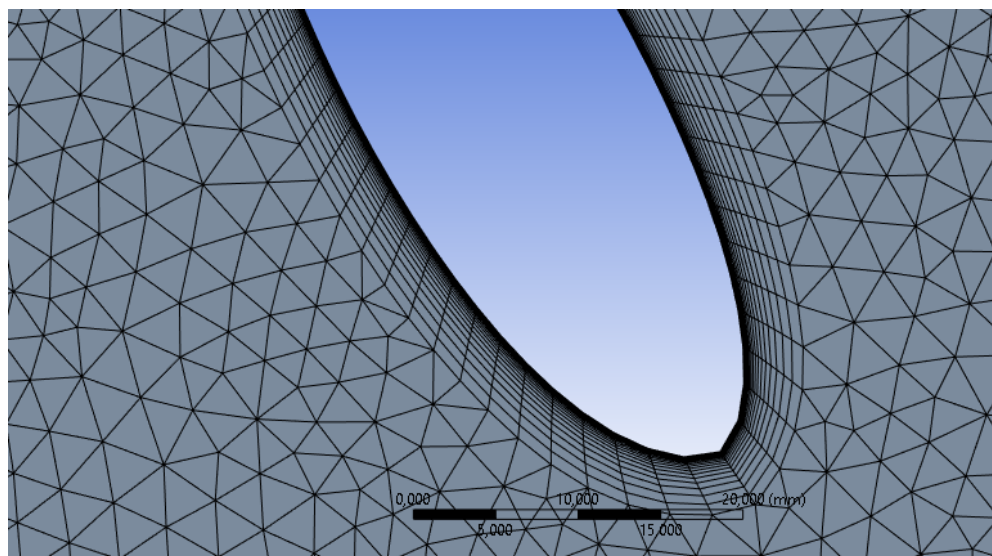
Mallado detallado zona fija y rotacional ($AD=1$ y $c=0.0864m$)



Nota. Elaboración propia.

Figura 50.

Mallado detallado del álabes ($AD=1$ y $c=0.0864m$)



Nota. Elaboración propia.

Con el fin de conocer el rendimiento de la turbina, se calculó el C_p a dos velocidades, una crítica (4.5 m/s) y una máxima (7 m/s), estas velocidades fueron analizadas a dos ángulos de ataque, uno crítico (0°) y el ángulo ideal (10°). En la tabla 33 se presentan los resultados obtenidos para cada velocidad y ángulo de ataque analizado. En las figuras 51 y 52 se puede apreciar la gráfica de C_p vs λ para las velocidades de 4.5 m/s y 7 m/s respectivamente.

Tabla 33.

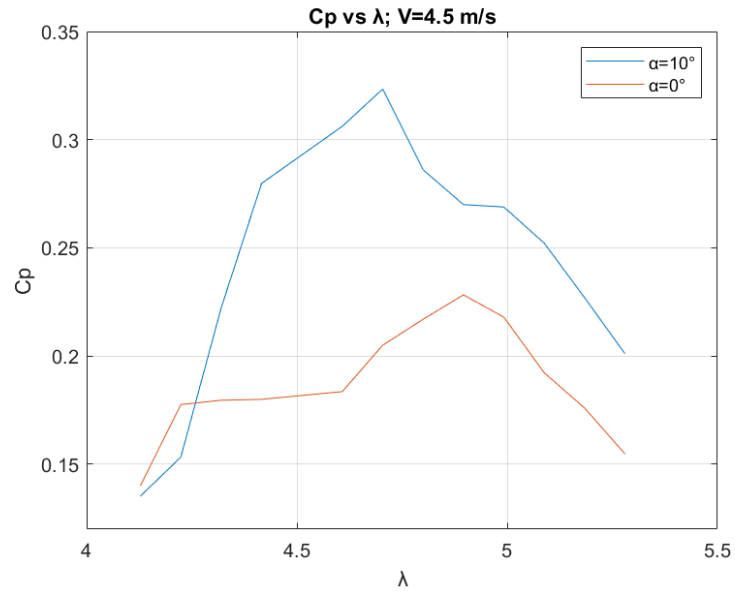
Cp para cada velocidad de viento y ángulo de ataque analizado ($AD=1$ y $c=0.0864m$).

AD=1 y c=0.0864m				
λ	Cp a V=4.5 m/s y $\alpha=0^\circ$	Cp a V=4.5 m/s y $\alpha=10^\circ$	Cp a V=7 m/s y $\alpha=0^\circ$	Cp a V=7 m/s y $\alpha=10^\circ$
4.1280	0.1401	0.1353	0.1520	0.1611
4.224	0.1776	0.1533	0.1624	0.30
4.32	0.1796	0.2223	0.1986	0.32
4.4160	0.18	0.2798	0.2603	0.36
4.6080	0.1836	0.3062	0.2837	0.3874
4.7040	0.2050	0.3234	0.3463	0.3774
4.8	0.2170	0.2861	0.3707	0.392
4.896	0.2283	0.27	0.2462	0.354
4.992	0.2180	0.26890	0.1639	0.279
5.0880	0.1923	0.2522	0.1509	0.22
5.1840	0.176	0.227	0.1085	0.17
5.28	0.1548	0.2011	0.1070	0.15

Nota. Elaboración propia.

Figura 51.

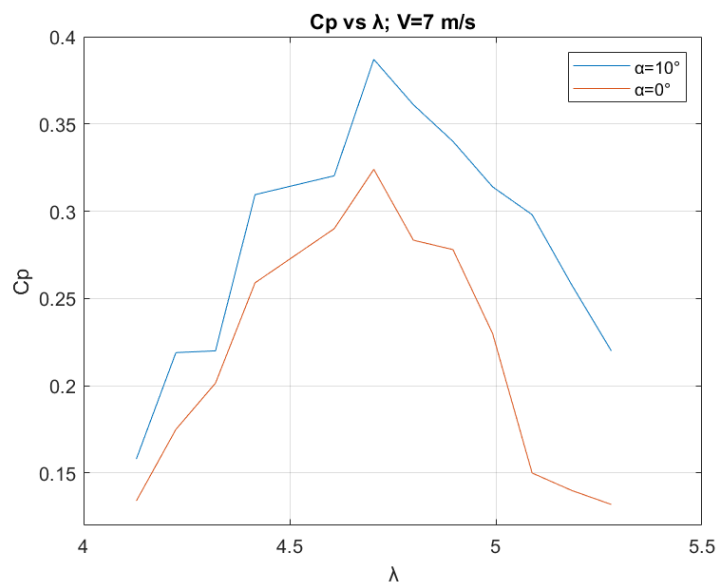
C_p vs λ a 4.5 m/s ($AD=1$ y $c=0.0864m$)



Nota. Elaboración propia.

Figura 52.

C_p vs λ a 7 m/s ($AD=1$ y $c=0.0864m$)

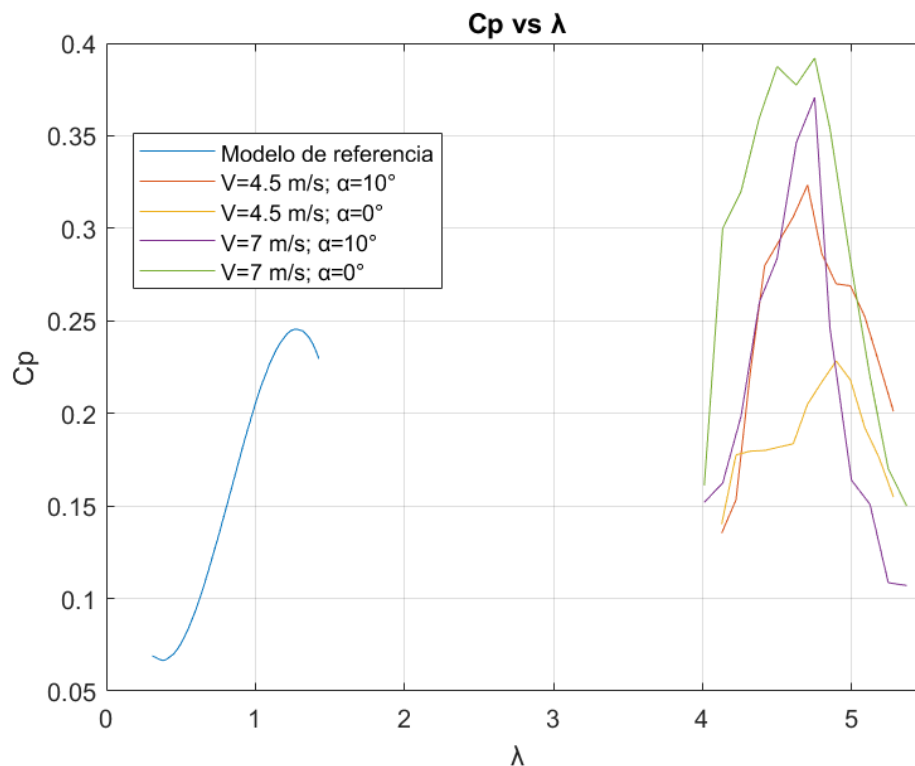


Nota. Elaboración propia.

En este sentido, en la figura 51 el valor máximo de C_p alcanzado es de 0.3234 a un λ de 4.7040 con un ángulo de ataque de 10° y velocidad de 4.5 m/s, mientras que a una velocidad de 7 m/s a igual valor de ángulo de ataque y un λ de 4.8 como se observa en la figura 52, el C_p máximo fue de 0.392 lo que representa un aumento del 21,21%. El valor mínimo de C_p alcanzado es de 0.1401 a un ángulo de ataque de 0° , $\lambda=4.1280$ y 4.5 m/s de velocidad tal como se presenta en la figura 51, mientras que a 7 m/s el valor mínimo es de 0.15 a un ángulo de ataque de 0° y $\lambda=5.28$, esto corresponde a un aumento del 7.06%.

Figura 53.

Comparativo del C_p vs λ entre el modelo de referencia y la optimización ($AD=1$ y $c=0.0864m$)



Nota. Elaboración propia.

Respecto, a la figura 53 que al aumentar la velocidad de viento el C_p aumentó considerablemente y presentó una mejora al modificar los ángulos de ataque en la optimización. De igual manera, se presenta un mejor rendimiento en el desempeño de la turbina respecto al modelo de referencia ya que se presentó un mayor C_p en la mayoría de λ analizados. Sin embargo, existe una diferencia considerable en el desempeño de la turbina a la velocidad de viento crítica.

5. Análisis de Resultados

En el presente capítulo se presentarán las optimizaciones analizadas y se compararán con el modelo de referencia. Posteriormente se analizará la relación AD óptima. En la figura 54 se puede apreciar el comportamiento de las 6 opciones de optimización mencionadas en el capítulo anterior a una velocidad de 4.5 m/s y $\alpha=0^\circ$. Se puede apreciar que la opción 6 es la que presenta mayor valor mínimo de C_p , mientras que las opciones 2 y 5 son las que presentan mejor desempeño a una velocidad de 4.5 m/s con un ángulo de ataque de 0° . En la tabla 34 se puede apreciar el C_p máximo mínimo y promedio de cada opción.

Tabla 34.

C_p promedio de cada opción a $V=4.5$ m/s y $\alpha=0^\circ$

Opción	$C_{p_{max}}$	$C_{p_{min}}$	$C_{p_{prom}}$
AD= 0.25; c=0.117 (Opción 1)	0.1571	0.0874	0.1143
AD= 0.25; c=0.173 (Opción 2)	0.2916	0.1219	0.223136364
AD= 0.4; c=0.0929 (Opción 3)	0.3025	0.0724	0.157345833
AD= 0.4; c=0.137 (Opción 4)	0.2731	0.0916	0.172558333
AD= 1; c=0.0589 (Opción 5)	0.3054	0.1	0.1974

AD= 1; $c=0.0864$
(Opción 6)

0.2283

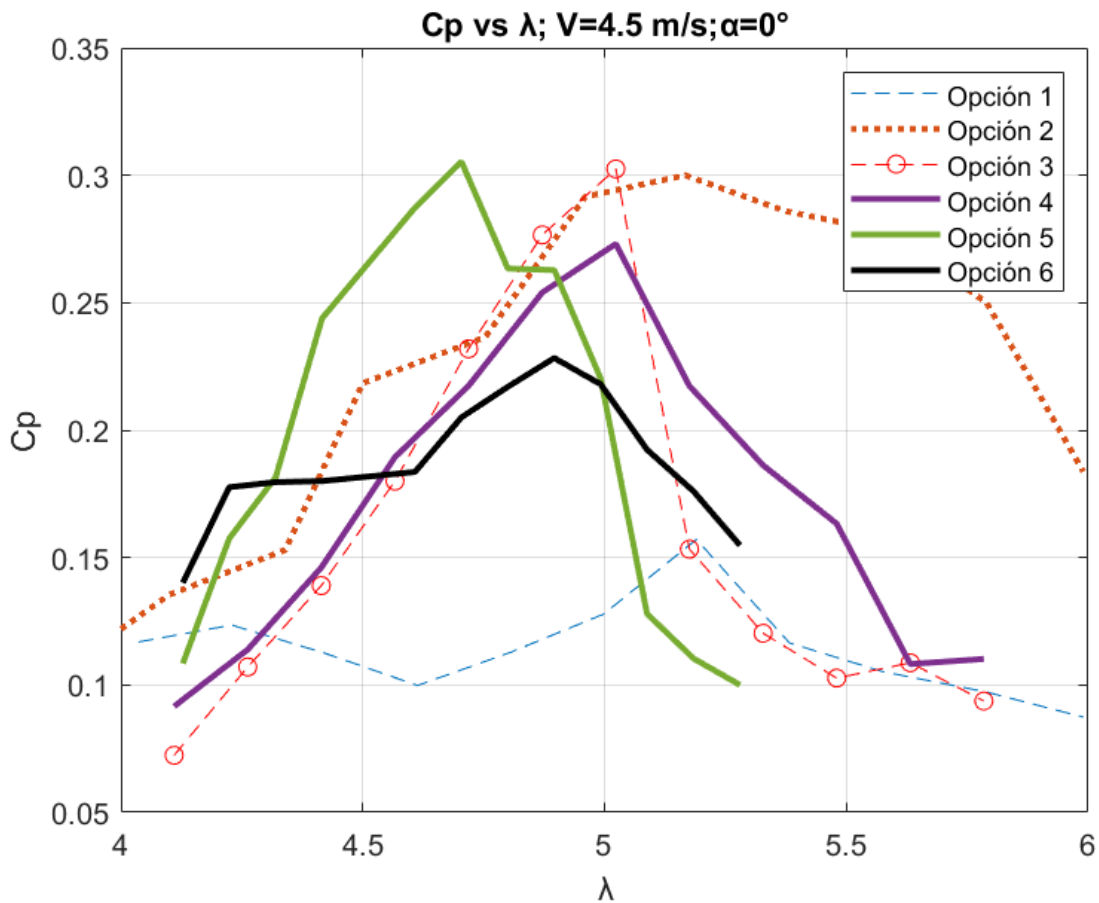
0.1401

0.187691667

Nota. Elaboración propia.

Figura 54.

Comparativo de las opciones a $V=4.5$ m/s y $\alpha=0^\circ$



Nota. Elaboración propia.

Se puede apreciar que el mayor $C_{p_{prom}}$ lo presenta la opción 2 con un valor de 0.22, mientras que el menor promedio es de la opción 1 con un valor de 0.11. También se puede apreciar que la opción 5 presenta el mayor C_p siendo este 0.3054 mientras que la opción 1 obtiene el menor C_p siendo 0.0874

En la figura 55 se puede apreciar el comportamiento de las seis opciones de optimización mencionadas en el capítulo anterior a una velocidad de 4.5 m/s y $\alpha=10^\circ$. Se puede apreciar que la opción 2 es la que presenta mayor valor mínimo de C_p , mientras que la opción 5 es la que presenta mejor desempeño a una velocidad de 4.5 m/s con un ángulo de ataque de 10° . En la tabla 35 se puede apreciar el C_p máximo mínimo y promedio de cada opción.

Tabla 35.

C_p promedio de cada opción a V=4.5 m/s y $\alpha=10^\circ$

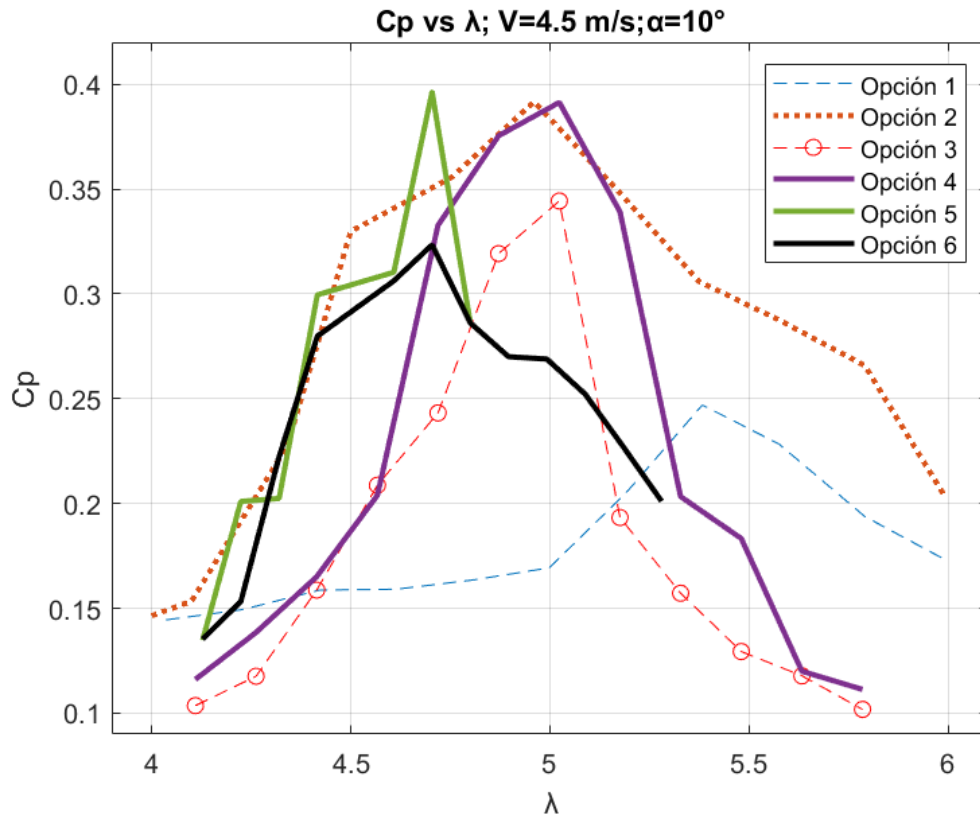
Opción	$C_{p_{max}}$	$C_{p_{min}}$	$C_{p_{prom}}$
AD= 0.25; c=0.117 (Opción 1)	0.24695	0.1494	0.181086364
AD= 0.25; c=0.173 (Opción 2)	0.3916	0.1534	0.274236364
AD= 0.4; c=0.0929 (Opción 3)	0.3443	0.1018	0.1829
AD= 0.4; c=0.137 (Opción 4)	0.3913	0.1113	0.223333333
AD= 1; c=0.0589 (Opción 5)	0.3963	0.201	0.254133333
AD= 1; c=0.0864 (Opción 6)	0.3234	0.1533	0.2438

Nota. Elaboración propia.

Se puede apreciar que el mayor $C_{p_{prom}}$ lo presenta la opción 2 con un valor de 0.27, mientras que el menor promedio es de la opción 1 con un valor de 0.18. También se puede apreciar que la opción 5 presenta el mayor C_p siendo este 0.3963 mientras que la opción 3 obtiene el menor C_p siendo 0.1018.

Figura 55.

Comparativo de las opciones a V=4.5 m/s y $\alpha=10^\circ$

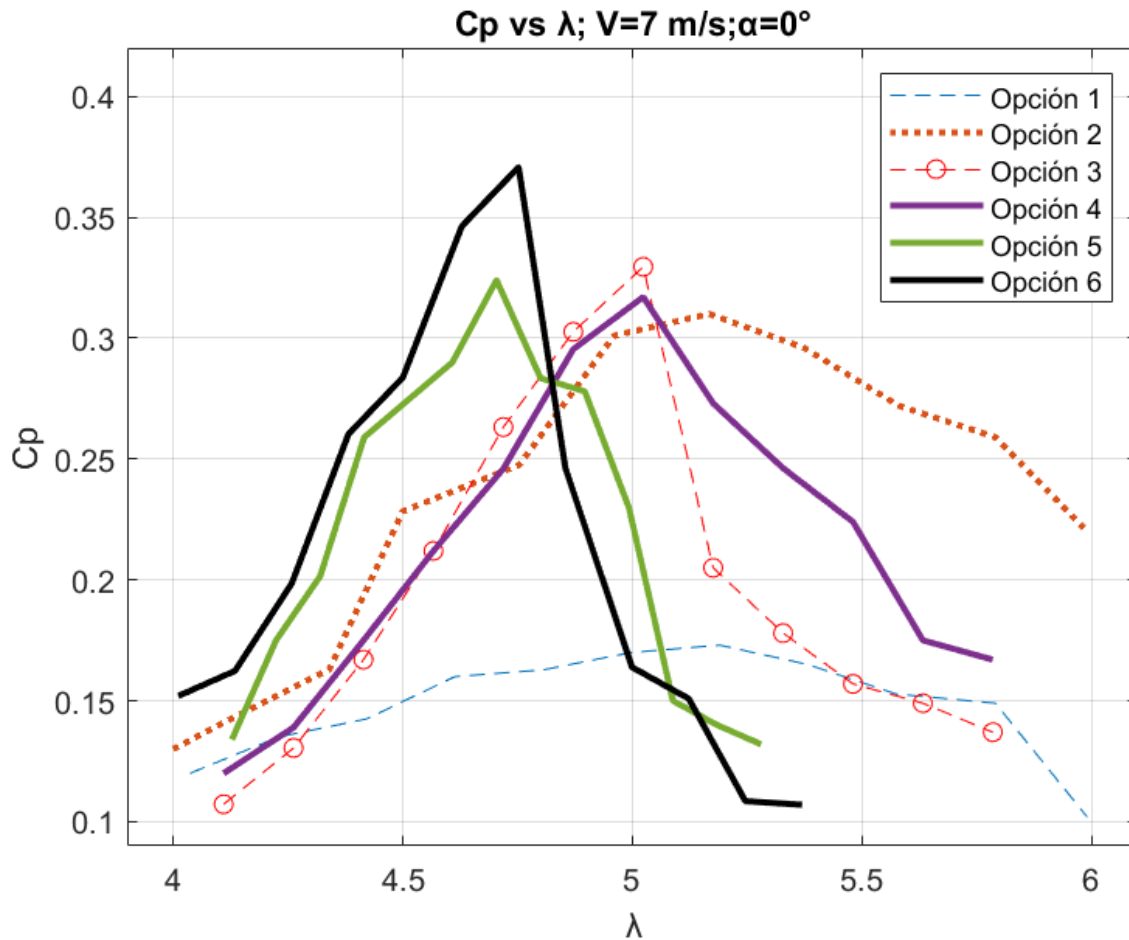


Nota. Elaboración propia.

En la figura 56 se puede apreciar el comportamiento de las 6 opciones de optimización mencionadas en el capítulo anterior a una velocidad de 7 m/s y $\alpha=0^\circ$. Se puede apreciar que la opción 5 es la que presenta mayor valor mínimo de Cp, mientras que la opción 6 es la que presenta mejor desempeño a una velocidad de 7 m/s con un ángulo de ataque de 0° . En la tabla 36 se puede apreciar el Cp máximo mínimo y promedio de cada opción.

Figura 56.

Comparativo de las opciones a V=7 m/s y $\alpha=0^\circ$



Nota. Elaboración propia.

Tabla 36.

Cp promedio de cada opción a V=7 m/s y $\alpha=0^\circ$

Opción	$C_{p_{max}}$	$C_{p_{min}}$	$C_{p_{prom}}$
AD= 0.25; c=0.117 (Opción 1)	0.173	0.101874	0.181086364
AD= 0.25; c=0.173 (Opción 2)	0.31	0.13	0.274236364
AD= 0.4; c=0.0929 (Opción 3)	0.3295	0.10724	0.1829
AD= 0.4; c=0.137 (Opción 4)	0.317	0.12	0.223333333
AD= 1; c=0.0589 (Opción 5)	0.324	0.132	0.254133333

AD= 1; c=0.0864 (Opción 6)	0.3707	0.107	0.2438
-------------------------------	--------	-------	--------

Nota. Elaboración propia.

Se puede apreciar que el mayor $C_{p_{prom}}$ lo presenta la opción 2 con un valor de 0.27, mientras que el menor promedio es de la opción 1 con un valor de 0.18. También se puede apreciar que la opción 6 presenta el mayor C_p siendo este 0.3707 mientras que la opción 1 obtiene el menor C_p siendo 0.1018.

En la figura 57 se describe el comportamiento de las 6 opciones de optimización mencionadas en el capítulo anterior a una velocidad de 7 m/s y $\alpha=10^\circ$. Se puede apreciar que la opción 2 es la que presenta mayor valor mínimo de C_p y mejor desempeño a una velocidad de 7 m/s con un ángulo de ataque de 10° . En la tabla 37 está el C_p máximo mínimo y promedio de cada opción.

Tabla 37.

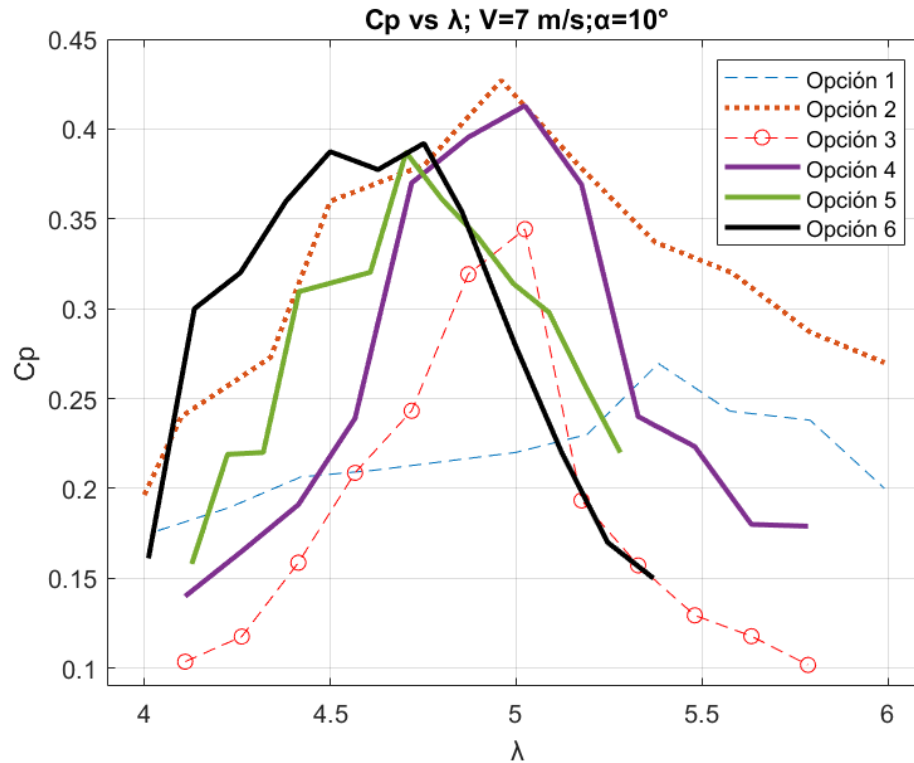
Cp promedio de cada opción a $V=7$ m/s y $\alpha=10^\circ$

Opción	$C_{p_{max}}$	$C_{p_{min}}$	$C_{p_{prom}}$
AD= 0.25; c=0.117 (Opción 1)	0.2695	0.1765	0.21798182
AD= 0.25; c=0.173 (Opción 2)	0.427	0.1964	0.31547273
AD= 0.4; c=0.0929 (Opción 3)	0.3443	0.1018	0.1829
AD= 0.4; c=0.137 (Opción 4)	0.413	0.14	0.25873333
AD= 1; c=0.0589 (Opción 5)	0.387	0.158	0.28371667
AD= 1; c=0.0864 (Opción 6)	0.392	0.15	0.28924167

Nota. Elaboración propia.

Figura 57.

Comparativo de las opciones a $V=7$ m/s y $\alpha=10^\circ$



Nota. Elaboración propia.

Se puede apreciar que el mayor $C_{p_{prom}}$ lo presenta la opción 2 con un valor de 0.31, mientras que el menor promedio es de la opción 3 con un valor de 0.18. También se puede apreciar que la opción 2 presenta el mayor C_p siendo este 0.427 mientras que la opción 3 obtiene el menor C_p siendo 0.1018.

Al realizar un comparativo entre las opciones analizadas, se observa que la opción 2 ($AD= 0.25$; $c=0.173$) es la más eficiente para la región de interés debido a que a con una velocidad de viento crítica (4.5 m/s) presenta mejor desempeño que las demás opciones,

adicionalmente, al aumentar la velocidad hasta la máxima encontrada en el Cañón del Chicamocha (7 m/s) sigue presentando un buen comportamiento tanto a 0° como a 10° .

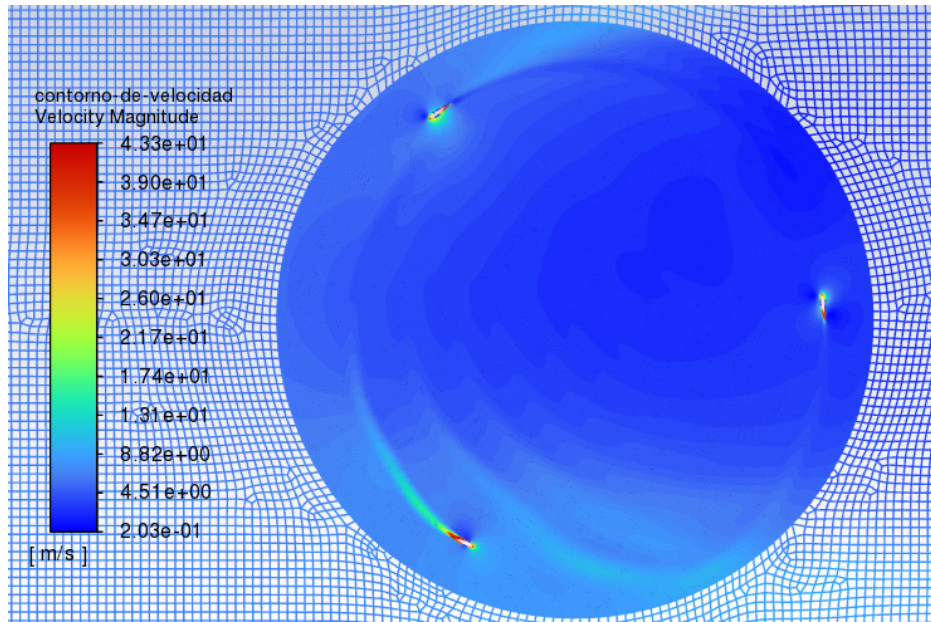
5.1. Contornos de velocidad de la opción 2 (AD=0.25; c=0.173)

En esta sección se presentan los contornos de velocidad de la simulación realizada con una escala de colores de 100 niveles donde se puede apreciar las zonas donde se tiene más o menos velocidad, es importante resaltar que, a mayor velocidad, mayor potencia eólica se va a adquirir, por tal motivo la menor velocidad la presentará $V=4.5$ m/s con $\alpha=0^\circ$, mientras que la mayor velocidad se dará en $V=7$ m/s y $\alpha=10^\circ$. En las figuras 58 a 65 se pueden apreciar los contornos de velocidad presentados.

En la figura 58 se observa que cada álabe deja una estela con una velocidad entre 4.5 m/s y 17.4 m/s, la cual influye directamente en el ataque del siguiente álabe. Adicionalmente, las mayores velocidades se presentan en el borde de entrada y salida de cada perfil como se aprecia en la figura 59.

Figura 58.

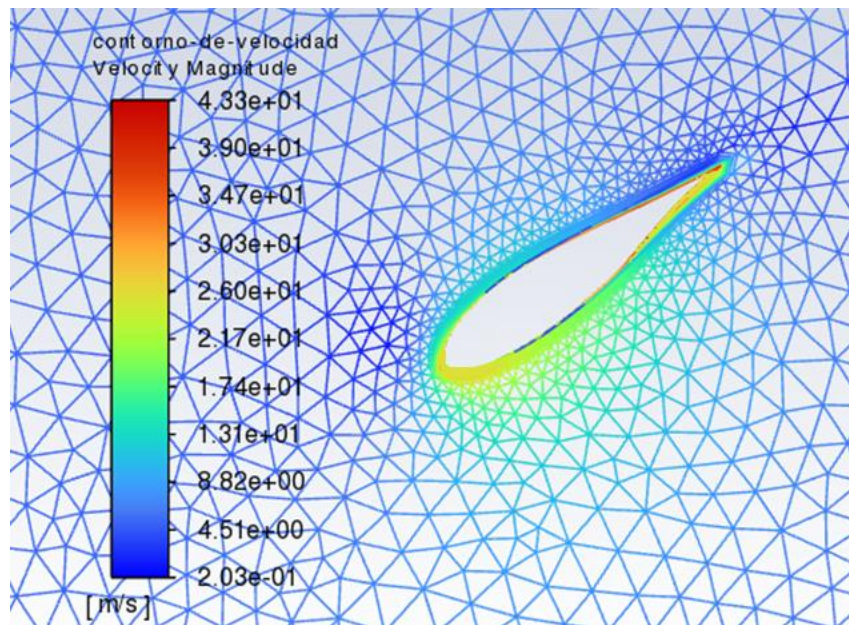
Contorno de velocidad de la optimización elegida $V=4.5$ m/s; $\alpha=0^\circ$



Nota. Elaboración propia.

Figura 59.

Contorno de velocidad en el álabo $V=4.5$ m/s; $\alpha=0^\circ$

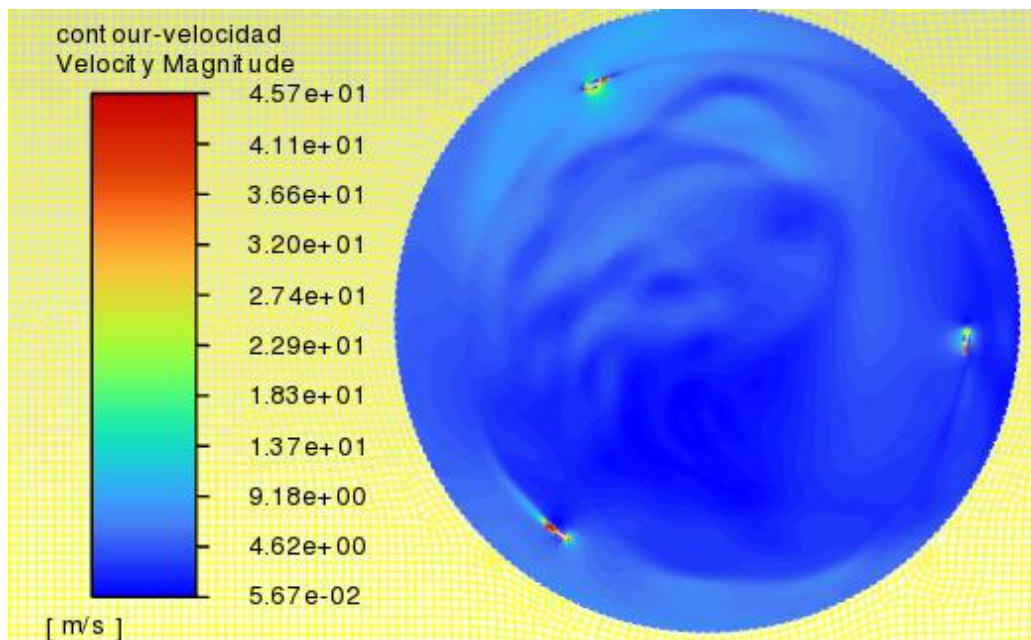


Nota. Elaboración propia.

En la figura 60 se observa que cada álabe deja una estela con una velocidad entre 4.62 m/s y 13.7 m/s, la cual influye directamente en el ataque del siguiente álabe. Adicionalmente, las mayores velocidades se presentan en el borde de ataque y salida de cada perfil como se aprecia en la figura 61 donde se alcanzan velocidades de 45.7 m/s, mientras que en el intradós y extradós se alcanzan velocidades entre 18.2 m/s y 32 m/s.

Figura 60.

Contorno de velocidad de la optimización elegida $V=4.5$ m/s; $\alpha=10^\circ$

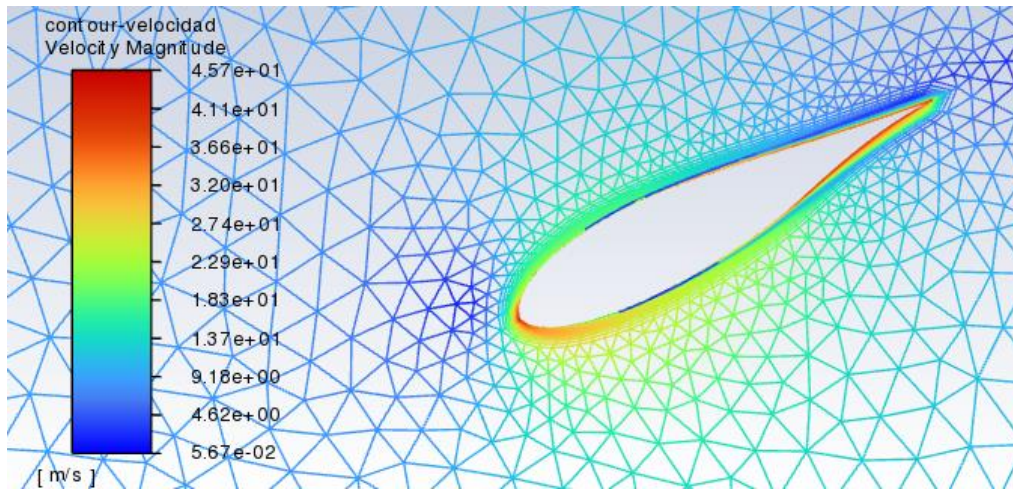


Nota. Elaboración propia.

En la figura 62 se observa que cada álabe deja una estela con una velocidad de alrededor de 5.64 m/s, la cual influye directamente en el ataque del siguiente álabe. Adicionalmente, las mayores velocidades se presentan en el borde de ataque y salida de cada perfil como se aprecia en la figura 63 donde se alcanzan velocidades entre 11.2 m/s y 27.8 m/s en el intradós y extradós.

Figura 61.

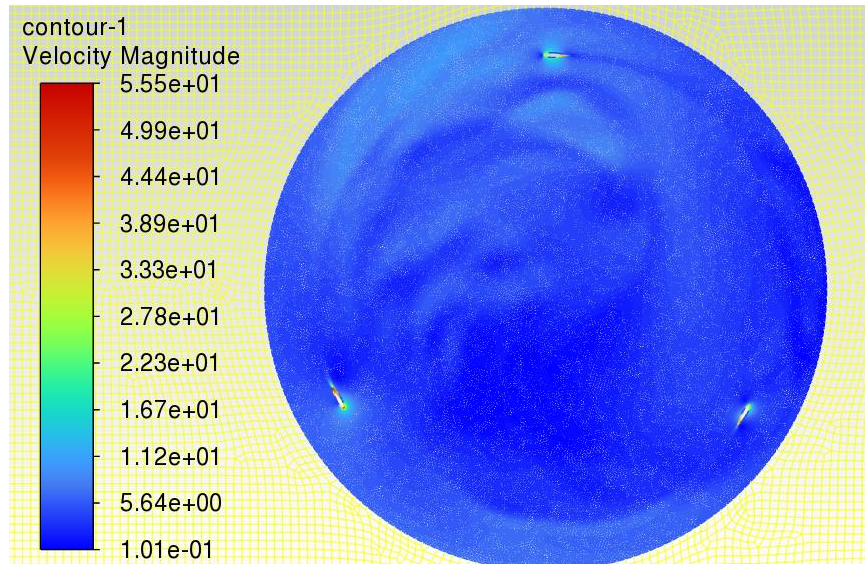
Contorno de velocidad en el álabo $V=4.5 \text{ m/s}$; $\alpha=10^\circ$



Nota. Elaboración propia.

Figura 62.

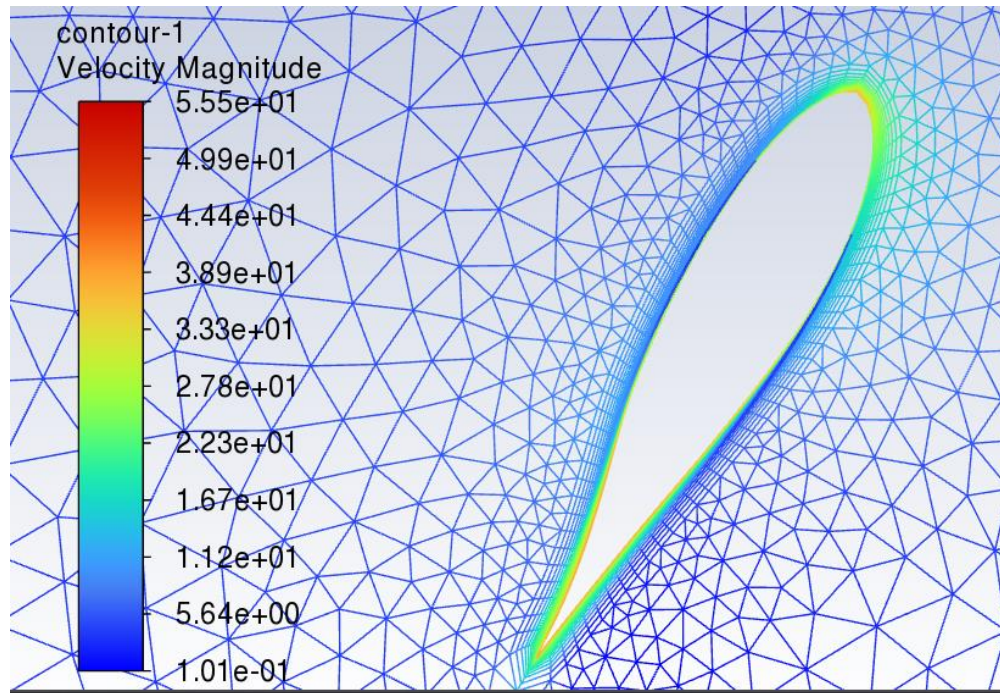
Contorno de velocidad de la optimización elegida $V=7 \text{ m/s}$; $\alpha=0^\circ$



Nota. Elaboración propia.

Figura 63.

Contorno de velocidad en el álabo $V=7 \text{ m/s}$; $\alpha=0^\circ$

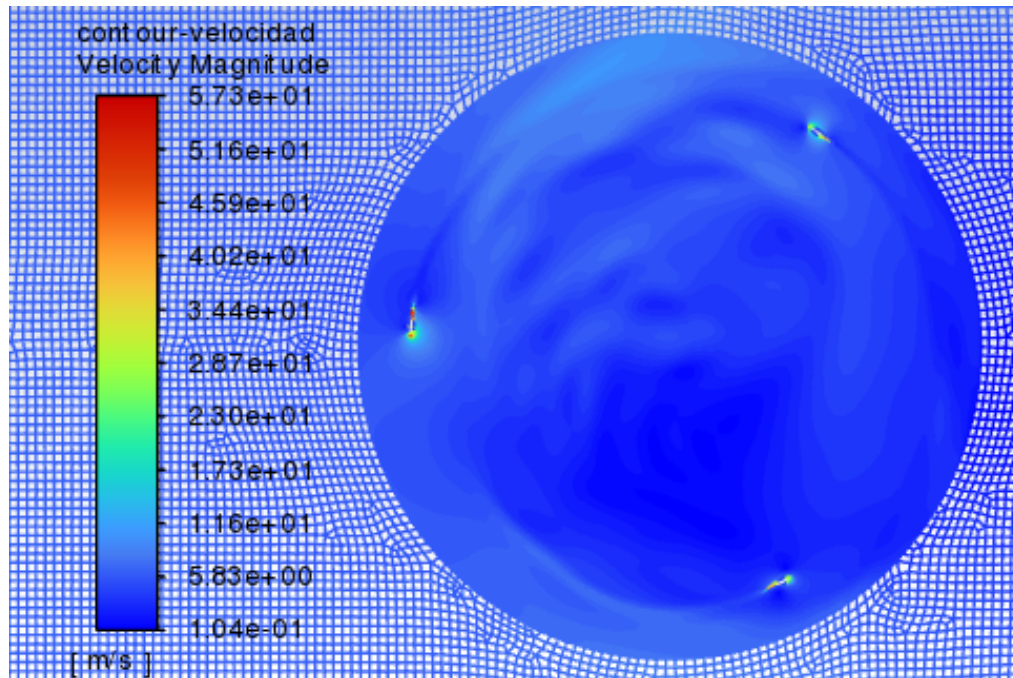


Nota. Elaboración propia.

En la figura 64 se observa que cada ábabe deja una estela con una velocidad entre 5.83 m/s y 11.6 m/s, la cual influye directamente en el ataque del siguiente ábabe. Adicionalmente, las mayores velocidades se presentan en el borde de ataque, salida e intradós de cada perfil como se aprecia en la figura 65 donde se alcanzan velocidades entre 11.2 m/s y 27.8 m/s.

Figura 64.

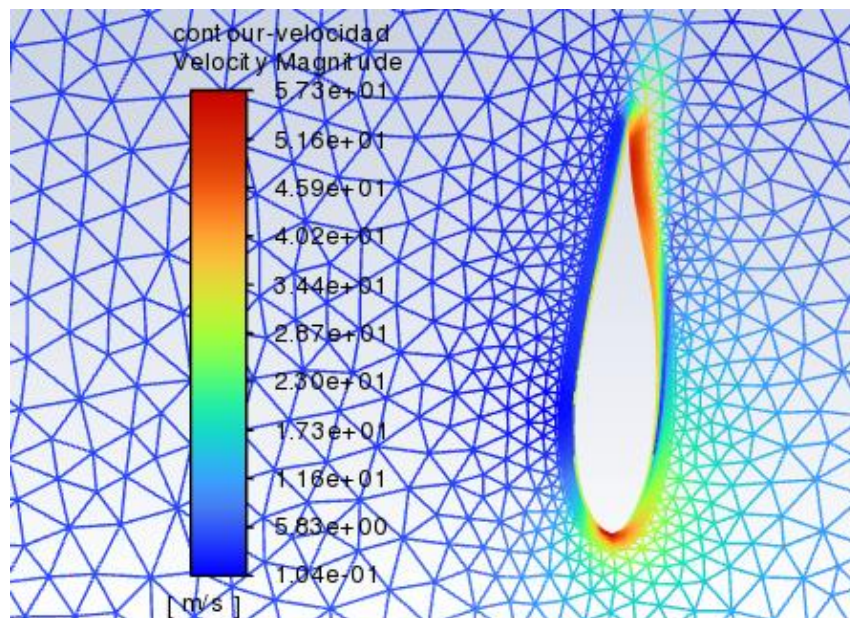
Contorno de velocidad de la optimización elegida $V=7$ m/s; $\alpha=10^\circ$



Nota. Elaboración propia.

Figura 65.

Contorno de velocidad en el álabe $V=7$ m/s; $\alpha=10^\circ$



Nota. Elaboración propia.

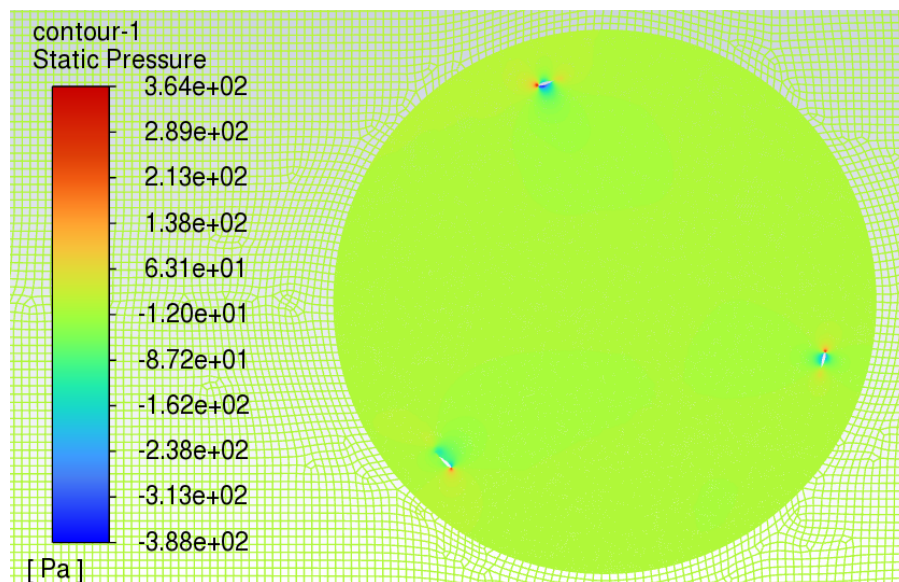
5.2. Contornos de presión de la opción 2 ($AD=0.25$; $c=0.173$)

En esta sección se presentan los contornos de presión de la simulación realizada con una escala de colores de 100 niveles donde se puede apreciar las zonas donde se tiene más o menos presión, es importante resaltar que, si no se presenta una despresurización en los álabes, mayor potencia eólica se va a presentar, por tal motivo la menor presión la presentará $V=4.5$ m/s con $\alpha=0^\circ$, mientras que la mayor presión se dará en $V=7$ m/s y $\alpha=10^\circ$. En las figuras 66 a 69 se pueden apreciar los contornos de velocidad presentados.

Se puede apreciar que el comportamiento en las cuatro figuras es muy similar, donde la presión máxima comienza en 364 Pa como se puede apreciar en la figura 66 y termina en 1210 Pa en la figura 69.

Figura 66.

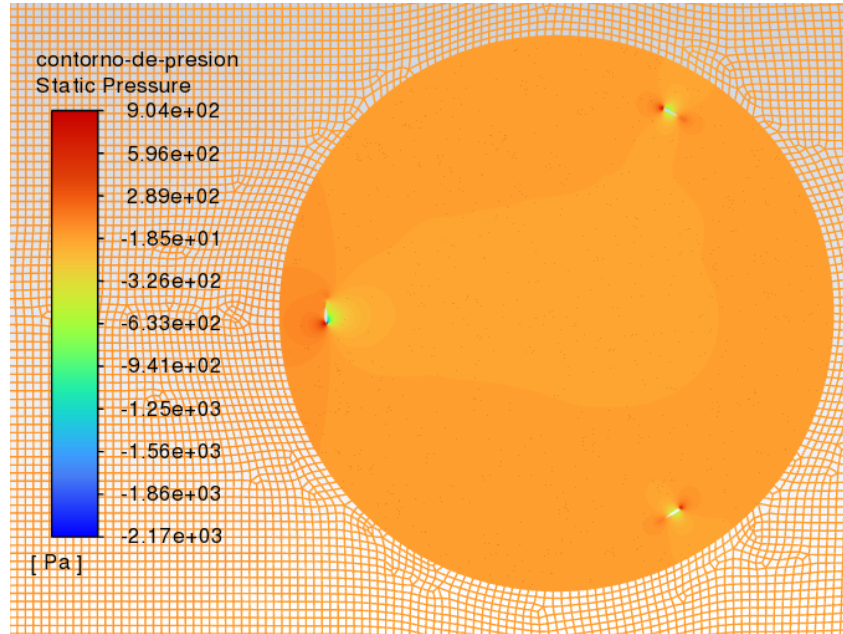
Contorno de presión de la optimización elegida $V=4.5$ m/s; $\alpha=0^\circ$



Nota. Elaboración propia.

Figura 67.

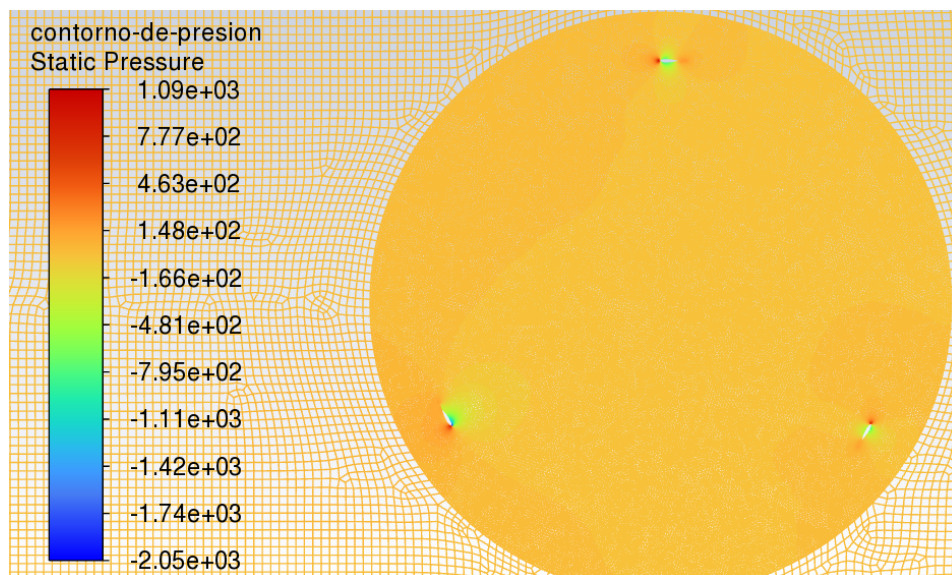
Contorno de presión de la optimización elegida $V=4.5$ m/s; $\alpha=10^\circ$



Nota. Elaboración propia.

Figura 68.

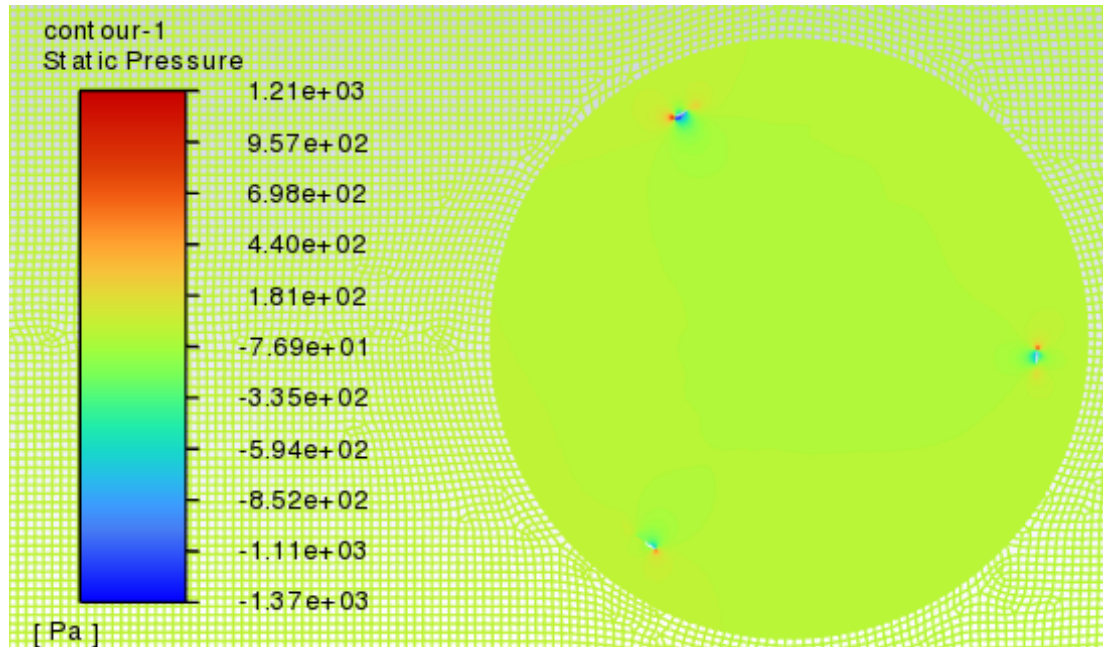
Contorno de presión de la optimización elegida $V=7$ m/s; $\alpha=0^\circ$



Nota. Elaboración propia.

Figura 69.

Contorno de presión de la optimización elegida $V=7$ m/s; $\alpha=10^\circ$



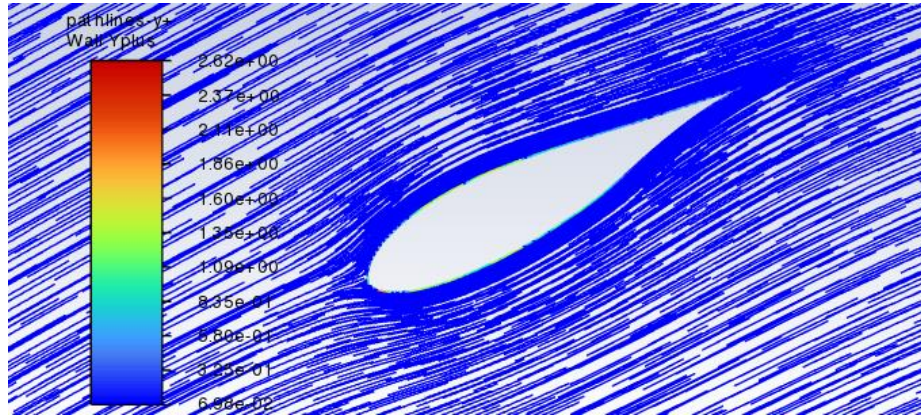
Nota. Elaboración propia.

5.3. Análisis de y^+ de la opción 2 (AD=0.25; c=0.173)

En esta sección se presentan las líneas de ruta del y^+ de la simulación realizada con una escala de colores de 100 niveles donde se puede apreciar el valor del y^+ en cada zona, es importante resaltar que para lograr capturar correctamente el desprendimiento de la capa límite el valor del y^+ debe ser inferior a 5. En las figuras 70 y 71 se puede apreciar que el máximo valor de y^+ encontrado a las velocidades de 4.5 m/s y 7 m/s es de 2.62 y 2.91 respectivamente con lo que se puede concluir que el análisis realizado logra capturar de forma eficiente el desprendimiento de la capa límite.

Figura 70.

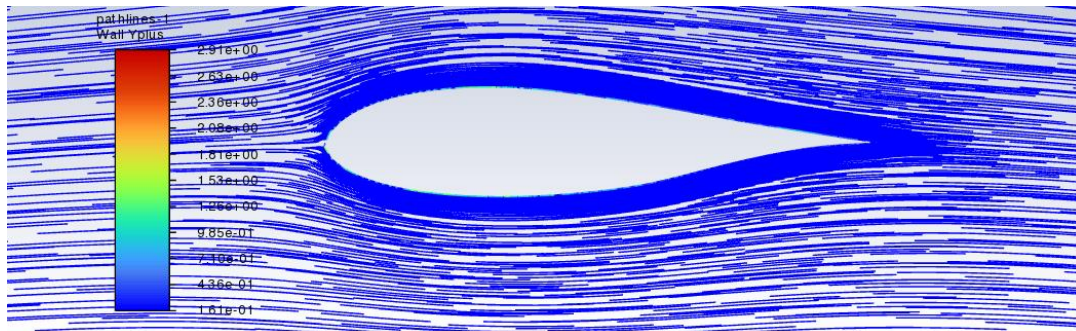
Línea de ruta de la optimización elegida $V=4.5$ m/s



Nota. Elaboración propia.

Figura 71.

Línea de ruta de la optimización elegida $V=7$ m/s



Nota. Elaboración propia.

6. Conclusiones

El proceso de optimización arrojó seis configuraciones prometedoras que no solo cumplen con los requisitos funcionales y de eficiencia especificados, sino que también cuentan con una precisión de validación, con una tasa de error consistentemente inferior al 1 %. Esto

otorga una alta credibilidad a la confiabilidad y precisión del algoritmo de optimización, solidificando su alineación con la literatura establecida.

Además, el enfoque de utilizar elementos triangulares en la zona de rotación y elementos rectangulares en la zona fija para crear una malla compuesta por 889.968 elementos resultó eficaz. El valor y^+ resultante de 0,76 dentro del análisis de la capa límite mostró la confiabilidad de la malla. A pesar de un error promedio menor del 15%, los valores de calidad de la malla se mantuvieron por debajo de los umbrales recomendados en la literatura.

La opción número dos ($AD=0,25$ y $c=0,173$) demostró un mejor rendimiento entre las configuraciones consideradas. Alcanzó un coeficiente de potencia máxima C_{pprom} de 0,31, alcanzando valores máximos de hasta 0,42. Este nivel de desempeño se alinea de manera óptima con las características específicas del Cañón del Chicamocha. Se presentó una mejora del 72,2% respecto al modelo de referencia (Nawfal M. et al., 2019), el cual tiene un C_{pprom} de 0.18.

7. Recomendaciones

A la optimización final se le recomienda realizarle un análisis estructural y de materiales para una futura construcción de un prototipo debido a que el componente aerodinámico ya fue analizado en la presente investigación.

Una vez se desarrolle el prototipo se debe realizar una comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos en el presente trabajo para finalmente realizar el diseño del sistema de transmisión de potencia y que pueda ser utilizado en las regiones de interés del departamento de Santander.

Referencias Bibliográficas

- Airfoil Tools. (s/f). *DU 06-W-200 VAWT airfoil (du06-w-200-dt)*. Recuperado el 7 de julio de 2023, de <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=du06-w-200-dt>
- Alexander, A. S., & Santhanakrishnan, A. (2020). Mechanisms of power augmentation in two side-by-side vertical axis wind turbines. *Renewable Energy*, *148*, 600–610.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.149>
- Ansys Inc. (2013). *ANSYS Fluent User's Guide* (p. 2620).
- Antar, E., & Elkhoury, M. (2020). Casing optimization of a Savonius wind turbine. *Energy Reports*, *6*, 184–189. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.040>
- Balduzzi, F., Bianchini, A., Maleci, R., Ferrara, G., & Ferrari, L. (2016). Critical issues in the CFD simulation of Darrieus wind turbines. *Renewable Energy*, *85*, 419–435.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.048>
- Battisti, L., Persico, G., Dossena, V., Paradiso, B., Raciti Castelli, M., Brighenti, A., & Benini, E. (2018). Experimental benchmark data for H-shaped and troposkien VAWT architectures. *Renewable Energy*, *125*, 425–444. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.098>
- Bausas, M. D., & Danao, L. A. M. (2015). The aerodynamics of a camber-bladed vertical axis wind turbine in unsteady wind. *Energy*, *93*, 1155–1164.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.120>
- Bianchini, A., Ferrara, G., & Ferrari, L. (2015). Design guidelines for H-Darrieus wind turbines: Optimization of the annual energy yield. *Energy Conversion and Management*, *89*, 690–

707. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.038>

Brusca, S., Lanzafame, R., & Messina, M. (2014). Design of a vertical-axis wind turbine: how the aspect ratio affects the turbine's performance. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5(4), 333–340. <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0129-x>

Claessens, M. C. (2006). *The design and testing of airfoils for application in small vertical axis wind turbines*. Delft University of Technology.

Damak, A., Driss, Z., & Abid, M. S. (2013). Experimental investigation of helical Savonius rotor with a twist of 180°. *Renewable Energy*, 52, 136–142.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.043>

Edwards, J. (2012). *The Influence of Aerodynamic Stall on the Performance of Vertical Axis Wind Turbines* (Número August) [The University of Sheffie].
<http://theses.whiterose.ac.uk/2722/>

Eltayesh, A., Castellani, F., Burlando, M., Bassily Hanna, M., Huzayyin, A. S., El-Batsh, H. M., & Becchetti, M. (2021). Experimental and numerical investigation of the effect of blade number on the aerodynamic performance of a small-scale horizontal axis wind turbine. *Alexandria Engineering Journal*, 60(4), 3931–3944.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.02.048>

Fernandez Oro, J. M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica computacional de fluidos (CFD) por medio del método de volúmenes finitos*. Editorial Reverte.

- Franchina, N., Persico, G., & Savini, M. (2019). 2D-3D Computations of a Vertical Axis Wind Turbine Flow Field: Modeling Issues and Physical Interpretations. *Renewable Energy*, *136*, 1170–1189. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.086>
- Garcia Rodriguez, L. F., Jaramillo, J. E., & Chacon Velasco, J. L. (2019). Chicamocha canyon wind energy potential and VAWT airfoil selection through CFD modeling. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, *94*, 56–66. <https://doi.org/10.17533/10.17533/udea.redin.20190512>
- Garcia Rodriguez, L. F., Rosero Ariza, J. D., Chacón Velazco, J. L., & Jaramillo Ibarra, J. (2021). Vertical Axis Wind Turbine Design and Installation at Chicamocha Canyon. En *Entropy and Exergy in Renewable Energy*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99374>
- Hansen, J. T., Mahak, M., & Tzanakis, I. (2021). Numerical modelling and optimization of vertical axis wind turbine pairs: A scale up approach. *Renewable Energy*, *171*, 1371–1381. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.001>
- Hashem, I., & Mohamed, M. H. (2018). Aerodynamic performance enhancements of H-rotor Darrieus wind turbine. En *Energy* (Vol. 142, pp. 531–545). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.036>
- He, J., Jin, X., Xie, S., Cao, L., Wang, Y., Lin, Y., & Wang, N. (2020). CFD modeling of varying complexity for aerodynamic analysis of H-vertical axis wind turbines. *Renewable Energy*, *145*, 2658–2670. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.132>
- He, Y., Zhang, M., Li, W., Su, J., Kase, K., Yu, C. W., & Gu, Z. (2019). Feasibility of a new helical blade structure for a PV integrated wind turbine in a heat-driven swirling wind field.

Energy, 185, 585–598. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.029>

Hepbasli, A., & Alsuhaibani, Z. (2011). Exergetic and exergoeconomic aspects of wind energy systems in achieving sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2810–2825. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.031>

Islam, M., Ting, D. S. K., & Fartaj, A. (2008). Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 1087–1109. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.023>

Lanzafame, R., Mauro, S., & Messina, M. (2014). 2D CFD modeling of H-Darrieus Wind Turbines using a transition turbulence model. *Energy Procedia*, 45, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.015>

Le, T. Q., Lee, K. S., Park, J. S., & Ko, J. H. (2014). Flow-driven rotor simulation of vertical axis tidal turbines: A comparison of helical and straight blades. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(2), 257–268. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0177>

Li, Y., Yang, S., Feng, F., & Tagawa, K. (2023). A review on numerical simulation based on CFD technology of aerodynamic characteristics of straight-bladed vertical axis wind turbines. *Energy Reports*, 9, 4360–4379. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.03.082>

M. Shamsuddin, M. S., & Kamaruddin, N. M. (2023). Experimental study on the characterization of the self-starting capability of a single and double-stage Savonius turbine. *Results in Engineering*, 17(December 2022), 100854. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100854>

- Maldar, N. R., Ng, C. Y., & Oguz, E. (2020). A review of the optimization studies for Savonius turbine considering hydrokinetic applications. *Energy Conversion and Management*, 226(July). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113495>
- Marinić-Kragić, I., Vučina, D., & Milas, Z. (2018). Numerical workflow for 3D shape optimization and synthesis of vertical-axis wind turbines for specified operating regimes. *Renewable Energy*, 115, 113–127. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.030>
- Meana-Fernández, A., Solís-Gallego, I., Fernández Oro, J. M., Argüelles Díaz, K. M., & Velarde-Suárez, S. (2018). Parametrical evaluation of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines for the proposal of optimized designs. *Energy*, 147, 504–517. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.062>
- Meneses-Prado, L. P., Díaz-Pinilla, L. I., & González, G. (2018). Dinámica de fluidos computacional en el análisis de intercambiadores de calor de coraza y tubos. *Revista UIS Ingenierías*, 18(2), 237–244. <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n2-2019022>
- Mohamed, M. H. (2013). Impacts of solidity and hybrid system in small wind turbines performance. *Energy*, 57, 495–504. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.004>
- Mohotti, D., Wijesooriya, K., & Weckert, S. (2022). A simplified approach to modelling blasts in computational fluid dynamics (CFD). *Defence Technology*, 23, 19–34. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.11.006>
- Nawfal M., A., Aljabair, S., & Abdul, H. (2019). An Experimental and Numerical Investigation on Darrieus Vertical Axis Wind Turbine Types at Low Wind Speed. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, 19(December 2019), 97–110.

- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- Ostos, I., Ruiz, I., Gajic, M., Gómez, W., Bonilla, A., & Collazos, C. (2019). A modified novel blade configuration proposal for a more efficient VAWT using CFD tools. *Energy Conversion and Management*, 180(August 2018), 733–746. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.025>
- Paraschivoiu, I. (2002). *Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept*. Presses Internationales Polytechnique.
- Pope, K., Dincer, I., & Naterer, G. F. (2010). Energy and exergy efficiency comparison of horizontal and vertical axis wind turbines. *Renewable Energy*, 35(9), 2102–2113. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.02.013>
- Posa, A. (2020). Influence of Tip Speed Ratio on wake features of a Vertical Axis Wind Turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 197(April 2019), 104076. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.104076>
- Roda-Casanova, V., & Sanchez-Marin, F. (2021). A simple procedure for generating locally refined 2D quadrilateral finite element meshes of gears. *Mechanism and Machine Theory*, 157, 104185. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104185>
- Rosero Ariza, J. D., Chacón Velasco, J. L., & Gonzales Silva, G. (2022). *Optimización paramétrica de una turbina eólica de eje vertical de álabes rectos para el Cañón del Chicamocha*. <https://doi.org/10.5944/BICIM2022.006>

- Roy, S., & Saha, U. K. (2013). Computational study to assess the influence of overlap ratio on static torque characteristics of a vertical axis wind turbine. *Procedia Engineering*, 51, 694–702. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.099>
- Samadi, M., Ghodsi Hassanabad, M., & Mozafari, S. B. (2022). Performance enhancement of low speed current savonius tidal turbines through adding semi-cylindrical deflectors. *Ocean Engineering*, 259(May), 111873. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111873>
- Satrio, D., & Utama, I. K. A. P. (2021). Experimental investigation into the improvement of self-starting capability of vertical-axis tidal current turbine. *Energy Reports*, 7, 4587–4594. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.027>
- Shukla, V., & Kaviti, A. K. (2017). Performance evaluation of profile modifications on straight-bladed vertical axis wind turbine by energy and Spalart Allmaras models. *Energy*, 126, 766–795. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.071>
- Tjiu, W., Marnoto, T., Mat, S., Ruslan, M. H., & Sopian, K. (2015). Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations. *Renewable Energy*, 75, 50–67. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.038>
- Toudarbari, S., Maghrebi, M. J., & Hashemzadeh, A. (2021). Evaluation of Darrieus wind turbine for different highway settings using CFD simulation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45(February), 101077. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101077>
- Wang, Z., Wang, Y., & Zhuang, M. (2018). Improvement of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines with leading-edge serrations and helical blades using CFD and

Taguchi method. *Energy Conversion and Management*, 177(May), 107–121.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.028>

Wilcox, D. C. (2006). Turbulence Modelling for CFD 3rd Edftion. En *Turbulence Modeling for CFD*. <http://www.dewindustries.com>

Wong, K. H., Chong, W. T., Poh, S. C., Shiah, Y. C., Sukiman, N. L., & Wang, C. T. (2018). 3D CFD simulation and parametric study of a flat plate deflector for vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*, 129, 32–55. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.085>

Yunus A. Çengel y John M. Cimbala. (2006). *Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones*. McGraw-Hill Interamericana.

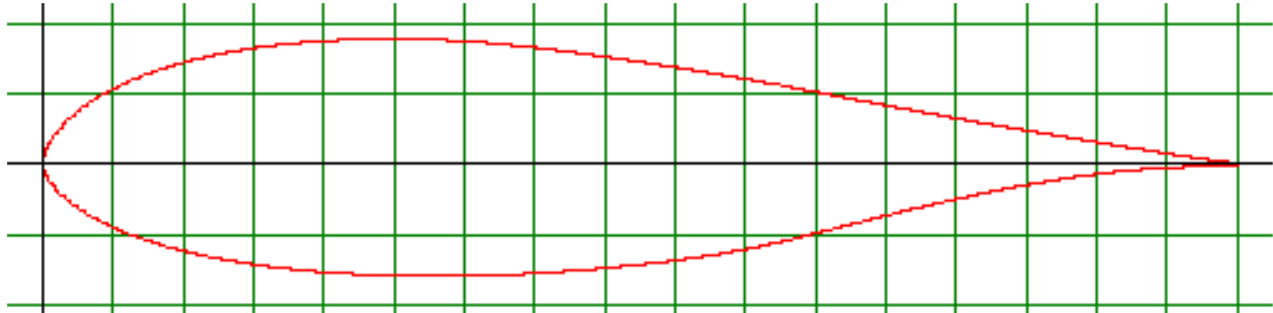
Zanforlin, S., & Letizia, S. (2019). Effects of upstream buildings on the performance of a synergistic roof-and-diffuser augmentation system for cross flow wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 184(December 2018), 329–341. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.11.029>

Zemamou, M., Aggour, M., & Toumi, A. (2017). Review of savonius wind turbine design and performance. *Energy Procedia*, 141, 383–388. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.047>

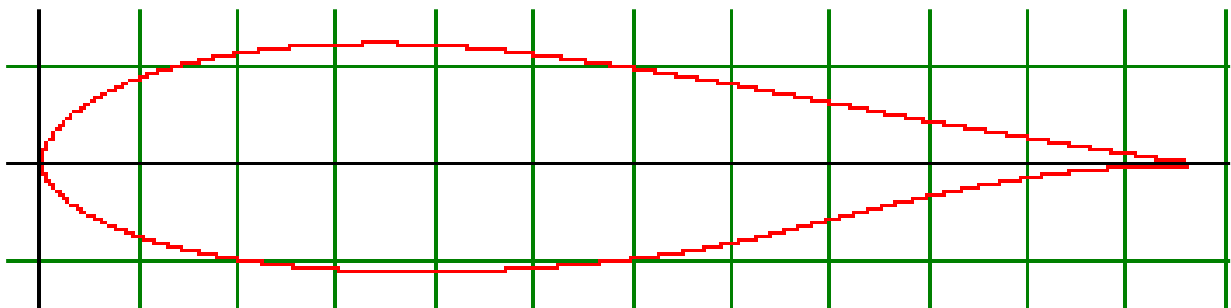
Zouzou, B., Dobrev, I., Massouh, F., & Dizene, R. (2019). Experimental and numerical analysis of a novel Darrieus rotor with variable pitch mechanism at low TSR. *Energy*, 186, 115832. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.162>

APÉNDICES

Apéndice A. Coordenadas de cada propuesta de optimización



Name = DU 06-W-200 VAWT airfoil
Chord = 170mm Radius = 0mm Thickness = 100% Origin = 0% Pitch = 0°



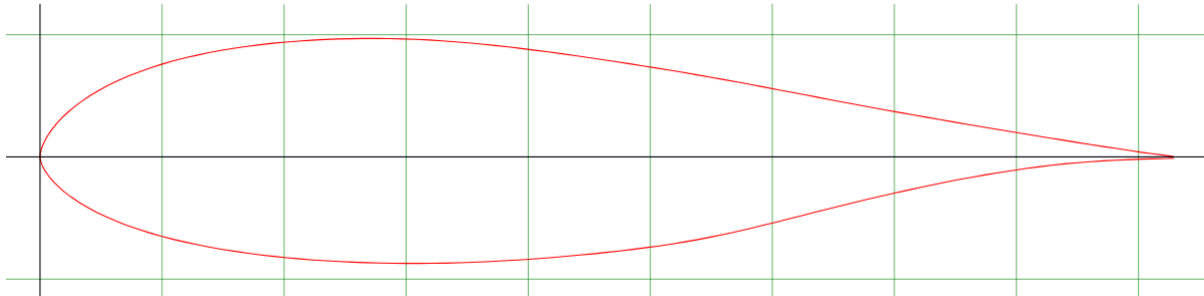
Name = DU 06-W-200 VAWT airfoil
Chord = 117mm Radius = 0mm Thickness = 100% Origin = 0% Pitch = 0°

Name, DU 06-W-200 VAWT airfoil	149.213590	3.192430
Chord (mm), 170	147.169680	3.525970
Radius (mm), 0	145.128490	3.862230
Thickness (%), 100	143.085430	4.201380
Origin (%), 0	141.046620	4.541890
Pitch (deg), 0	139.015800	4.885970
AD=0.25	136.981070	5.235320
	134.945830	5.585690
Airfoil surface,	132.915180	5.939630
X (mm) Y (mm)	130.881130	6.299010
170.005100 0.056100	128.847080	6.660600
169.162070 0.168470	126.821190	7.025590
168.086650 0.304300	124.793090	7.396870
166.743480 0.479570	122.761760	7.771720
165.130180 0.702780	120.738250	8.149120
163.319510 0.964920	118.715250	8.529920
161.391370 1.254600	116.697010	8.910890
159.404410 1.561960	114.680130	9.296450
157.382770 1.880880	112.656790	9.681330
155.345830 2.204390	110.631410	10.067570
153.302940 2.531640	108.606030	10.451600
151.258180 2.860760	106.578780	10.831720

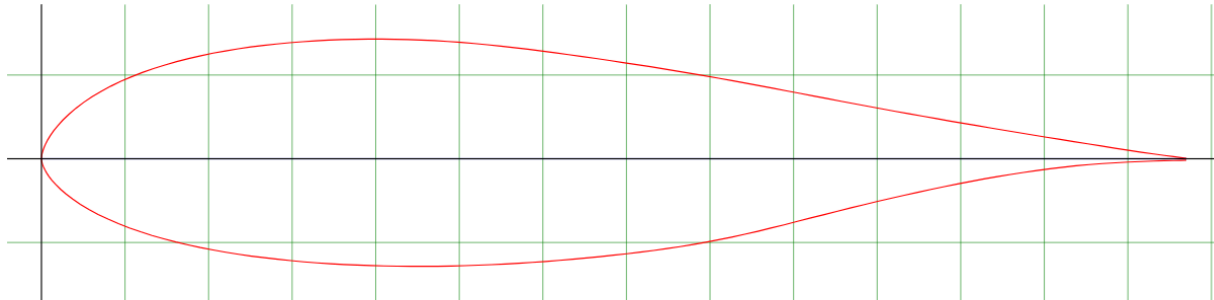
104.551020	11.208780	4.089690	6.612660
102.534990	11.578530	3.192770	5.748720
100.519640	11.938930	2.436440	4.918100
98.503100	12.292190	1.815770	4.141030
96.482990	12.638310	1.318520	3.433150
94.464920	12.977630	0.928200	2.801430
92.444640	13.307940	0.632400	2.235670
90.419430	13.633150	0.411230	1.728560
88.397280	13.950200	0.245820	1.273130
86.369520	14.260450	0.119340	0.867340
84.339550	14.565430	0.044030	0.498440
82.311790	14.863270	0.006460	0.160480
80.281140	15.154990	0.007820	-0.154870
78.260180	15.438380	0.065450	-0.485350
76.235820	15.712420	0.166600	-0.844560
74.221830	15.978300	0.316540	-1.233520
72.213790	16.229220	0.521050	-1.658350
70.210510	16.469090	0.787100	-2.126190
68.219300	16.690940	1.131010	-2.640610
66.231150	16.896640	1.568080	-3.208070
64.253710	17.082110	2.121090	-3.828060
62.281370	17.247010	2.810780	-4.502280
60.318380	17.387940	3.647520	-5.225800
58.355220	17.504730	4.638960	-5.980940
56.393420	17.597380	5.774900	-6.749680
54.430260	17.665040	7.040890	-7.510090
52.460810	17.710600	8.416190	-8.246360
50.499180	17.732530	9.887030	-8.951350
48.533130	17.729300	11.431480	-9.617240
46.567760	17.704140	13.041890	-10.241480
44.611230	17.654670	14.706700	-10.823730
42.656400	17.579020	16.420470	-11.367050
40.704970	17.478550	18.170960	-11.868720
38.762720	17.352580	19.958340	-12.334350
36.828290	17.199240	21.774450	-12.761390
34.904060	17.017510	23.619970	-13.156470
32.988840	16.806370	25.486060	-13.518400
31.087220	16.565990	27.372890	-13.850240
29.204640	16.293650	29.273830	-14.152670
27.334640	15.987140	31.188030	-14.425690
25.489460	15.646460	33.121950	-14.672700
23.658900	15.267020	35.061820	-14.896590
21.855710	14.852220	37.012060	-15.093110
20.081760	14.397130	38.975390	-15.269740
18.338920	13.901240	40.940080	-15.422740
16.636710	13.363700	42.915650	-15.554660
14.974450	12.779750	44.897680	-15.667200
13.359620	12.152280	46.881070	-15.760530
11.798340	11.477550	48.867350	-15.833120
10.299620	10.758280	50.860430	-15.888030
8.869750	9.994980	52.853170	-15.924410
7.523180	9.190710	54.849820	-15.943110
6.268070	8.351080	56.845620	-15.943450
5.118190	7.486290	58.847880	-15.926960

66.857090	0.569164	169.994900	-0.070635
68.864790	0.511696		
70.871640	0.453759	Chord line	
72.881380	0.395870	X (mm)	Y (mm)
74.890780	0.338854	0.000000	0.000000
76.899160	0.283541	170.000000	0.000000
78.909920	0.230950		
80.918810	0.180892	Name, DU 06-W-200	VAWT airfoil
82.927870	0.134020	Chord (mm),	117
84.932850	0.090412	Radius (mm),	0
86.930180	0.051034	Thickness (%),	100
88.921560	0.016189	Origin (%),	0
90.897640	-0.013661	Pitch (deg),	0
92.861650	-0.037065	AD=	0.25
94.806620	-0.052612	,	
96.734250	-0.058755	Airfoil surface	
98.654400	-0.053542	X (mm)	Y (mm)
100.570640	-0.037795	117.003510	0.038610
102.489600	-0.011582	116.423307	0.115947
104.416040	0.022748	115.683165	0.209430
106.349450	0.065947	114.758748	0.330057
108.295100	0.118061	113.648418	0.483678
110.261490	0.176425	112.402251	0.664092
112.245560	0.238026	111.075237	0.863460
114.236770	0.302098	109.707741	1.074996
116.229170	0.364318	108.316377	1.294488
118.223100	0.425295	106.914483	1.517139
120.216010	0.485117	105.508494	1.742364
122.195150	0.541759	104.101218	1.968876
124.177860	0.594901	102.694059	2.197143
126.153260	0.644578	101.287368	2.426697
128.133420	0.690312	99.882549	2.658123
130.108480	0.733291	98.476443	2.891538
132.083200	0.770413	97.073262	3.125889
134.059450	0.803318	95.675580	3.362697
136.030940	0.831058	94.275207	3.603132
137.997840	0.852304	92.874483	3.844269
139.961170	0.865453	91.476918	4.087863
141.926200	0.872089	90.077013	4.335201
143.885790	0.871035	88.677108	4.584060
145.842490	0.860549	87.282819	4.835259
147.796980	0.840636	85.887009	5.090787
149.746200	0.810880	84.488976	5.348772
151.689470	0.769475	83.096325	5.608512
153.632230	0.715846	81.704025	5.870592
155.575500	0.649777	80.315001	6.132789
157.519620	0.571456	78.926913	6.398145
159.465100	0.481336	77.534379	6.663033
161.402080	0.382375	76.140441	6.928857
163.312540	0.279579	74.746503	7.193160
165.124570	0.182731	73.351278	7.454772
166.722910	0.096028	71.955702	7.714278
168.066590	0.022219	70.568199	7.968753
169.146260	-0.030707	69.181164	8.216793

67.793310	8.459919	1.249677	2.850003
66.402999	8.698131	0.907452	2.362815
65.014092	8.931663	0.638820	1.928043
63.623664	9.158994	0.435240	1.538667
62.229843	9.382815	0.283023	1.189656
60.838128	9.601020	0.169182	0.876213
59.442552	9.814545	0.082134	0.596934
58.045455	10.024443	0.030303	0.343044
56.649879	10.229427	0.004446	0.110448
55.252314	10.430199	0.005382	-0.106587
53.861418	10.625238	0.045045	-0.334035
52.468182	10.813842	0.114660	-0.581256
51.082083	10.996830	0.217854	-0.848952
49.700079	11.169522	0.358605	-1.141335
48.321351	11.334609	0.541710	-1.463319
46.950930	11.487294	0.778401	-1.817361
45.582615	11.628864	1.079208	-2.207907
44.221671	11.756511	1.459809	-2.634606
42.864237	11.870001	1.934478	-3.098628
41.513238	11.966994	2.510352	-3.596580
40.162122	12.047373	3.192696	-4.116294
38.811942	12.111138	3.974490	-4.645368
37.460826	12.157704	4.845789	-5.168709
36.105381	12.189060	5.792319	-5.675436
34.755318	12.204153	6.804603	-6.160635
33.402213	12.201930	7.867548	-6.618924
32.049576	12.184614	8.975889	-7.048548
30.703023	12.150567	10.121670	-7.449273
29.357640	12.098502	11.301147	-7.823205
28.014597	12.029355	12.505896	-8.168472
26.677872	11.942658	13.736034	-8.488935
25.346529	11.837124	14.985945	-8.782839
24.022206	11.712051	16.256097	-9.054747
22.704084	11.566737	17.540406	-9.303840
21.395322	11.401299	18.838989	-9.532224
20.099664	11.213865	20.147283	-9.740367
18.812664	11.002914	21.464703	-9.928269
17.542746	10.768446	22.795695	-10.098270
16.282890	10.507302	24.130782	-10.252359
15.041871	10.221822	25.473006	-10.387611
13.820976	9.908613	26.824239	-10.509174
12.621492	9.567324	28.176408	-10.614474
11.449971	9.197370	29.536065	-10.705266
10.305945	8.795475	30.900168	-10.782720
9.194562	8.363628	32.265207	-10.846953
8.120034	7.899255	33.632235	-10.896912
7.088562	7.404228	35.003943	-10.934703
6.104475	6.878898	36.375417	-10.959741
5.177718	6.325371	37.749582	-10.972611
4.313907	5.747508	39.123162	-10.972845
3.522519	5.152329	40.501188	-10.961496
2.814669	4.551066	41.876289	-10.938798
2.197377	3.956472	43.255134	-10.903698
1.676844	3.384810	44.633511	-10.858185



Name = DU 06-W-200 VAWT airfoil
 Chord = 92.9mm Radius = 0mm Thickness = 100% Origin = 0% Pitch = 0°



Name = DU 06-W-200 VAWT airfoil
 Chord = 137mm Radius = 0mm Thickness = 100% Origin = 0% Pitch = 0°

Name, DU 06-W-200 VAWT airfoil	72.634237	3.245833
Chord (mm) , 92.9	71.522688	3.442224
Radius (mm) , 0	70.411140	3.639822
Thickness (%) , 100	69.304050	3.839278
Origin (%) , 0	68.195753	4.042172
Pitch (deg) , 0	67.085691	4.247016
AD=0.4	65.979903	4.453254
,	64.874392	4.661350
Airfoil surface	63.771484	4.869539
X (mm) Y (mm)	62.669318	5.080236
92.902787	0.030657	61.563622
92.442096	0.092064	60.456812
91.854411	0.166291	59.350001
91.120408	0.262071	58.242169
90.238787	0.384049	57.134057
89.249309	0.527300	56.032356
88.195637	0.685602	54.931027
87.109822	0.853565	53.829047
86.005055	1.027846	52.725116
84.891927	1.204634	51.622300
83.775548	1.383467	50.518277
82.658147	1.563321	49.411559
81.540838	1.744569	48.306514
80.423902	1.926839	47.198402
79.308451	2.110595	46.089084
78.191979	2.295931	44.980972
77.077829	2.482009	43.871282
75.968046	2.670039	42.766887
74.856126	2.860948	41.660633
73.743927	3.052415	40.560047

39.462712	8.868791	0.284739	-0.906240
38.367979	8.999873	0.430127	-1.161900
37.279841	9.121108	0.618064	-1.443016
36.193376	9.233517	0.856910	-1.753116
35.112763	9.334871	1.159113	-2.091922
34.034937	9.424984	1.536009	-2.460364
32.962221	9.501998	1.993262	-2.855746
31.889411	9.565820	2.535055	-3.268408
30.817345	9.616451	3.155813	-3.688502
29.744536	9.653425	3.847639	-4.104043
28.668290	9.678322	4.599200	-4.506393
27.596317	9.690306	5.402971	-4.891650
26.521928	9.688541	6.246968	-5.255539
25.447911	9.674792	7.127009	-5.596668
24.378725	9.647758	8.036779	-5.914850
23.310468	9.606417	8.973304	-6.211759
22.244069	9.551514	9.929895	-6.485906
21.182686	9.482675	10.906646	-6.740360
20.125577	9.398879	11.899097	-6.973724
19.074042	9.299569	12.907619	-7.189624
18.027431	9.184187	13.927382	-7.387408
16.988251	9.052826	14.958479	-7.568749
15.959477	8.904001	15.997287	-7.734018
14.937577	8.736502	17.043341	-7.883215
13.929240	8.550330	18.100172	-8.018199
12.928893	8.342977	19.160253	-8.140548
11.943503	8.116301	20.226002	-8.247941
10.974091	7.867608	21.298904	-8.344464
10.021680	7.596619	22.372550	-8.428074
9.091473	7.302869	23.452140	-8.500164
8.183096	6.983758	24.535262	-8.561664
7.300639	6.640864	25.619126	-8.612666
6.447446	6.272144	26.704570	-8.652334
5.628439	5.879084	27.793729	-8.682341
4.847058	5.461963	28.882703	-8.702222
4.111197	5.022453	29.973813	-8.712441
3.425316	4.563620	31.064459	-8.712627
2.796940	4.091037	32.158636	-8.703615
2.234895	3.613624	33.250489	-8.685593
1.744755	3.141506	34.345316	-8.657723
1.331443	2.687597	35.439771	-8.621585
0.992265	2.262951	36.535433	-8.576063
0.720532	1.876116	37.632582	-8.522553
0.507234	1.530899	38.729267	-8.460682
0.345588	1.221728	39.827531	-8.390542
0.224725	0.944607	40.925609	-8.313064
0.134333	0.695728	42.023129	-8.227410
0.065216	0.473976	43.121950	-8.134417
0.024061	0.272383	44.219750	-8.033992
0.003530	0.087698	45.317642	-7.926414
0.004273	-0.084632	46.413305	-7.812054
0.035766	-0.265230	47.504787	-7.690262
0.091042	-0.461527	48.593017	-7.560759
0.172980	-0.674082	49.672887	-7.423082

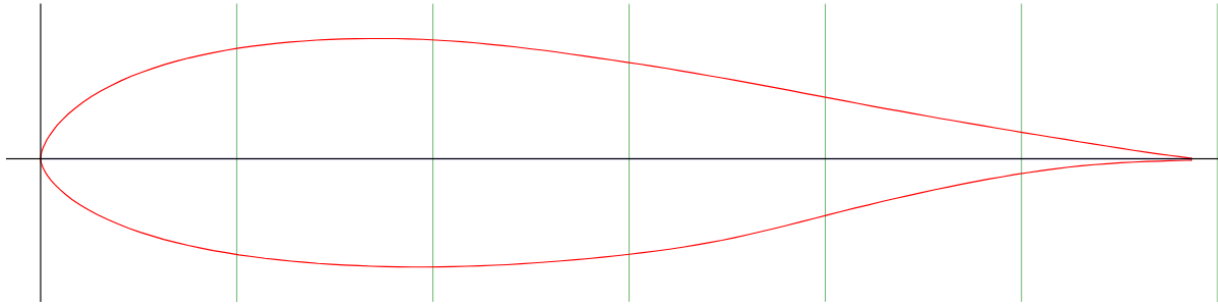
53.911728 -0.029259	X (mm)	Y (mm)
54.958897 -0.020654	137.004110	0.045210
56.007552 -0.006329	136.324727	0.135767
57.060295 0.012431	135.458065	0.245230
58.116847 0.036038	134.375628	0.386477
59.180087 0.064517	133.075498	0.566358
60.254661 0.096411	131.616311	0.777612
61.338897 0.130074	130.062457	1.011060
62.427035 0.165088	128.461201	1.258756
63.515823 0.199089	126.831997	1.515768
64.605447 0.232411	125.190463	1.776479
65.694514 0.265102	123.544134	2.040204
66.776055 0.296055	121.896298	2.305436
67.859548 0.325096	120.248599	2.572723
68.939046 0.352243	118.601448	2.841517
70.021145 0.377235	116.956489	3.112503
71.100458 0.400722	115.310023	3.385818
72.179584 0.421008	113.666982	3.660229
73.259546 0.438989	112.030380	3.937517
74.336908 0.454149	110.390627	4.219052
75.411761 0.465759	108.750463	4.501409
76.484663 0.472945	107.113998	4.786643
77.558494 0.476571	105.474793	5.076261
78.629352 0.475995	103.835588	5.367660
79.698631 0.470265	102.202959	5.661799
80.766703 0.459383	100.568549	5.961007
81.831894 0.443122	98.931536	6.263092
82.893834 0.420496	97.300825	6.567232
83.955495 0.391189	95.670525	6.874112
85.017435 0.355084	94.044061	7.181129
86.079839 0.312284	92.418693	7.491845
87.142987 0.263036	90.788119	7.802013
88.201490 0.208957	89.155901	8.113277
89.245500 0.152781	87.523683	8.422760
90.235721 0.099857	85.889958	8.729092
91.109167 0.052476	84.255822	9.032958
91.843448 0.012142	82.631139	9.330933
92.433456 -0.016780	81.007004	9.621373
92.897213 -0.038600	79.381910	9.906059
	77.753939	10.184991
Chord line	76.127612	10.458443
X (mm) Y (mm)	74.499504	10.724634
0.000000 0.000000	72.867423	10.986715
92.900000 0.000000	71.237808	11.242220
	69.603672	11.492245
Name, DU 06-W-200 VAWT airfoil	67.967755	11.738023
Chord (mm) , 137	66.333619	11.978047
Radius (mm) , 0	64.697154	12.213139
Thickness (%) , 100	63.068498	12.441518
Origin (%) , 0	61.437102	12.662362
Pitch (deg) , 0	59.814063	12.876630
AD=0.4	58.195819	13.078842
,	56.581411	13.272149
Airfoil surface	54.976730	13.450934

53.374515	13.616704	1.263688	-2.585327
51.780931	13.766171	1.709349	-3.084966
50.191457	13.899061	2.265158	-3.628308
48.609518	14.012634	2.939472	-4.211380
47.027442	14.106753	3.738456	-4.819934
45.446462	14.181418	4.653890	-5.439448
43.864386	14.235944	5.674129	-6.052249
42.277241	14.272660	6.782459	-6.645596
40.696398	14.290333	7.967783	-7.213735
39.111993	14.287730	9.212428	-7.750364
37.528136	14.267454	10.510229	-8.253428
35.951403	14.227587	11.851870	-8.722653
34.376040	14.166622	13.232967	-9.160505
32.803417	14.085655	14.643656	-9.564792
31.238192	13.984138	16.084074	-9.940035
29.679269	13.860564	17.547645	-10.284179
28.128566	13.714111	19.034917	-10.602567
26.585124	13.543957	20.538766	-10.894240
25.052642	13.350239	22.059329	-11.161664
23.535504	13.130765	23.591263	-11.405387
22.028504	12.883754	25.133883	-11.625409
20.541506	12.609206	26.692395	-11.824470
19.066290	12.303422	28.255702	-12.004899
17.613131	11.969142	29.827366	-12.163271
16.183536	11.602393	31.409579	-12.305614
14.779012	11.202764	32.992888	-12.428914
13.407231	10.769570	34.584965	-12.535226
12.067645	10.298975	36.182248	-12.625920
10.766282	9.793308	37.780627	-12.701133
9.508074	9.249555	39.381335	-12.759632
8.300282	8.669908	40.987523	-12.803883
7.147975	8.054778	42.593437	-12.833201
6.062798	7.406631	44.202502	-12.848271
5.051327	6.729988	45.810882	-12.848545
4.124659	6.033069	47.424468	-12.835256
3.295809	5.329026	49.034629	-12.808678
2.572997	4.632792	50.649174	-12.767578
1.963484	3.963410	52.263171	-12.714285
1.463297	3.337183	53.878949	-12.647155
1.062572	2.766715	55.496919	-12.568243
0.748020	2.257623	57.114204	-12.477001
0.509640	1.801687	58.733818	-12.373566
0.331403	1.393016	60.353158	-12.259308
0.198102	1.025993	61.971676	-12.132994
0.096174	0.698974	63.592112	-11.995857
0.035483	0.401684	65.211041	-11.847760
0.005206	0.129328	66.830107	-11.689114
0.006302	-0.124807	68.445885	-11.520467
0.052745	-0.391135	70.055498	-11.340860
0.134260	-0.680616	71.660316	-11.149882
0.255094	-0.994072	73.252804	-10.946848
0.419905	-1.336435	74.835565	-10.729429
0.634310	-1.713459	76.402982	-10.496940
0.911461	-2.128021	77.956425	-10.244997

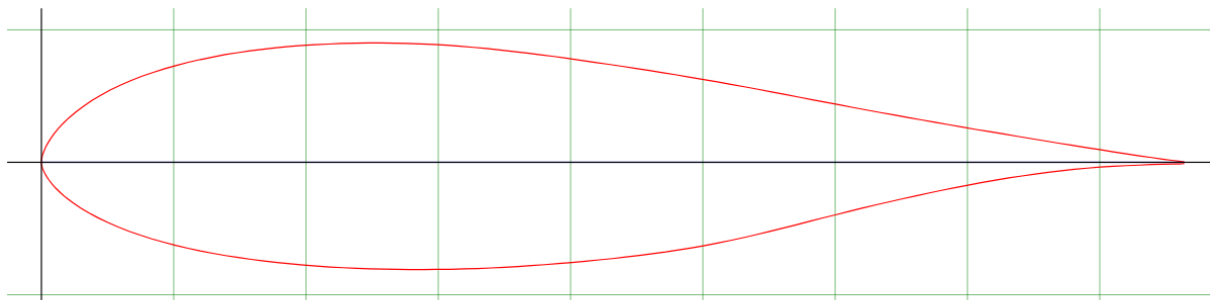
79.503840	-9.970997	2.939472	0.387206
81.048104	-9.674940	3.738456	0.442543
82.594560	-9.356141	4.653890	0.495820
84.147044	-9.016244	5.674129	0.547187
85.705145	-8.657167	6.782459	0.595435
87.273110	-8.279458	7.967783	0.639338
88.857789	-7.885446	9.212428	0.678652
90.456716	-7.481570	10.510229	0.714611
92.061397	-7.072899	11.851870	0.746239
93.667037	-6.666009	13.232967	0.773923
95.273910	-6.263503	14.643656	0.797614
96.879961	-5.864559	16.084074	0.817029
98.474915	-5.475068	17.547645	0.834082
100.072746	-5.093660	19.034917	0.846819
101.664686	-4.721431	20.538766	0.857199
103.260462	-4.358655	22.059329	0.863571
104.852128	-4.005058	23.591263	0.866722
106.443520	-3.663380	25.133883	0.867550
108.036145	-3.331155	26.692395	0.865656
109.624934	-3.011397	28.255702	0.860610
111.210024	-2.704654	29.827366	0.854516
112.792237	-2.413529	31.409579	0.844820
114.375820	-2.136241	32.992888	0.833248
115.955019	-1.874845	34.584965	0.819741
117.531889	-1.630711	36.182248	0.803752
119.106978	-1.404113	37.780627	0.784777
120.677820	-1.196147	39.381335	0.764270
122.243867	-1.009279	40.987523	0.741598
123.809503	-0.843920	42.593437	0.716072
125.375550	-0.699796	44.202502	0.688010
126.942282	-0.577318	45.810882	0.657831
128.510110	-0.475390	47.424468	0.623939
130.071088	-0.393464	49.034629	0.586718
131.610694	-0.327841	50.649174	0.546607
133.070977	-0.272493	52.263171	0.503328
134.359051	-0.233996	53.878949	0.458679
135.441899	-0.211528	55.496919	0.412367
136.311986	-0.186868	57.114204	0.365676
136.995890	-0.160153	58.733818	0.319024
		60.353158	0.273076
		61.971676	0.228501
		63.592112	0.186118
		65.211041	0.145777
		66.830107	0.108004
		68.445885	0.072861
		70.055498	0.041128
		71.660316	0.013047
		73.252804	-0.011009
		74.835565	-0.029870
		76.402982	-0.042399
		77.956425	-0.047350
		79.503840	-0.043149
		81.048104	-0.030458
		82.594560	-0.009333

Camber line

X (mm)	Y (mm)		
0.035483	0.401684		
0.005206	0.064664		
0.006302	-0.062404		
0.052745	0.047553		
0.134260	0.070275		
0.255094	0.094420		
0.419905	0.129751		
0.634310	0.163339		
0.911461	0.197063		
1.263688	0.233847		
1.709349	0.280135		
2.265158	0.333204		



Name = DU 06-W-200 VAWT airfoil
 Chord = 58.7mm Radius = 0mm Thickness = 100% Origin = 0% Pitch = 0°



Name = DU 06-W-200 VAWT airfoil
 Chord = 86.4mm Radius = 0mm Thickness = 100% Origin = 0% Pitch = 0°

Name, DU 06-W-200 VAWT airfoil	46.596001	1.928706
Chord (mm) , 58.7	45.894830	2.050919
Radius (mm) , 0	45.192484	2.175011
Thickness (%) , 100	44.490139	2.299866
Origin (%) , 0	43.790611	2.425895
Pitch (deg) , 0	43.090320	2.554096
AD=1	42.388914	2.683529
,	41.690207	2.813843
Airfoil surface	40.991678	2.945331
X (mm) Y (mm)	40.294791	3.076878
58.701761	0.019371	39.598374
58.410668	0.058172	38.899727
58.039332	0.105073	38.200375
57.575543	0.165593	37.501023
57.018480	0.242666	36.801026
56.393266	0.333181	36.100852
55.727491	0.433206	35.404729
55.041405	0.539336	34.708840
54.343345	0.649457	34.012541
53.640001	0.761163	33.315009
52.934603	0.874160	32.618181
52.228560	0.987804	31.920590
51.522575	1.102327	31.221297
50.816825	1.217497	30.523061
50.112014	1.333605	29.822887
49.406557	1.450712	29.121951
48.702568	1.568288	28.421777
48.001338	1.687097	27.720605
47.298758	1.807725	27.022780

26.323780	5.425406	0.057526	-0.291622
25.628361	5.517213	0.109299	-0.425927
24.934997	5.603854	0.179916	-0.572619
24.243276	5.686680	0.271781	-0.734161
23.555723	5.763283	0.390531	-0.911787
22.869227	5.834310	0.541449	-1.107728
22.186428	5.898352	0.732400	-1.321807
21.505391	5.955291	0.970546	-1.554611
20.827582	6.003953	1.259467	-1.804438
20.149714	6.044280	1.601806	-2.065183
19.472316	6.076272	1.994039	-2.330625
18.794449	6.099634	2.431178	-2.593190
18.114409	6.115366	2.906061	-2.847420
17.437070	6.122938	3.413933	-3.090849
16.758204	6.121823	3.947223	-3.320776
16.079574	6.113135	4.503288	-3.536323
15.403995	6.096054	5.078137	-3.737370
14.729004	6.069932	5.669892	-3.924975
14.055187	6.035241	6.274326	-4.098199
13.384539	5.991744	6.891497	-4.258978
12.716592	5.938796	7.518590	-4.406433
12.052167	5.876046	8.155837	-4.542852
11.390852	5.803141	8.800187	-4.667824
10.734234	5.720139	9.451698	-4.782406
10.084190	5.626101	10.108081	-4.886834
9.438490	5.520265	10.769043	-4.981106
8.801361	5.402631	11.436815	-5.066397
8.169279	5.271612	12.106640	-5.143705
7.546648	5.128384	12.780047	-5.211562
6.934114	4.971244	13.457973	-5.272551
6.332321	4.800016	14.136369	-5.325381
5.744558	4.614407	14.818521	-5.370933
5.170590	4.412773	15.502905	-5.409792
4.612998	4.196111	16.187758	-5.442018
4.073897	3.963131	16.873609	-5.467083
3.556398	3.714771	17.561807	-5.486043
3.062673	3.451208	18.249889	-5.498605
2.597710	3.173498	18.939320	-5.505062
2.164328	2.883579	19.628458	-5.505179
1.767281	2.584972	20.319827	-5.499486
1.412146	2.283313	21.009728	-5.488098
1.102445	1.984999	21.701507	-5.470488
0.841288	1.698191	22.393052	-5.447654
0.626975	1.429873	23.085360	-5.418890
0.455277	1.185447	23.778607	-5.385079
0.320502	0.967317	24.471560	-5.345985
0.218364	0.771964	25.165512	-5.301667
0.141995	0.596862	25.859346	-5.252711
0.084880	0.439604	26.552828	-5.198589
0.041207	0.299487	27.247131	-5.139831
0.015203	0.172108	27.940789	-5.076376
0.002231	0.055413	28.634506	-5.008401
0.002700	-0.053476	29.326814	-4.936142
0.022600	-0.167589	30.016480	-4.859186

35.683459	8.370173	0.400032	-1.080605
34.671456	8.482925	0.574819	-1.342051
33.661008	8.587469	0.796954	-1.630454
32.656003	8.681731	1.078013	-1.945555
31.653590	8.765539	1.428538	-2.288218
30.655930	8.837165	1.853798	-2.655936
29.658182	8.896522	2.357683	-3.039725
28.661126	8.943610	2.935008	-3.430426
27.663379	8.977997	3.578429	-3.816893
26.662435	9.001152	4.277405	-4.191091
25.665466	9.012298	5.024938	-4.549392
24.666250	9.010656	5.809882	-4.887821
23.667379	8.997869	6.628349	-5.205082
22.673002	8.972726	7.474464	-5.501002
21.679488	8.934278	8.345462	-5.777136
20.687702	8.883216	9.235123	-6.032102
19.700582	8.819194	10.143533	-6.268752
18.717437	8.741261	11.066544	-6.485789
17.739475	8.648899	12.004502	-6.686582
16.766093	8.541590	12.952915	-6.870528
15.799622	8.419421	13.911869	-7.039181
14.842829	8.281008	14.877994	-7.192886
13.892429	8.125229	15.850858	-7.331645
12.954643	7.952083	16.833744	-7.457184
12.024288	7.759238	17.819654	-7.570973
11.107843	7.548422	18.810835	-7.670851
10.206259	7.317130	19.808669	-7.760621
9.320486	7.065101	20.807194	-7.838381
8.455363	6.791904	21.811248	-7.905427
7.610544	6.495120	22.818586	-7.962624
6.789830	6.176218	23.826614	-8.010058
5.996333	5.833296	24.836112	-8.046950
5.234630	5.467738	25.849066	-8.074858
4.507920	5.079802	26.861846	-8.093347
3.823546	4.671043	27.876614	-8.102851
3.185654	4.244314	28.890950	-8.103024
2.601245	3.804797	29.908570	-8.094643
2.078525	3.360787	30.924029	-8.077882
1.622678	2.921702	31.942253	-8.051962
1.238285	2.499552	32.960131	-8.018352
0.922838	2.104618	33.979133	-7.976016
0.670118	1.744848	34.999517	-7.926250
0.471744	1.423786	36.019469	-7.868707
0.321408	1.136246	37.040890	-7.803475
0.209002	0.878515	38.062138	-7.731418
0.124934	0.647050	39.082867	-7.651757
0.060653	0.440813	40.104806	-7.565270
0.022378	0.253325	41.125795	-7.471872
0.003283	0.081562	42.146870	-7.371821
0.003974	-0.078710	43.165872	-7.265462
0.033264	-0.246672	44.180986	-7.152192
0.084672	-0.429235	45.193075	-7.031750
0.160877	-0.626918	46.197389	-6.903706
0.264816	-0.842832	47.195568	-6.766589

