

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA**



**“ANÁLISIS AERODINÁMICO DE PERFILES PARA EL DISEÑO DE
AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA EN CONDICIONES DE
VIENTO DEL CAMPUS DE LA UNS”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO EN ENERGÍA**

PRESENTADO POR:

Christian Vladimir Rodriguez Díaz

ASESOR:

Amancio Ramiro Rojas Flores

Nuevo Chimbote - Perú

2022

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

La presente Tesis para Título ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento del objetivo propuesto y reúne las condiciones formales y metodológicas, estando en cuadrado dentro de las áreas y líneas de investigación conforme al reglamento general para obtener el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa (R.D. N°492-2017-CU-R-UNS) de acuerdo a la denominación siguiente:

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
EN ENERGÍA**

**"ANÁLISIS AERODINÁMICO DE PERFILES PARA EL DISEÑO
DE AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA EN
CONDICIONES DE VIENTO DEL CAMPUS DE LA UNS"**

AUTOR:

Bach. Christian Vladimir Rodriguez Díaz

Mg. Amancio Ramiro Rojas Flores
ASESOR



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
E.P. INGENIERÍA EN ENERGÍA

CARTA DE CONFORMIDAD DEL JURADO

El presente jurado evaluador da la conformidad del presente informe, desarrollado en el cumplimiento del objetivo propuesto y presentado conforme al reglamento General para obtener el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa (R.D. N°492-2017-CU-R-UNS), titulado:

"ANÁLISIS AERODINÁMICO DE PERFILES PARA EL DISEÑO DE AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA EN CONDICIONES DE VIENTO DEL CAMPUS DE LA UNS"

Autor:

Bach. Christian Vladimir Rodriguez Díaz

Revisado y evaluado por el siguiente Jurado Evaluador:

Mg. Gilmer Juan Luján Guevara

PRESIDENTE

Dr. Denis Javier Arangurí Cayetano

SECRETARIO

Mg. Amancio Ramiro Rojas Flores

INTEGRANTE



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

A los nueve días del mes de agosto del año dos mil veintidós, siendo las diez horas de la mañana, se reunieron en el aula E3 de la escuela de ingeniería en energía, el Jurado Evaluador designado mediante **Resolución N° 293-2022-UNS-CFI**, integrado por los siguientes docentes:

- **Mg. GILMER JUAN LUJAN GUEVARA** : **PRESIDENTE**
- **Dr. DENIS JAVIER ARANGURI CAYETANO** : **SECRETARIO**
- **Mg. AMANCIO RAMIRO ROJAS FLORES** : **INTEGRANTE**

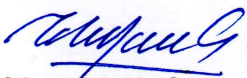
Para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis titulada: **“ANÁLISIS AERODINÁMICO DE PERFILES PARA EL DISEÑO DE AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA EN CONDICIONES DE VIENTO DEL CAMPUS DE LA UNS”** elaborado por el Bachiller de Ingeniería en Energía: **CHRISTIAN VLADIMIR RODRIGUEZ DIAZ** con código de matrícula N° 0200811045, teniendo como asesor al docente Mg. Amancio Ramiro Rojas Flores, según Resolución Decanal N° 645-2021-UNS-FI, de fecha 17.11.21.

Terminada la sustentación del Bachiller, respondió las preguntas formuladas por los miembros del jurado y el público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con el artículo 103° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
CHRISTIAN VLADIMIR RODRIGUEZ DIAZ	<i>Dieciocho (18)</i>	<i>Muy Bueno</i>

Siendo las diez horas del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.


Mg. Gilmer J. Luján Guevara
PRESIDENTE


Dr. DENIS J. ARANGURI CAYETANO
SECRETARIO


Mg. Amancio R. Rojas Flores
INTEGRANTE

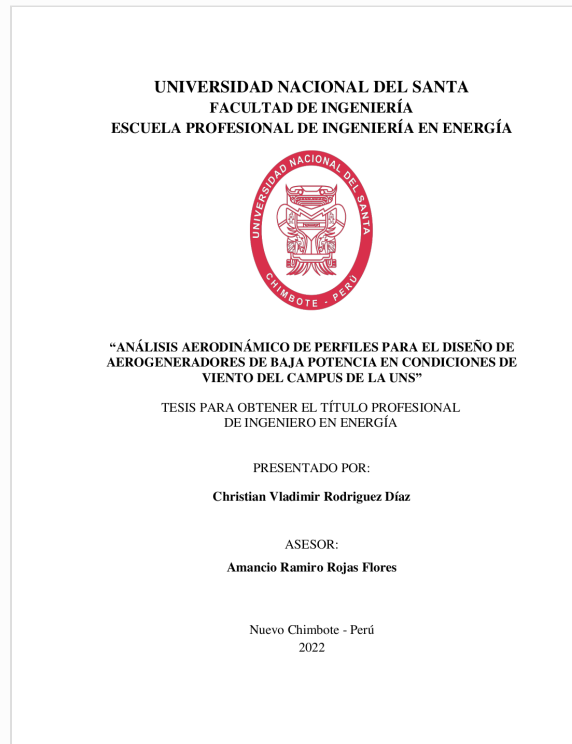


Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Christian Vladimir Rodriguez Diaz
Título del ejercicio: TESIS
Título de la entrega: Tesis_titulación
Nombre del archivo: Tesis_-_Christian_Rodriguez.pdf
Tamaño del archivo: 1.95M
Total páginas: 86
Total de palabras: 16,108
Total de caracteres: 82,232
Fecha de entrega: 01-jun.-2022 10:11p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega... 1848849020



DEDICATORIA

A mi madre por todo el amor y paciencia brindados
y a mi tía Elena por recordarme siempre que
todos los proyectos deben ser finalizados.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor Amancio Ramiro Rojas Flores por su comprensión y apoyo brindado durante el proceso de elaboración de la presente tesis.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Realidad problemática	6
1.3. Formulación del problema	7
1.4. Objetivos	8
1.5. Hipótesis	8
1.5.1. Hipótesis general	8
1.5.2. Hipótesis específicas	9
1.6. Variables e indicadores	9
1.6.1. Variable independiente e indicadores	9
1.6.2. Variable dependiente e indicadores	9
1.7. Justificación	10
1.8. Limitaciones del trabajo	11
CAPÍTULO II	12
MARCO TEÓRICO	12
2.1. Energía eólica	12
2.2. Ley exponencial de Hellmann	12
2.3. Distribución de Weibull	13
2.4. Aerogeneradores	15
2.5. Ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos	16
2.6. Modelo de turbulencia	18
2.7. Dinámica de fluidos computacional (CFD)	19
2.8. Teoría de momento del elemento de pala (BEM)	29
CAPÍTULO III	34
MATERIALES Y MÉTODOS	34
3.1. Recursos humanos	34
3.1.1. Autor	34

3.1.2. Asesor.....	34
3.2. Materiales, equipos y servicios.....	34
3.2.1. Materiales.....	34
3.2.2. Equipos.....	34
3.2.3. Servicios.....	35
3.3. Metodología de la investigación.....	35
3.3.1. Tipo de investigación.....	35
3.3.2. Metodología.....	35
CAPÍTULO IV.....	38
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
4.1. Resultados.....	38
4.1.1. Evaluación del recurso eólico.....	38
4.1.2. Simulación y elección de perfiles aerodinámicos.....	44
4.1.3. Diseño de los aerogeneradores.....	57
4.2. Discusión.....	66
CAPÍTULO V.....	68
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	68
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y VIRTUALES.....	71
ANEXOS.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Variación de la velocidad del viento con la altura sobre el nivel del terreno.	13
Figura 2. Partes principales de un aerogenerador de eje horizontal.	16
Figura 3. Esquema de modelamiento <i>CFD</i>	20
Figura 4. Fuerzas de sustentación y arrastre en un perfil.	21
Figura 5. Dominio computacional <i>2D</i>	23
Figura 6. Malla estructurada tipo C utilizada en las simulaciones numéricas <i>2D</i>	24
Figura 7. Detalle de la malla cercana al perfil aerodinámico.	26
Figura 8. Detalle de la región de la malla llamada <i>inflation</i>	27
Figura 9. Condiciones de borde impuestas.	28
Figura 10. División del álabe del aerogenerador en elementos.	30
Figura 11. Ángulos y fuerzas de un elemento del álabe de un aerogenerador.	31
Figura 12. Distribución de frecuencias de velocidades de viento (10 m.s.n.s.).	40
Figura 13. Distribución acumulada de frecuencias de velocidades de viento.	40
Figura 14. Distribución de Weibull (10 m.s.n.s.).	42
Figura 15. Distribución de Weibull (velocidades de viento proyectadas a 30 m.s.n.s.).	43
Figura 16. Parámetros utilizados en el refinamiento de malla.	45
Figura 17. C_l (a) y C_d (b) del perfil S809 para Re de 1'000 000.	47
Figura 18. C_l (a) y C_d (b) del perfil S809 para Re de 750 000.	48
Figura 19. C_l (a) y C_d (b) del perfil S809 para Re de 500 000.	49
Figura 20. C_l (a) y C_d (b) del perfil S809 para Re de 300 000.	50
Figura 21. Perfiles aerodinámicos simulados, NACA2412 (a), NACA4412 (b), E387 (c), S1223 (d), SD7032 (e) y FX63-137 (f).	52
Figura 22. C_l/C_d de los perfiles para Re de 250 000 (a) y 500 000 (b).	53
Figura 23. Relación de sustentación / arrastre del perfil SD7032 para varios Re	54
Figura 24. Geometría de los perfiles aerodinámicos NACA4412 y SD7032.	55
Figura 25. Contornos de velocidad alrededor de los perfiles NACA4412 (a) y SD7032 (b).	56
Figura 26. Contornos de presión alrededor de los perfiles NACA4412 (a) y SD7032 (b). ..	56
Figura 27. Predicción del máximo CP para diferentes Re y λ	57
Figura 28. C_l y C_d extrapolados para todos los α (Re de 250 000).	58
Figura 29. Vistas de un álabe del aerogenerador de 1 kW, isométrica (a), elevación (b) y perfiles aerodinámicos (c).	60
Figura 30. c/R de los perfiles que conforman los álabes de los aerogeneradores diseñados.	61
Figura 31. θT de los perfiles que conforman los álabes de los aerogeneradores diseñados.	62
Figura 32. CP alcanzado por los aerogeneradores con respecto a V_∞	63

Figura 33. Potencia alcanzada por los aerogeneradores con respecto a V_{∞}	64
Figura 34. Energía anual producida por los aerogeneradores a distintas V_{∞}	65
Figura 35. <i>PAE</i> de los aerogeneradores diseñados.....	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de aerogeneradores comerciales de eje horizontal de baja potencia.	6
Tabla 2: Frecuencia de las direcciones de viento.	39
Tabla 3. Parámetros usados en el diseño preliminar del rotor.	44
Tabla 4. Características de las mallas utilizadas en el estudio de independencia de malla.	45
Tabla 5. C_l y C_d obtenidos en el estudio de independencia de malla.....	46
Tabla 6. Relative Root Mean Square Error ($RRMSE$) de los C_l y C_d para α entre 0° y 10°	51
Tabla 7. Parámetros de diseño de los aerogeneradores.....	59

NOMENCLATURA

Abreviaciones

$2D$ = Dos dimensiones.

$3D$ = Tres dimensiones.

BEM = Teoría de momento del elemento de pala.

CFD = Dinámica de fluidos computacional.

CSU = Colorado State University.

DNS = Direct Numerical Simulation.

DUT = Delf University of Technology.

LES = Large Eddy Simulation.

$NREL$ = Laboratorio nacional de energía renovable de USA.

OSU = Ohio State University.

PAE = Producción Anual de Energía.

$RANS$ = Reynolds-Averaged Navier Stokes.

RER = Recursos energéticos renovables.

Re = Número de Reynolds.

$RMSE$ = Root Mean Square Error.

$RRMSE$ = Relative Root Mean Square Error.

UNS = Universidad Nacional del Santa.

Distribución de Weibull

ϵ = Exponente de Hellmann.

$h_w(V_0)$ = Función de densidad de probabilidad de la velocidad de viento.

k = Factor de forma.

Q = Número de intervalos de división de las velocidades de viento.

n = Número de mediciones de velocidades de viento distinto de cero.

S = Factor de escala.

\bar{v} = Velocidad promedio (m/s).

v_i = Velocidad de viento de la serie temporal i .

Diseño de aerogeneradores

α = Ángulo de ataque ($^{\circ}$).

$\eta_{mec-elect}$ = Eficiencia mecánica eléctrica del aerogenerador.

θ_p = Ángulo de paso ($^{\circ}$).

θ_T = Ángulo de torsión ($^{\circ}$).

λ = Razón de velocidad de punta o celeridad.

σ = Solidez.

τ_w = Tensión cortante.

ϕ = Ángulo de la velocidad relativa ($^{\circ}$).

a = Factor de inducción axial.

A = Área (m^2).

a' = Factor de inducción tangencial.

c = Cuerda (m).

C_d = Coeficiente de arrastre.

C_f = Coeficiente de fricción local.

C_l = Coeficiente de sustentación.

C_l/C_d = Relación de sustentación/arrastre.

C_p = Coeficiente de potencia.

C_T = Coeficiente de empuje.

D = Fuerza de arrastre (N).

F = Factor de pérdida de punta.

L = Fuerza de sustentación (N).

N = Número de elementos del álabe del aerogenerador.

P = Potencia de salida del aerogenerador (W).

R = Radio del rotor o largo del álabe (m).

r_i = Distancia desde el eje del rotor hasta el punto medio del perfil (m).

u_* = Velocidad de fricción.

V_∞ = Velocidad de viento incidente (m/s).

V_{rel} = Velocidad relativa (m/s).

y = Altura de la primera celda cercana a la pared del perfil (m).

y^+ = Distancia adimensional a la pared del perfil.

Dinámica de fluidos computacional

Γ_k = Difusividad efectiva de k .

Γ_ω = Difusividad efectiva de ω .

κ = Conductividad térmica (W/m.K).

μ = Viscosidad dinámica (Kg/m.s).

ρ = Densidad (Kg/m³).

Φ = Función de disipación.

ω = Frecuencia turbulenta (s⁻¹).

G_k = Generación de k .

G_ω = Generación de ω .

i = Energía interna específica (J/Kg).

k = Energía cinética turbulenta (m²/s³).

p = Presión (Pa).

P = Presión promedio (Pa).

S_ω = Término fuente de ω .

S_i = Término fuente de energía interna (N/m².s).

S_k = Término fuente de k .

S_{Mx} = Término fuente de momentum en el eje x (N/m³).

S_{My} = Término fuente de momentum en el eje y (N/m³).

S_{Mz} = Término fuente de momentum en el eje z (N/m³).

t = Tiempo (s).

T = Temperatura (K).

u = Componente de velocidad en el eje x (m/s).

\mathbf{u} = Vector de velocidades.

u' = Componente de velocidad fluctuante en el eje x (m/s).

U = Componente de velocidad promedio en el eje x (m/s).

\mathbf{U} = Vector de velocidad media de flujo.

v = Componente de velocidad en el eje y (m/s).

V = Componente de velocidad promedio en el eje y (m/s).

v' = Componente de velocidad fluctuante en el eje y (m/s).

w = Componente de velocidad en el eje z (m/s).

W = Componente de velocidad promedio en el eje z (m/s).

w' = Componente de velocidad fluctuante en el eje z (m/s).

y_i = Valor medido.

\hat{y}_i = Valor pronosticado.

Y_k = Disipación de k .

Y_ω = Disipación de ω .

RESUMEN

El objetivo principal de esta tesis fue diseñar aerogeneradores de baja potencia de 1, 2.5, 5 y 10 kW para su operación en el Campus de la Universidad Nacional del Santa (*UNS*). Para ello, se analizaron las características aerodinámicas de seis perfiles para la elección del mejor de ellos, con el cual se diseñaron los álabes de los aerogeneradores. Los perfiles analizados fueron el NACA2412, NACA4412, E387, S1223, SD7032 y FX63-137. La metodología empleada comprendió el análisis de las frecuencias de direcciones y velocidades de viento del Campus de la *UNS*. Seguido, la verificación del modelo numérico utilizado en la simulación de los perfiles fue llevada a cabo. El cálculo de los coeficientes aerodinámicos de los perfiles fue realizado con el modelo obtenido en el proceso de verificación. El modelo se basó en un método de dinámica de fluidos computacional (*CFD*). Luego, se escogió el perfil aerodinámico con las mejores características aerodinámicas obtenidas de los análisis cuantitativo y cualitativo. Con este perfil aerodinámico, el diseño de los álabes de los aerogeneradores fue llevado a cabo usando la teoría del momento del elemento de pala (*BEM*). Finalmente, se calculó la energía generada por los álabes diseñados. Los resultados mostraron que el perfil aerodinámico SD7032 tuvo la mayor relación sustentación/arrastre (C_l/C_d) de 63.80, mientras el perfil NACA4412 solamente alcanzó una relación máxima de 54.27. La longitud de los álabes diseñados fue de 1.663, 2.617, 3.688 y 5.207 m. para los aerogeneradores de 1, 2.5, 5 y 10 kW, respectivamente. En base a los resultados se concluyó que las velocidades medias de viento fueron las que más aportaron a la generación de energía ya que tienen mayor densidad energética que las bajas velocidades.

PALABRAS CLAVE

Diseño de aerogeneradores, Aerogeneradores de eje horizontal de baja potencia, Análisis computacional de perfiles aerodinámicos.

ABSTRACT

The main objective of the present work was to design small wind turbines of 1, 2.5, 5 and 10 kW power output to operate at the Campus of the Universidad Nacional del Santa (*UNS*). Thus, aerodynamic characteristics of six airfoils were analyzed to choose the best one, with which the wind turbine blades were designed. The airfoils analyzed were NACA2412, NACA4412, E387, S1223, SD7032 and FX63-137. The methodology included the analysis of the directions and wind speeds of the *UNS* Campus. Next, the verification of the numerical model used in the simulation of the airfoils was carried out. The calculation of the airfoils' aerodynamic coefficients was carried out with the model obtained in the verification process. The model was based on a Computational Fluid Dynamics (*CFD*) method. Then, the airfoil with the best aerodynamic characteristics obtained from the quantitative and qualitative analysis was chosen. With this airfoil, designs of the wind turbine blades were carried out using the Blade Element Moment (*BEM*) theory. Finally, the energy generated by the designed blades was calculated. The results showed that the SD7032 airfoil had the highest lift-to-drag ratio (C_l/C_d) of 63.80, while the NACA4412 airfoil only reached a maximum ratio of 54.27. The blades' length was 1,663, 2,617, 3,688 and 5,207 m. for 1, 2.5, 5 and 10 kW wind turbines power output, respectively. Based on the results, it was concluded that medium wind speeds contributed more to power generation than low speeds as the former have higher energy density.

KEYWORDS

Wind turbine design, Small-scale horizontal axis wind turbines, Computational analysis of airfoils.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la preocupación por el deterioro del medio ambiente ha direccionado las políticas energéticas de diversos países del mundo hacia cambios tecnológicos en el sector de generación eléctrica. Dichos cambios están relacionados con el uso de Recursos Energéticos Renovables (*RER*) en dicho sector. Entre los principales *RER* se tiene a la hidráulica, solar fotovoltaica y eólica.

La principal ventaja de utilizar tecnologías que utilizan *RER* es la no emisión de gases de efecto invernadero durante su operación. Existen también algunas desventajas inherentes a cada tecnología. Las centrales hidroeléctricas, por ejemplo, necesitan de embalses que pueden llegar a inundar áreas donde viven flora y fauna local; la tecnología solar fotovoltaica solamente produce energía durante las horas del día.

Ante las desventajas que muestran las tecnologías hidráulica y solar, la tecnología eólica se presenta como una alternativa energética. Para el aprovechamiento del recurso eólico, los aerogeneradores de alta o baja potencia son usados. Los aerogeneradores de alta potencia pueden producir ruidos molestos y como se ubican en zonas alejadas a las ciudades requieren mayores longitudes de líneas de transmisión. Por otro lado, los aerogeneradores de baja potencia pueden cubrir pequeñas demandas energéticas de zonas urbanas o rurales debido a su adecuación para tal fin (Tummala et al., 2016). Por ello, los aerogeneradores de baja potencia se presentan como una alternativa viable. Notar que los aerogeneradores de baja potencia presentan potencias de diseño menores a 10 kW (U.S. Energy Information Administration, 2021).

En este primer capítulo se incluye un breve resumen de los antecedentes relacionados con el tema abordado. La realidad problemática se fundamenta con datos de aerogeneradores de baja potencia. Luego, se plantea la formulación del problema. Asimismo, se presentan los

objetivos e hipótesis. Los beneficios asociados con esta tesis son explicados en la sección de justificación. Finalmente, se detallan las limitaciones del presente trabajo.

1.1. Antecedentes

En esta sección se presentan los principales antecedentes bibliográficos relacionados con el estado del arte del tema abordado. Dichos antecedentes fueron agrupados en tres subsecciones: análisis de frecuencia de viento, análisis aerodinámico de perfiles y diseño de álabes de aerogeneradores, las cuales representan la totalidad de los temas abordados en esta tesis.

1.1.1. Análisis de frecuencia de viento

Mohammadi et al. (2016) evaluaron la efectividad de seis métodos numéricos usados para determinar los dos parámetros de la función de distribución de Weibull. Para la evaluación se usaron siete enfoques estadísticos. Los autores usaron las mediciones de viento de cuatro estaciones ubicadas en la provincia de Alberta en Canadá. Dichas estaciones fueron Edmonton City Center Awos, Grande Prairie A, Lethbridge A y Waterton Park Gate. Las evaluaciones fueron realizadas sobre escalas diarias y mensuales. Los resultados mostraron que los métodos empíricos de Justus, Lysen y el factor del patrón de energía fueron los más efectivos, presentando un coeficiente de correlación mayor a 0.98. Asimismo, las mejores predicciones de los parámetros de la distribución de Weibull fueron alcanzados con el método de factor del patrón de energía en las estaciones de Edmonton City Center Awos y Grande Prairie A. Similarmente, el método empírico de Justus resultó ser el más efectivo en las estaciones de Lethbridge A y Waterton Park Gate.

Por otro lado, una revisión de la literatura acerca de la aplicación de distribuciones de Weibull, de dos y tres parámetros, en análisis relacionados con la energía del viento fue

realizada por Wais (2017). Los análisis utilizaron un rango de velocidades de viento entre 0 y 2 m/s. Luego de la revisión literaria, el autor utilizó datos de medición de viento del noreste de Polonia para calcular y comparar las distribuciones de Weibull de dos y tres parámetros. Los datos disponibles presentaron una frecuencia de 9% de velocidades de viento nulas y una frecuencia de 40% de velocidades en el rango de 0 a 2 m/s. Para el cálculo de los parámetros de Weibull se utilizó el método gráfico. Los resultados mostraron que la distribución de Weibull de tres parámetros se ajusta mejor a las mediciones de viento en comparación con la distribución de Weibull de dos parámetros, ya que la distribución de Weibull de dos parámetros sobrestima la cantidad de energía disponible del viento cuando existe un porcentaje significativo de velocidades de viento nulas en la zona de estudio.

1.1.2. Análisis aerodinámico de perfiles

Un estudio numérico de las características aerodinámicas de perfiles de la serie “S” desarrollados por *NREL* (National Renewable Energy Laboratory [NREL], 2017) fue realizado por Sayed et al. (2012). Dicho estudio tuvo como fin el hallar los perfiles más adecuados para operar en las condiciones de viento de Egipto (velocidad de viento de 11 m/s). Los cálculos del estudio numérico fueron realizados usando un modelo basado en dinámica de fluidos computacional (*CFD*) en dos dimensiones (*2D*). La validación del modelo se realizó mediante la comparación de resultados numéricos y mediciones realizadas en túnel de viento, obteniéndose errores máximos del orden de 11%. Los autores concluyeron que los perfiles S825, S826, S830 y S831 son los más adecuados para aerogeneradores que trabajan con velocidades de viento incidente (V_{∞}) del lugar estudio.

Asimismo, un estudio numérico para mejorar las características aerodinámicas de perfiles, sometidos a condiciones de entrada en pérdida (*stall*), mediante el control pasivo de la capa límite con la utilización de ranuras (*slots*) fue llevado a cabo por Belamadi et al. (2016). El estudio numérico, que fue realizado bajo un enfoque de *CFD*, incluyó el análisis de los

efectos de la localización, ancho y pendiente del *slot*. El perfil S809 fue usado como perfil base. Cuatro modelos de turbulencia tipo Reynolds-Averaged Navier Stokes (*RANS*) fueron usados para la validación del modelo numérico. Dichos modelos fueron $k - \varepsilon$, *Spalart - Allmaras*, $k - \omega$ y *SST* $k - \omega$. Por las características del modelo $k - \varepsilon$, este tuvo que ser tratado con una función de pared estándar en la pared del perfil aerodinámico mientras que los otros modelos de turbulencia fueron tratados con función de pared mejorada. Los resultados numéricos fueron comparados con mediciones experimentales del coeficiente de presión para determinar los errores relativos incurridos. El estudio de independencia de malla del modelo numérico mostró que con una malla de 60 000 elementos se llegó a la convergencia para todos los modelos de turbulencia utilizados. Los autores concluyeron que todos los modelos de turbulencia utilizados muestran buena concordancia con los valores experimentales.

1.1.3. Diseño de álabes de aerogeneradores

Tenguria et al. (2010) diseñaron dos tipos de álabes para un aerogenerador de eje horizontal de 5 kW. El diseño de los álabes se realizó utilizando la teoría de momento del elemento de pala (*BEM*). Dos perfiles aerodinámicos fueron considerados (NACA 4412 y NACA 64₃-218) en el diseño de los dos tipos de álabes. Para el cálculo, los álabes fueron divididos en diez elementos. La relación de los coeficientes de sustentación (C_l) y arrastre (C_d) de los perfiles NACA 4412 y NACA 64₃-218 fueron 108.91 y 71.9, respectivamente. Las simulaciones correspondieron a un número de Reynolds de 3'000 000. Los resultados mostraron que a medida que la razón de velocidad de punta (λ) aumenta, la longitud de la cuerda (c) de los perfiles disminuye. Asimismo, los resultados mostraron que los coeficientes de potencia (C_p) son diferentes para λ igual a 9. Los C_p fueron máximos para los perfiles en las posiciones adimensionales entre 0.3 y 0.6. Los autores concluyeron que la naturaleza del patrón de flujo alrededor de los perfiles aerodinámicos es determinada por Re , el cual afecta a los valores de C_l y C_d .

Un análisis de la eficiencia de tres geometrías distintas de álabes, construidos a partir del perfil NACA 4418 fue llevado a cabo por Hsiao et al. (2013). Dichas geometrías fueron diseñadas con la teoría *BEM* y corresponden a álabes óptimos, álabes con c constante y ángulo de torsión (θ_T) variable, y álabes con c y θ_T constantes. Los álabes fueron diseñados para rotores de aerogeneradores de eje horizontal de 50 W de potencia, V_∞ de 10 m/s, λ de 5 y α de 5.5° . El C_p calculado para los tres tipos de álabes fue comparado con mediciones de túnel de viento. Los resultados de las mediciones en túnel de viento mostraron que el C_p máximo fue 0.428 en $\lambda = 4.92$ y $\lambda = 4.32$ para los álabes óptimo y aquel con θ_T variable, respectivamente. El álabe con θ_T constante tuvo un C_p máximo de 0.21 para $\lambda = 3.86$. Por otro lado, simulaciones *CFD* tridimensionales (3D) fueron realizadas en el software Fluent. Para los C_p máximos, los resultados numéricos de las simulaciones mostraron buena concordancia con las mediciones experimentales.

De esta forma, se puede concluir que los métodos empíricos de Justus, Lysen y el factor del patrón de energía fueron los más efectivos para determinar los parámetros de la función de distribución de Weibull. Por otro lado, la función de distribución de Weibull de tres parámetros se ajustó mejor a las mediciones de velocidades viento y es recomendable cuando la frecuencia de velocidades nulas es mayor al 9%. Otra conclusión derivada de los antecedentes es que los modelos numéricos basados en *CFD* fueron muy usados en el análisis aerodinámico de perfiles, ya que mostraron errores relativamente bajos en comparación con mediciones experimentales. Asimismo, los perfiles NACA fueron muy utilizados en los estudios numéricos. En cuanto al diseño de los álabes de aerogeneradores que funcionan con bajos (menor a 2'000 000) o altos Re , la teoría *BEM* fue muy utilizada conjuntamente con factores de corrección. Dentro de la teoría *BEM*, los parámetros principales son la potencia, V_∞ y λ .

1.2. Realidad problemática

Los aerogeneradores de eje horizontal de baja potencia disponibles en el mercado (**Tabla 1**) son diseñados con perfiles aerodinámicos específicos para operar eficientemente en condiciones de velocidades de viento (punto de diseño) relativamente altas (generalmente mayores a 10 m/s). Notar que dichas velocidades de diseño se encuentran solamente en algunos lugares específicos alrededor del mundo.

Tabla 1

Características de aerogeneradores comerciales de eje horizontal de baja potencia

Modelo	Potencia nominal (W)	Velocidad nominal (m/s)
Black 300	343	9.4
AeroCraft 502	500	9.0
Marlec FM1803-2	850	15.0
Liders 1 KW	1000	12.5
Zonhan ZH1.5	1500	9.0
Zonhan ZH2.0	2000	8.0
Bornay 6000	6000	12.0

Nota. Adaptado de *Black 300, el Aerogenerador Eficiente*, por Delta Volt, 2022, <http://deltavolt.pe/pv-systems/black300>, *Aerogeneradores LIDERS*, por LIDERS, 2022, <http://energiasrenovablesperu.com/aerogeneradores-solares.asp?p=4>, *Aerogeneradores*, por Pro Viento, 2022, <http://proviento.com.pe/aerogeneradores.html>.

En el Campus de la Universidad Nacional del Santa (*UNS*), velocidades de viento incidente menores a 8 m/s son las más frecuentes. Por lo tanto, cuando los aerogeneradores diseñados para trabajar con altas velocidades de viento (mayores a 10 m/s) son utilizados en condiciones

locales como las del Campus de la *UNS* (bajas velocidades), dichos aerogeneradores operan con bajas eficiencias ya que su punto de operación está alejado de su punto de diseño.

La baja eficiencia con la que operan los aerogeneradores (conversión ineficiente de la energía eólica en energía eléctrica) en condiciones de bajas velocidades de viento puede traer consigo el sobredimensionamiento de los equipos que integran la máquina y con ello costos adicionales.

Por otro lado, los aerogeneradores son frecuentemente diseñados con perfiles de la familia NACA, los cuales presentan buenas características aerodinámicas cuando trabajan con altas velocidades de viento incidente. Notar que se vienen estudiando otros perfiles aerodinámicos en los últimos años, los cuales muestran mejores características aerodinámicas para bajas velocidades de viento que los NACA.

Por ello, es necesario estudiar la manera en que se puede mejorar la eficiencia de los aerogeneradores operando en condiciones de bajas velocidades de viento incidente a través del análisis y selección de perfiles aerodinámicos que sean adecuados para dichas condiciones de operación.

1.3. Formulación del problema

Considerando lo antes expuesto, se plantea la siguiente interrogante:

¿Con qué perfil aerodinámico se logrará obtener el diseño óptimo de los aerogeneradores de baja potencia que operan en las condiciones de bajas velocidades de viento incidente del Campus de la *UNS*?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar perfiles aerodinámicos para obtener el diseño óptimo de aerogeneradores de baja potencia de 1, 2.5, 5 y 10 kW para su operación en el Campus de la *UNS*.

1.4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las velocidades y direcciones de viento del Campus de la *UNS*.
- Seleccionar perfiles aerodinámicos usados en aerogeneradores de baja potencia.
- Utilizar una metodología basada en la dinámica de fluidos computacional para el análisis de perfiles aerodinámicos.
- Determinar la geometría óptima de los álabes de aerogeneradores de 1, 2.5, 5 y 10 kW de forma que se maximice su eficiencia.
- Estimar la cantidad de energía generada anualmente por los aerogeneradores diseñados.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

A través del análisis de perfiles aerodinámicos se puede obtener la geometría óptima de los álabes de aerogeneradores de baja potencia para su operación en el Campus de la *UNS*.

1.5.2. Hipótesis específicas

- La frecuencia de velocidades de viento nula es menor al 9%.
- El modelo numérico utilizado para el análisis de perfiles aerodinámicos origina errores relativos menores al 20% en comparación con datos experimentales disponibles en la literatura científica.
- La mayoría de la energía aprovechada por el rotor de los aerogeneradores de baja potencia diseñados proviene mayormente de velocidades de viento incidente menor a 6 m/s.

1.6. Variables e indicadores

1.6.1. Variable independiente e indicadores

La variable independiente es la condición del flujo de viento, ya que esta varía en el rango requerido por los autores. Los indicadores de la variable independiente son:

- Velocidad del viento (V_{∞}).
- Número de Reynolds (Re).
- Ángulo de ataque (α).

1.6.2. Variable dependiente e indicadores

La variable dependiente es la eficiencia aerodinámica del perfil, ya que depende de las condiciones del flujo a los que está sometido el perfil aerodinámico. Los indicadores de la variable dependiente son:

- Coeficiente de sustentación (C_l).

- Coeficiente de arrastre (C_d).
- Coeficiente de potencia (C_p).

1.7. Justificación

El rendimiento aerodinámico de los aerogeneradores de baja potencia depende, en parte, de su geometría (Shen et al., 2016). Por lo tanto, la eficiencia de los aerogeneradores de baja potencia puede aumentar al modificar la geometría de sus álabes como se aprecia en las investigaciones de Elfarra et al. (2013), Saber y Djavareshkian (2014) y Naqvi et al. (2015).

En el Perú, existen investigaciones relacionadas con el análisis de perfiles aerodinámicos (Guillermo, 2006), diseño de aerogeneradores utilizando la teoría *BEM* (Gonzales y Chiroque, 2006) y el análisis aerodinámico de rotores de aerogeneradores mediante técnicas de *CFD* (Cortez, 2014). A pesar de esto, existe la necesidad de continuar los estudios en el área de la eficiencia energética de los perfiles y álabes de aerogeneradores de baja potencia, colocando mayor interés en las condiciones específicas del viento de la zona donde se planea instalar los aerogeneradores.

Consecuentemente, la presente tesis busca complementar investigaciones anteriores, poniendo particular interés en las condiciones de viento del Campus de la *UNS*. Dichas condiciones corresponden a bajas velocidades de viento, las cuales vienen siendo estudiadas con mayor frecuencia desde hace más de una década. Como resultado de esta tesis se espera que los álabes de los aerogeneradores estudiados sean más eficientes y generen mayor energía operando en las condiciones de viento del Campus de la *UNS*.

Los beneficios relacionados con el desarrollo del presente trabajo son:

- **Técnico.** Aumento de la eficiencia de los álabes de aerogeneradores de baja potencia.
- **Económico.** Relacionado directamente con el aumento de la eficiencia de los álabes.

- **Ambiental.** Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero ante la posibilidad de cambio tecnológico.

1.8. Limitaciones del trabajo

El presente trabajo involucra el diseño de los álabes de aerogeneradores de eje horizontal de 1, 2.5, 5 y 10 kW de potencia. Dichos diseños se efectuarán utilizando la teoría *BEM* conjuntamente con factores de corrección. Asimismo, dichos diseños se realizarán utilizando las condiciones de flujo de viento del Campus de la *UNS*.

Las condiciones de viento del Campus de la *UNS* se evaluarán solamente en base a datos de mediciones de viento realizadas durante el año 2015. Notar que las velocidades promedio anuales de viento se mantienen casi invariables año a año, por ello, es indistinto el año de estudio.

El proceso de simulación numérica involucrará solamente a los perfiles NACA 2412, NACA 4412, E387, S1223, SD7032 y FX63-137. Dichas simulaciones se realizarán con perfiles en 2D utilizando un modelo de turbulencia tipo *RANS* incorporado dentro del software comercial Ansys v17.1.

Asimismo, dichas simulaciones serán realizadas considerando solamente el enfoque aerodinámico en estado estacionario. No se consideraron rugosidades en la superficie de los perfiles simulados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo las ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos son inicialmente descritas conjuntamente con el modelo de turbulencia tipo *RANS* utilizado. El modelamiento del perfil aerodinámico mediante técnicas de *CFD* es también presentado. Finalmente, la formulación utilizada para el diseño de álabes de aerogeneradores de baja potencia es detallada.

2.1. Energía eólica

Es la energía que porta el viento y depende de la velocidad de este. Para el aprovechamiento de la energía eólica se usan generalmente aerobombas y aerogeneradores, los cuales sirven para bombear agua y generar energía eléctrica, respectivamente.

2.2. Ley exponencial de Hellmann

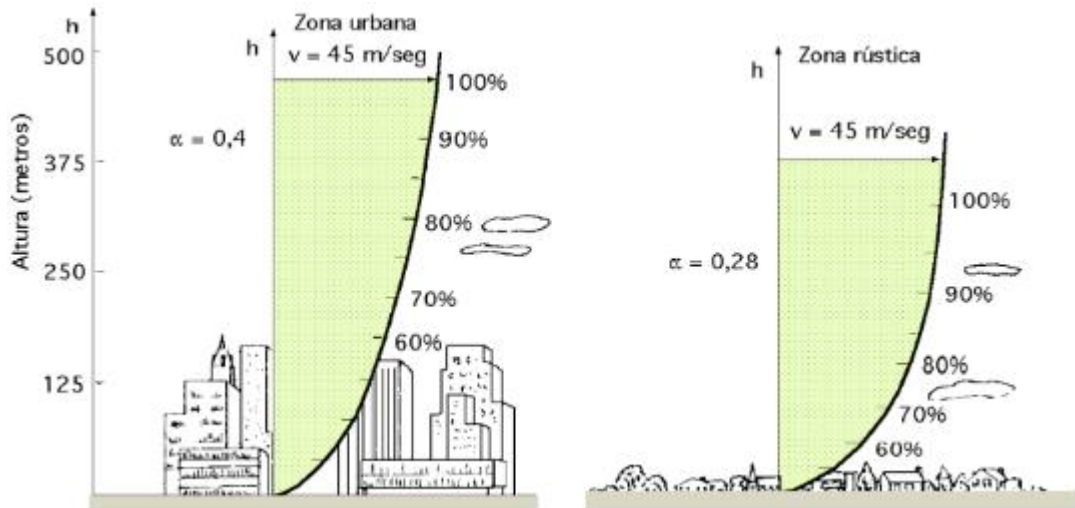
En la **Figura 1** se observa que el viento describe un perfil de velocidades que varía en función de la altura y de la rugosidad del terreno (cantidad de obstáculos). Mediante la Ley exponencial de Hellmann (Fernández, 1993) es posible calcular las velocidades del viento a diferentes alturas, a partir de la medición de velocidades a una determinada altura, con la siguiente ecuación:

$$V_h = V_z \left(\frac{h}{z} \right)^\epsilon \quad (1)$$

En la Ecuación (1), V_h representa la velocidad del viento calculada a la altura de interés h medida, V_z es la velocidad del viento medida a la altura z y ϵ es el exponente de Hellmann, el cual varía con la rugosidad del terreno.

Figura 1

Variación de la velocidad del viento con la altura sobre el nivel del terreno



Nota. Tomado de *Energía Eólica*, por P. Fernández, 1993, Servicio Publicaciones E.T.S.I. Industriales y T.

2.3. Distribución de Weibull

La función de densidad de probabilidad de la velocidad del viento está dada por la distribución de Rayleigh o Weibull. La función de densidad de probabilidad de Weibull $h_w(V_0)$ incluye correcciones relacionadas con las características del lugar de estudio que son modeladas con los factores de escala S y forma k (Hansen, 2015).

La estimación de los parámetros k y S se realiza con el método de máxima probabilidad, el cual es usado cuando se dispone de datos de velocidades de viento tabulados en series temporales. Así, los parámetros k y S se calculan (Seguro y Lambert, 2000):

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln v_i}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln v_i}{n} \right)^{-1} \quad (2)$$

$$S = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^k \right)^{1/k} \quad (3)$$

En las Ecuaciones (2) - (3), v_i es la velocidad de viento de la serie temporal i y el número de mediciones de velocidades de viento distintas de cero es representado por n .

Con los parámetros calculados y la función gamma (Γ) es posible hallar la velocidad de viento promedio (\bar{v}) con la ecuación:

$$\bar{v} = S \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (4)$$

La formulación relativa a la función de densidad de probabilidad de Weibull es tomada de Hansen (2015) y detallada a continuación:

$$h_w(V_0) = \frac{k}{S} \left(\frac{V_0}{S} \right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V_0}{S}\right)^k\right) \quad (5)$$

La probabilidad f de que la velocidad de viento este dentro del rango entre V_i y V_{i+1} es:

$$f(V_i < V_0 < V_{i+1}) = \exp\left(-\left(\frac{V_i}{S}\right)^k\right) - \exp\left(-\left(\frac{V_{i+1}}{S}\right)^k\right) \quad (6)$$

Utilizando la formulación anterior y la curva de potencia de un aerogenerador, la Producción Anual de Energía (PAE) es estimada con:

$$PAE = \sum_{i=1}^{Q-1} \frac{1}{2} (P(V_{i+1}) + P(V_i)) \cdot f(V_i < V_0 < V_{i+1}) \cdot 8760 \quad (7)$$

En la Ecuación (7), Q es el número de intervalos de división de las velocidades de viento de la zona estudiada y $P(V_i)$ representa la potencia de salida del aerogenerador sometido a la velocidad de viento V_i .

2.4. Aerogeneradores

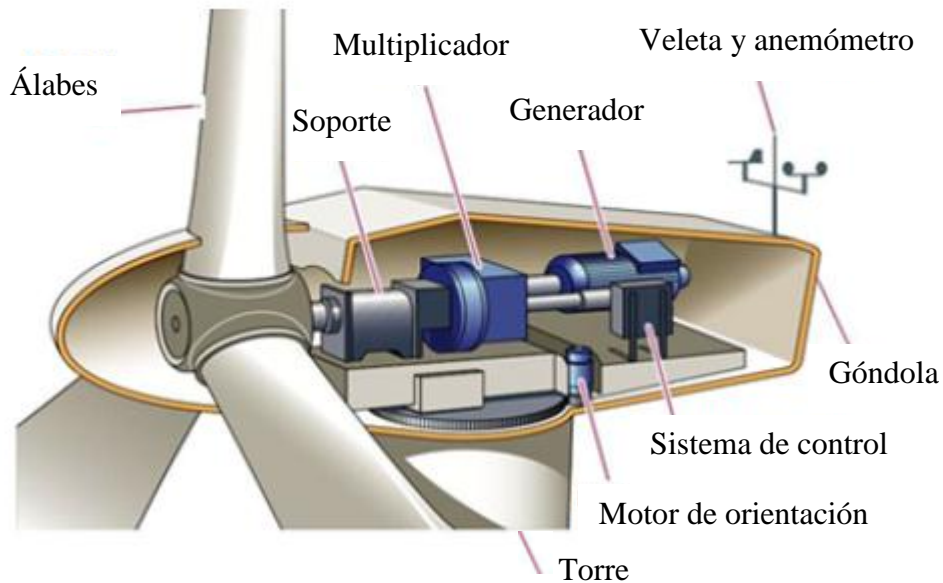
Según la posición de su eje, los aerogeneradores se clasifican como eje vertical y horizontal, presentando mayor eficiencia estos últimos al trabajar en condiciones de flujo de viento libre.

Las partes principales de los aerogeneradores de eje horizontal se presentan en la **Figura 2**. La torre es la que soporta a todo el sistema rotor-generator. Los álabes transforman la energía eólica del viento en energía mecánica transmitida en el eje del rotor, el cual está sustentado por un soporte. El multiplicador aumenta el número de revoluciones del eje del rotor hasta el rango de revoluciones con el que trabaja el generador eléctrico. El generador transforma la energía mecánica en energía eléctrica.

El aerogenerador cuenta también con una veleta y un anemómetro, ubicados sobre la góndola, los cuales miden la dirección y velocidad del viento, respectivamente. El motor de orientación sirve para ubicar el frente del rotor en la dirección del viento. Asimismo, cuando las velocidades del viento son altas y pueden llegar a dañar los álabes, el motor de orientación desvía el frente del rotor de la dirección del viento.

Figura 2

Partes principales de un aerogenerador de eje horizontal



Nota. Adaptado de *Sistema de Control para Aerogeneradores Empleando Lógica Difusa*, por M. B. Lopez, D. F. Leal, S. Y. Lemos, 2015, Difu100@ Revista en Ingeniería y Tecnología, UAZ.

2.5. Ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos

Las ecuaciones gobernantes del flujo de un fluido Newtoniano compresible en estado transitorio con transferencia de calor son las siguientes (Versteeg y Malalasekera, 2007):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx} \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My} \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{ grad } w) + S_{Mz} \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i \mathbf{u}) = -p \text{ div } \mathbf{u} + \text{div}(\kappa \text{ grad } T) + \Phi + S_i \quad (12)$$

Las Ecuaciones (8) - (12) representan la continuidad, momento en x , y , z y energía, respectivamente. En dichas ecuaciones, ρ es la densidad, \mathbf{u} representa el vector de velocidad, p es la presión, u , v y w son los componentes de velocidad en los ejes x , y y z , respectivamente. También, μ representa la viscosidad dinámica, S_{Mx} , S_{My} , S_{Mz} son los términos fuente de momento en los ejes x , y y z , respectivamente. Asimismo, i es la energía interna específica, κ es la conductividad térmica, T es la temperatura, Φ es la función de disipación y S_i es el término fuente de energía interna.

La ecuación de energía no fue utilizada en la presente tesis ya que no se considera transferencia de calor hacia o desde el fluido. Por otro lado, el fluido fue considerado incompresible ($\rho = \text{cte}$) ya que presenta un número de Mach menor a 0.1. Notar que solamente se simuló perfiles en $2D$, por ello, las ecuaciones anteriores se simplificarán.

Las formulaciones desarrolladas para capturar los efectos de la turbulencia se agrupan en tres categorías, Reynolds-Averaged Navier-Stokes (*RANS*), Large Eddy Simulation (*LES*) y Direct Numerical Simulation (*DNS*) (Versteeg y Malalasekera, 2007). En esta tesis se usó la formulación tipo *RANS* para la obtención de los resultados numéricos, ya que dicha formulación requiere menos recursos computacionales que las formulaciones *LES* y *DNS*.

Usando la descomposición de Reynolds se obtienen las ecuaciones gobernantes en la formulación *RANS*. Así, las Ecuaciones (8) a (11) son representadas para flujo incompresible $2D$ en estado estacionario como:

$$\operatorname{div} \mathbf{U} = 0 \quad (13)$$

$$\operatorname{div}(U\mathbf{U}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \operatorname{div}(\operatorname{grad} U) + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial (-\rho \overline{u'^2})}{\partial x} + \frac{\partial (-\rho \overline{u'v'})}{\partial y} \right] \quad (14)$$

$$\operatorname{div}(V\mathbf{U}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \operatorname{div}(\operatorname{grad} V) + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial (-\rho \overline{v'^2})}{\partial y} + \frac{\partial (-\rho \overline{u'v'})}{\partial x} \right] \quad (15)$$

En estas ecuaciones, \mathbf{U} representa el vector de velocidad promedio, P es la presión promedio, U , V y W representan, respectivamente, los componentes de velocidad promedio en los ejes x , y y z , ν es la viscosidad y u' , v' y w' son los componentes de velocidad fluctuante en los ejes x , y y z , respectivamente.

En las Ecuaciones (13) - (15) aparecen los tensores de Reynolds, por ello, dicho sistema de ecuaciones no es cerrado. Por lo tanto, es necesario proporcionar modelos de turbulencia para dichos tensores.

2.6. Modelo de turbulencia

Los modelos de turbulencia necesarios para cerrar el sistema dado por las ecuaciones anteriores se clasifican según el número de ecuaciones de transporte adicionales que necesitan ser resueltas (cero ecuaciones, una ecuación, dos ecuaciones, etc).

Versteeg y Malalasekera (2007) afirman que los modelos de turbulencia adecuados para aplicaciones de aerodinámica externa son Spalart-Allmaras, $k - \omega$ y $SST k - \omega$. El modelo de turbulencia utilizado en esta tesis es $SST k - \omega$, ya que logra una buena precisión en la predicción de la capa límite con gradiente de presión adverso, el cual es encontrado en las paredes de perfiles aerodinámicos. El modelo $SST k - \omega$ incluye dos ecuaciones de transporte, una para la energía cinética turbulenta (k) y la otra para la tasa de disipación turbulenta (ω). La formulación del modelo $SST k - \omega$ que trae incorporado el software Ansys Fluent v17.1 (Ansys, 2017) se muestra a continuación:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (16)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (17)$$

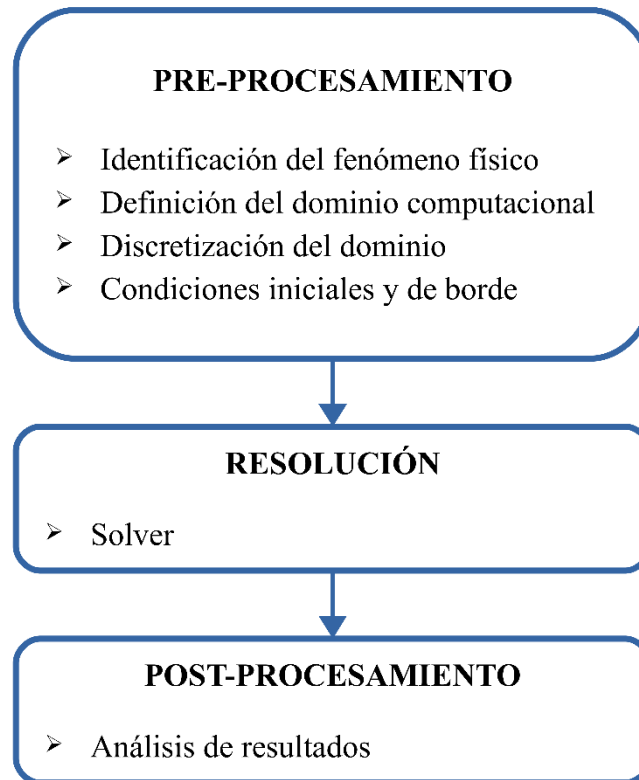
Las Ecuaciones (16) - (17) representan las ecuaciones de transporte para k y ω , respectivamente. En dichas ecuaciones, Γ_k y Γ_ω son las difusividades efectivas de k y ω , G_k y G_ω representan la generación de k y ω , Y_k y Y_ω son las disipaciones de k y ω , y S_k y S_ω son los términos fuente de k y ω .

2.7. Dinámica de fluidos computacional (CFD)

La dinámica de fluidos computacional (CFD) comprende el análisis de los sistemas que involucran al flujo de fluidos, transferencia de calor, reacciones químicas, etc., por medio de la simulación computacional de dichos fenómenos (Versteeg y Malalasekera, 2007). La formulación de los modelos numéricos utilizados en CFD depende de las asunciones tomadas, como por ejemplo, fluido incompresible, bajos números de Reynolds, fluido newtoniano, etc. Las simulaciones CFD siguen generalmente el esquema de la **Figura 3**, donde se distinguen tres etapas: pre-procesamiento, resolución y post-procesamiento.

Figura 3

Esquema de modelamiento CFD



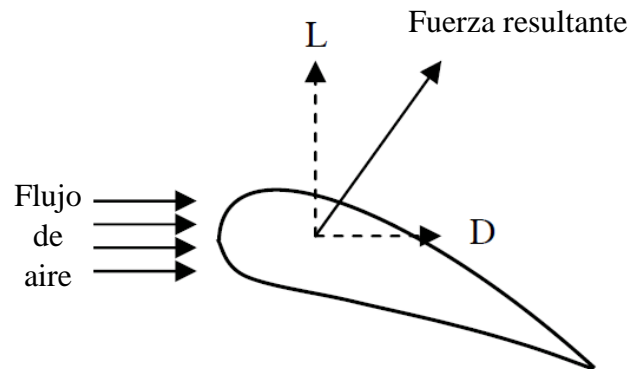
2.6.1. Pre-procesamiento

2.6.1.1. Identificación del fenómeno físico

El fenómeno físico que será simulado es el flujo de aire que pasa alrededor de un perfil aerodinámico. Dicho fluido genera fuerzas de reacción al interactuar con la superficie del perfil aerodinámico conocidas como fuerza de sustentación (L) y arrastre (D) y la suma de ellas produce una fuerza resultante como se ilustra en la **Figura 4**.

Figura 4

Fuerzas de sustentación y arrastre en un perfil



Nota. Adaptado de *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*, por S. Mathew, 2006, Springer.

Con las fuerzas de la **Figura 4**, se calculan los coeficientes de sustentación (C_l) y arrastre (C_d) con la siguiente formulación:

$$C_l = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho AV_{rel}^2} \quad (18)$$

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho AV_{rel}^2} \quad (19)$$

Donde ρ es la densidad, A representa el área de la superficie del perfil y V_{rel} es la velocidad relativa del fluido.

2.6.1.2. Definición del dominio computacional

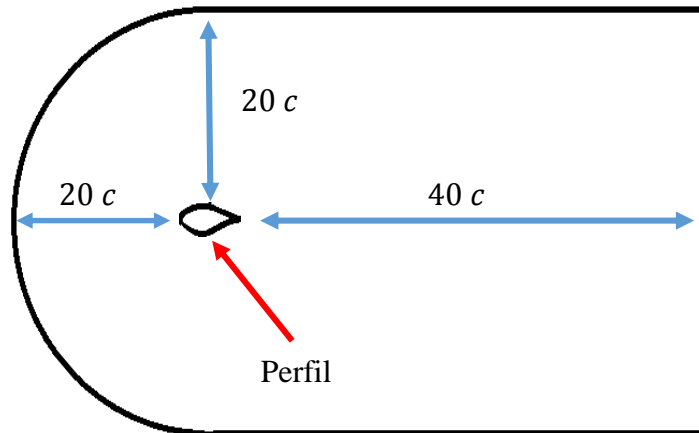
Dentro del dominio computacional $2D$ se incluye la geometría del perfil aerodinámico, la cual se construyó a partir de sus coordenadas cartesianas. Dichas coordenadas fueron obtenidas de Airfoil Tools (2022).

A pesar de que el espesor mínimo del borde de fuga de un perfil aerodinámico debe ser 0.25% de la cuerda para que sea factible su construcción (Grasso, 2011), el modelo numérico utilizado en la presente tesis se construyó con borde de fuga afilado con el fin de simplificar la geometría del perfil y evitar problemas con el software.

En la literatura científica se recomienda que los bordes del dominio computacional estén alejados del perfil aerodinámico, ya que es necesario que el flujo de aire que es perturbado por el perfil aerodinámico recupere las condiciones correspondientes a la entrada del flujo. Por ello, la entrada del flujo de aire se encuentra a una distancia de 20 veces la cuerda del perfil ($20 c$) como se aprecia en la **Figura 5**, la salida está posicionada a $40 c$ y los bordes superior e inferior del dominio están ubicados a $20 c$ del perfil aerodinámico. Dichas dimensiones son similares a lo utilizado por Belamadi et al. (2016).

Figura 5

Dominio computacional 2D



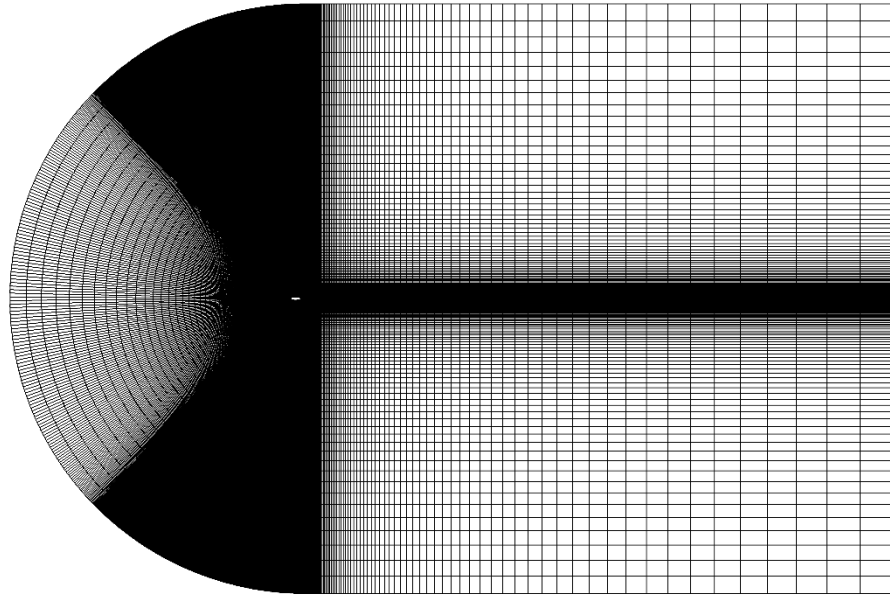
Nota. Tomado de *Estudio numérico del comportamiento aerodinámico de los álabes de un aerogenerador de 10 kW para mejorar su eficiencia* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería], por C. V. Rodriguez, 2019, Alicia.

2.6.1.3. Discretización del dominio

El dominio computacional y su discretización espacial fueron realizadas usando el software Icem-CFD. Se utilizó una malla estructurada (**Figura 6**) para la discretización, ya que dicha malla provee soluciones con mayor calidad utilizando menos celdas en comparación con mallas no estructuradas (Ansys, 2010a). Asimismo, la malla estructurada es de tipo C, la cual permite un rápido cambio de la dirección de ingreso de viento sin tener que cambiar la geometría de la malla (Mauro et al., 2017).

Figura 6

Malla estructurada tipo C utilizada en las simulaciones numéricas 2D



Nota. Tomado de Estudio numérico del comportamiento aerodinámico de los álabes de un aerogenerador de 10 kW para mejorar su eficiencia [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería], por C. V. Rodríguez, 2019, Alicia.

Para captar los gradientes de presión cercanos a la pared del perfil se trabajó con una distancia adimensional a la pared de aproximadamente 1 ($y^+ \approx 1$). Para el cálculo de la altura de la primera celda cercana a la pared del perfil (y), se utilizó la formulación empírica de Schlichting (1979), aplicable a placas planas lisas con $Re < 10^9$:

$$y = \frac{y^+ \mu}{\rho u_*} \quad (20)$$

Siendo:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (21)$$

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho V_{rel}^2 \quad (22)$$

$$C_f = \frac{1}{[2 \log_{10}(Re) - 0.65]^{2.3}} \quad (23)$$

$$Re = \frac{\rho V_{rel} c}{\mu} \quad (24)$$

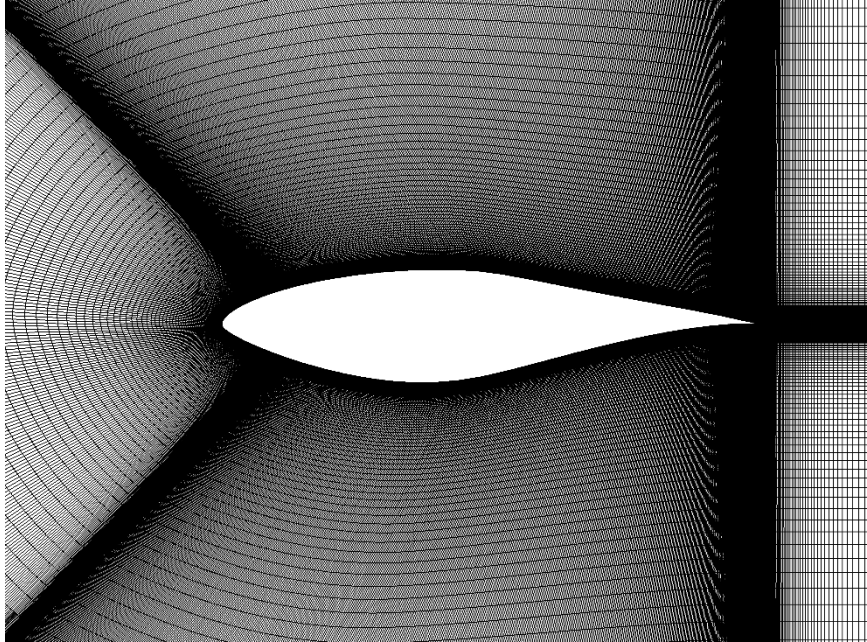
Dentro de las Ecuaciones (20) - (24), Re representa el número de Reynolds, c es la cuerda del perfil aerodinámico, C_f es el coeficiente de fricción local, τ_w representa la tensión cortante y u_* es la velocidad de fricción.

Con estas ecuaciones se calculó una altura de la primera celda cercana a la pared del orden de 0.01 mm. Para lograr el cálculo adecuado de los gradientes que actúan en la zona de la capa límite (adyacente a la pared del perfil) se considera una región con 20 filas de celdas, en la cual los elementos de malla aumentan de tamaño a medida que se alejan de la pared con una tasa de crecimiento de 1.1, similar al trabajo de Belamadi et al. (2016). Dicha región de la malla es llamada *inflation* dentro del software Ansys.

Los detalles de la malla cercana al perfil aerodinámico son mostrados en la **Figura 7**, donde se aprecia que la malla más densa está ubicada alrededor del perfil y también en las regiones cercanas al borde de ataque y borde de fuga. Ello se debe a la transición suave entre los elementos de los distintos sectores, el cual debe ser mostrado por la malla para evitar errores numéricos durante su resolución.

Figura 7

Detalle de la malla cercana al perfil aerodinámico

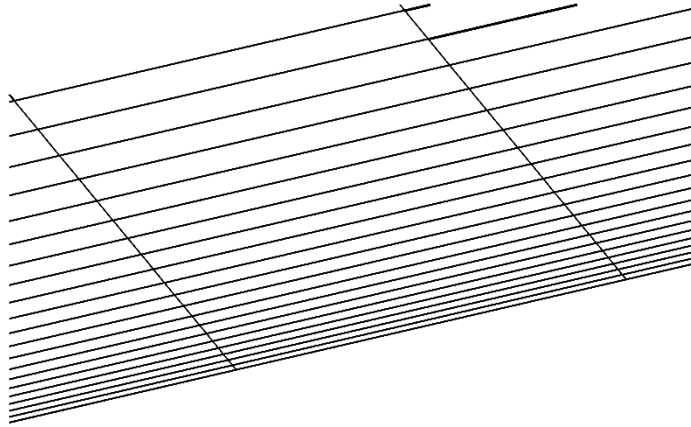


Nota. Tomado de *Estudio numérico del comportamiento aerodinámico de los álabes de un aerogenerador de 10 kW para mejorar su eficiencia* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería], por C. V. Rodríguez, 2019, Alicia.

En la región de *inflation* (**Figura 8**) es notorio el crecimiento de las celdas en la dirección de la pared del perfil hacia el borde exterior del dominio computacional.

Figura 8

Detalle de la región de la malla llamada inflation



Nota. Tomado de *Estudio numérico del comportamiento aerodinámico de los álabes de un aerogenerador de 10 kW para mejorar su eficiencia* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería], por C. V. Rodríguez, 2019, Alicia.

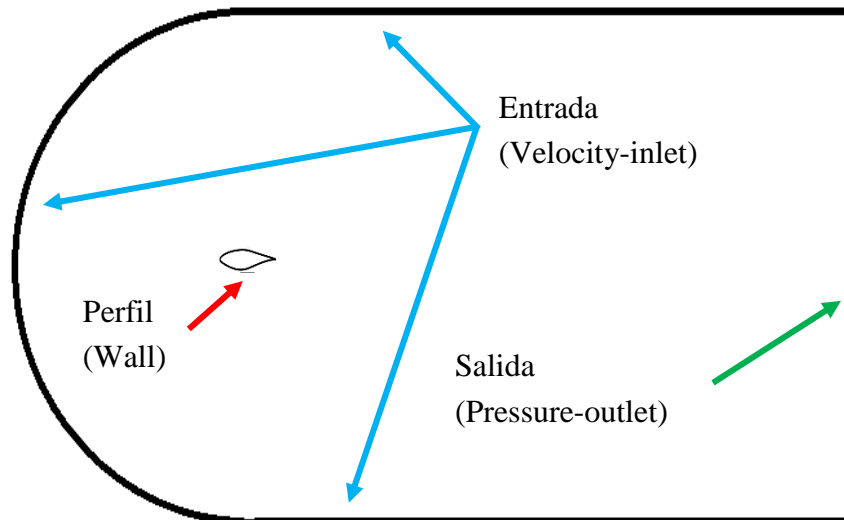
2.6.1.4. Condiciones iniciales y de borde

Las propiedades del aire utilizado en la simulación numérica son tomados a 1 atmósfera de presión y temperatura de referencia de 15 °C (altitud de 0 m.s.n.m.) para lo cual corresponde una ρ de 1.225 kg/m³ y μ de 1.7894 x 10⁻⁵ kg/m.s.

Se utilizaron tres tipos de condiciones a los bordes en el dominio computacional: *velocity – inlet* (flujo de aire en la entrada), *pressure – outlet* (flujo de aire en la salida), *wall* (superficie del perfil aerodinámico). Los bordes del dominio computacional donde se impusieron las condiciones mencionadas se visualizan en la **Figura 9**. Los detalles de las condiciones de borde impuestas pueden ser encontrados en Ansys (2010b).

Figura 9

Condiciones de borde impuestas



Nota. Tomado de *Estudio numérico del comportamiento aerodinámico de los álabes de un aerogenerador de 10 kW para mejorar su eficiencia* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería], por C. V. Rodríguez, 2019, Alicia.

2.6.2. Resolución

Se usó el solver Ansys Fluent versión 17.1 (Ansys, 2017) para la resolución de las ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos descritas anteriormente. Las simulaciones numéricas fueron realizadas con un solver tipo Pressure-Based y en estado estacionario. El modelo de turbulencia $SST\ k - \omega$ fue configurado con sus constantes por defecto. Asimismo, el esquema SIMPLE fue usado ya que permite una convergencia relativamente rápida y estable en la simulación de este tipo de fenómenos (Fluent, 2017). Por otro lado, el esquema Upwind de segundo orden fue utilizado para la discretización espacial de las ecuaciones gobernantes ya que ofrece una precisión aceptable.

2.6.3. Post-procesamiento

Esta etapa corresponde al análisis cualitativo y cuantitativo de los resultados de las variables de presión y velocidad del flujo de viento alrededor de los perfiles aerodinámicos. Por medio de este análisis se puede verificar la validez de los resultados numéricos al compararlos con las mediciones experimentales encontradas en la literatura científica. Dicha verificación se hace por medio del Relative Root Mean Square Error (RRMSE), el cual es calculado como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (25)$$

$$RRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}} \times 100 \quad (26)$$

Donde y_i es el valor medido, \hat{y}_i es el valor pronosticado por el modelo numérico, y \bar{y} es el promedio de los valores medidos. Notar que n representa el número de mediciones.

2.8. Teoría de momento del elemento de pala (*BEM*)

Con la teoría *BEM* es posible calcular las fuerzas de sustentación, arrastre, empuje, la potencia de los álabes de un aerogenerador que trabaja con diferentes velocidades de viento incidente, y su eficiencia aerodinámica (Hansen, 2015). Dichas variables son calculadas a partir de los coeficientes aerodinámicos del perfil con el que son diseñados los álabes de los aerogeneradores de eje horizontal.

El procedimiento utilizado en la presente tesis para el diseño de los álabes del rotor de un aerogenerador de eje horizontal, es una adaptación de la teoría *BEM* y se encuentra detallada en Manwell et al. (2009). A continuación se explica el procedimiento de diseño referido:

Se escoge la potencia P que tendrá el aerogenerador en el punto de diseño (velocidad de viento, V_∞), un coeficiente de potencia C_p probable y una eficiencia de conversión mecánica-eléctrica $\eta_{mec-elect}$. Dicha eficiencia está relacionada con las pérdidas en la transmisión y

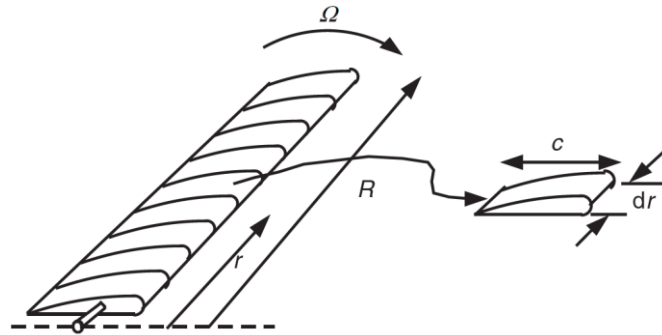
conversión mecánica y la generación eléctrica. Con los parámetros mencionados se calcula el radio del rotor del aerogenerador R :

$$R = \sqrt{\frac{P}{0.5 C_p \rho \eta_{mec-elect} \pi V_\infty^3}} \quad (27)$$

Para la generación eléctrica, la relación de velocidad de punta λ se estima en el rango $4 < \lambda < 10$ y el número de álabes del aerogenerador B toma el valor de 3 generalmente. Asimismo, se escoge el coeficiente de sustentación de diseño $C_{l,dis}$ y el ángulo de ataque de diseño α_{dis} del perfil aerodinámico seleccionado. El α_{dis} escogido corresponde al punto de máxima eficiencia del perfil aerodinámico (máximo C_l/C_d). Se divide el álabe en N elementos (**Figura 10**) y se estiman los parámetros geométricos de cada elemento (**Figura 11**) ubicando cada punto medio a la distancia r_i del eje:

Figura 10

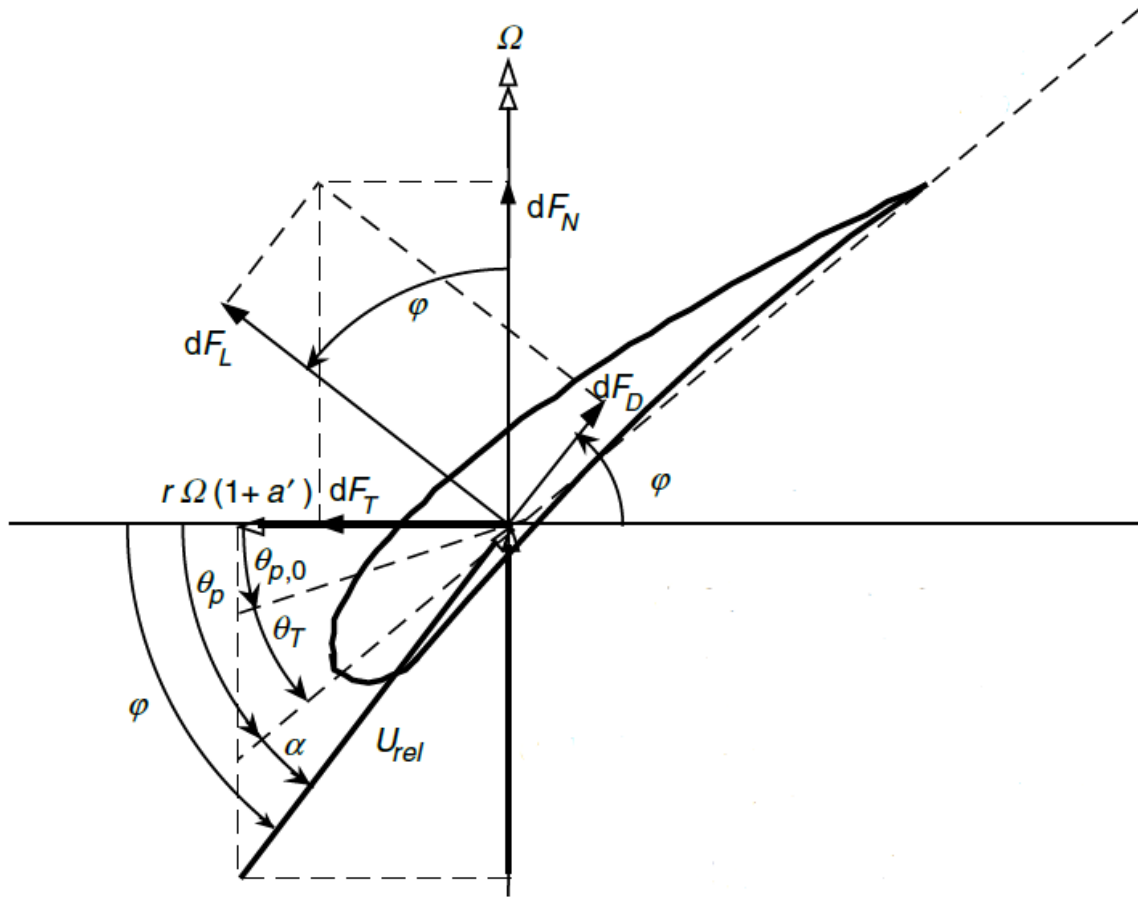
División del álabe del aerogenerador en elementos



Nota. Tomado de Wind energy explained: theory design and application, por J. F. Manwell, 2009, Wiley.

Figura 11

Ángulos y fuerzas de un elemento del álabe de un aerogenerador



Nota. Tomado de *Wind energy explained: theory design and application*, por J. F. Manwell, 2009, Wiley.

$$\lambda_{r,i} = \frac{\lambda r_i}{R} \quad (28)$$

$$\phi_i = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_{r,i}} \right) \quad (29)$$

$$c_i = \frac{8\pi r_i}{B C_{l,dis,i}} (1 - \cos \phi_i) \quad (30)$$

$$\theta_{p,i} = \phi_i - \alpha_{dis,i} \quad (31)$$

$$\theta_{T,i} = \theta_{p,i} - \theta_{p,0} \quad (32)$$

En las Ecuaciones (28) - (32), $\lambda_{r,i}$ es la relación de velocidad de punta local, ϕ_i representa el ángulo de la velocidad relativa, c_i es la cuerda de cada elemento, $\theta_{p,i}$ es el ángulo de paso local, $\theta_{p,0}$ representa el ángulo de paso del álabe y $\theta_{T,i}$ es el ángulo de torsión de cada elemento, también llamado ángulo *twist*.

Mediante un proceso iterativo se calculan los valores del factor de inducción axial (a) y tangencial (a') de cada elemento del álabe. Los valores iniciales de a y a' se calculan con:

$$\sigma'_{dis,i} = \frac{B c_i}{2\pi r_i} \quad (33)$$

$$\phi_{i,1} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_{r,i}} \right) \quad (34)$$

$$a_{i,1} = \frac{1}{\left[1 + \frac{4 \sin^2 \phi_{i,1}}{\sigma'_{dis,i} C_{l,dis,i} \cos \phi_{i,1}} \right]} \quad (35)$$

$$a'_{i,1} = \frac{1 - 3 a_{i,1}}{4 a_{i,1} - 1} \quad (36)$$

Donde $\sigma'_{dis,i}$ es la solidez local. El ángulo de flujo ϕ_{ij} y el factor de pérdida de punta F_{ij} se calculan a partir de:

$$\phi_{ij} = \tan^{-1} \left[\frac{1 - a_{ij}}{(1 + a'_{ij}) \lambda_{r,i}} \right] \quad (37)$$

$$F_{ij} = \left(\frac{2}{\pi} \right) \cos^{-1} \left[\exp \left(- \left\{ \frac{(B/2)[1 - (r_i/R)]}{(r_i/R) \sin \phi_{i,j}} \right\} \right) \right] \quad (38)$$

Con los datos de los perfiles aerodinámicos se determinan sus coeficientes $C_{l,ij}$ y $C_{d,ij}$:

$$\alpha_{ij} = \phi_{ij} - \theta_{p,i} \quad (39)$$

Después de actualizar el valor de a , el coeficiente de empuje local $C_{T,ij}$ se calcula con:

$$C_{T,ij} = \frac{\sigma'_i (1 - a_{ij})^2 (C_{l,ij} \cos \phi_{ij} + C_{d,ij} \sin \phi_{ij})}{\sin^2 \phi_{ij}} \quad (40)$$

Luego, si $C_{T,ij} < 0.96$, entonces:

$$a_{i,j+1} = \frac{1}{\left[1 + \frac{4F_{ij} \sin^2 \phi_{ij}}{\sigma'_i C_{l,ij} \cos \phi_{ij}}\right]} \quad (41)$$

Caso contrario, si $C_{T,ij} > 0.96$:

$$a_{ij} = \left(\frac{1}{F_{ij}}\right) \left[0.143 + \sqrt{0.0203 - 0.6427(0.889 - C_{T,ij})}\right] \quad (42)$$

Finalmente, el valor de a' es actualizado:

$$a'_{i,j+1} = \frac{1}{\left[\frac{4F_{ij} \cos \phi_{ij}}{\sigma'_i C_{l,ij}} - 1\right]} \quad (43)$$

Si la diferencia entre los valores de a y a' de la iteración j y la iteración $j + 1$ están por debajo de cierta tolerancia asignada por el usuario, el proceso iterativo finaliza. En caso contrario se repite el proceso usando las Ecuaciones (37) a (43).

Al finalizar el proceso iterativo, el C_p es calculado:

$$C_p = \frac{8}{\lambda N} \sum_{i=k}^N F_i \sin^2 \phi_i (\cos \phi_i - \lambda_{r,i} \sin \phi_i) (\sin \phi_i + \lambda_{r,i} \cos \phi_i) \left[1 - \left(\frac{C_{d,i}}{C_{l,i}}\right) \cot \phi_i\right] \lambda_{r,i}^2 \quad (44)$$

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente capítulo, los materiales y métodos usados en la presente tesis son presentados. Estos incluyen a los recursos humanos, materiales, equipos y servicios, y la metodología de investigación.

3.1. Recursos humanos

3.1.1. Autor

- MSc. Christian Vladimir Rodriguez Díaz.

3.1.2. Asesor

- MSc. Amancio Ramiro Rojas Flores.

3.2. Materiales, equipos y servicios

3.2.1. Materiales

- Material de escritorio.
- Artículos de revistas.
- Libros.
- Tesis.

3.2.2. Equipos

- Una laptop Intel Core i5, 4 GB de memoria RAM.

3.2.3. Servicios

- Telefonía.
- Internet.
- Impresión.

3.3. Metodología de la investigación

3.3.1. Tipo de investigación

- Según el objeto de estudio: Investigación aplicada.
- Según el nivel de profundización: Investigación descriptiva.

3.3.2. Metodología

En la presente tesis se analizaron seis tipos de perfiles aerodinámicos, los cuales pertenecen a las familias descritas en las siguientes secciones. Asimismo, en las siguientes secciones se describe el procedimiento que se siguió para el cumplimiento de los objetivos planteados y las herramientas informáticas necesarias para el procesamiento de la información.

3.3.2.1. Población

Perfiles aerodinámicos de las familias NACA 24XX, NACA 44XX, Eppler EXXX, Selig SXXXX, Selig SDXXXX y Wortmann FX63-XXX.

3.3.2.2. Muestra

De toda la gama de perfiles aerodinámicos existentes en la literatura científica, se evaluarán los descritos a continuación:

- **Perfil aerodinámico NACA 2412:** Es un perfil delgado, lo cual es favorable cuando se trabaja con bajos Re . Tiene un espesor máximo del 12% en la ubicación a 30% de su cuerda y máxima curvatura de 2% a 40% de su cuerda.
- **Perfil aerodinámico NACA 4412:** Este perfil ha sido utilizado en varias tesis en el Perú, ya que presenta buenas características aerodinámicas. Tiene un espesor máximo del 12% en la ubicación a 30% de su cuerda y máxima curvatura de 4% a 40% de su cuerda.
- **Perfil aerodinámico E387:** Perfil diseñado para operar con bajos Re . Tiene un espesor máximo del 9.1% en la ubicación a 31.1% de su cuerda y máxima curvatura de 3.2% a 44.8% de su cuerda.
- **Perfil aerodinámico S1223:** Es un perfil con gran curvatura, lo cual aumenta su C_l . Tiene un espesor máximo del 12.1% en la ubicación a 19.8% de su cuerda y máxima curvatura de 8.1% a 49% de su cuerda.
- **Perfil aerodinámico SD7032:** Fue diseñado para trabajar con bajos Re menores a 5×10^5 . Tiene un espesor máximo del 10% en la ubicación a 26.6% de su cuerda y máxima curvatura de 3.4% a 45.1% de su cuerda.
- **Perfil aerodinámico FX63-137:** Este perfil presenta las mejores características aerodinámicas para las condiciones de operación descritas en la investigación de Sayed, Kandil y Shaltot (2012), las cuales corresponden a bajos Re . Tiene un espesor máximo del 13.7% en la ubicación a 30.9% de su cuerda y máxima curvatura de 6% a 53.3% de su cuerda.

3.3.2.3. Procedimiento

- Análisis de frecuencia de las velocidades de viento del Campus de la *UNS*.
- Verificación del modelo numérico utilizado en la simulación de los perfiles.
- Cálculo de los coeficientes aerodinámicos de los perfiles.

- Elección del perfil aerodinámico con la mejor relación de sustentación/arrastre.
- Análisis cuantitativo y cualitativo del perfil elegido.
- Diseño de los álabes de los aerogeneradores de 1, 2.5, 5 y 10 kW con el perfil elegido.
- Cálculo de la energía generada por los álabes diseñados.

3.3.2.4. Procesamiento de información

El procesamiento de información y cálculos necesarios para la realización de la presente tesis fue realizado con los softwares:

- **Excel.** Análisis estadístico de frecuencia de velocidades de viento.
- **Ansys.** Simulación numérica del fluido que pasa alrededor de los perfiles.
- **Matlab.** Diseño del álabe.
- **Autocad.** Modelamiento de perfiles y álabes.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo, la evaluación del recurso eólico del Campus de la *UNS* fue inicialmente llevado a cabo. Después, el modelo numérico utilizado para simular los perfiles aerodinámicos fue verificado a través de comparaciones con datos experimentales disponibles en la literatura. Luego, la simulación y comparación de los perfiles llevó a la determinación del mejor de ellos, con el cual se diseñaron los álabes de los aerogeneradores de 1, 2.5, 5 y 10 kW. Finalmente, las curvas de potencia y energía de los aerogeneradores fueron estimadas para distintas velocidades de viento incidente.

4.1. Resultados

4.1.1. Evaluación del recurso eólico

Para la evaluación del recurso eólico se procesaron las mediciones de dirección y velocidad de viento realizadas en el Campus de la *UNS* a una altura de 10 m.s.n.s. Dichas mediciones fueron realizadas cada 10 minutos con un anemómetro durante el periodo 01/01/2015 - 31/12/2015 y registradas automáticamente en el Data Logger SymphoniePLUS3 por el MSc. Amancio Ramiro Rojas Flores. Las velocidades horarias de viento (promediado) son mostradas en el **Anexo 1**. Los datos de direcciones de viento promedio horario o diario no son mostrados ya que todos ellos resultaron en la dirección Sur Sur Oeste (SSO).

4.1.1.1. Tratamiento estadístico de las direcciones de viento

A partir de las mediciones de direcciones de viento se construyó la **Tabla 2**, la cual muestra las frecuencias de las direcciones de viento. Claramente la dirección de viento predominante correspondió a Sur Sur Oeste (SSO) con un 90.24% de frecuencia de suceso. Asimismo, las

direcciones Sur (S) y Sur Oeste (SO) presentaron frecuencias de 5.37% y 3.11%, respectivamente. Las frecuencias de las demás direcciones mostraron valores menores al 1%.

Tabla 2

Frecuencia de las direcciones de viento

Dirección	Frecuencia (%)
N	0.04
NNE	0.02
NE	0.01
ENE	0.00
E	0.02
ESE	0.02
SE	0.02
SSE	0.07
S	5.37
SSO	90.24
SO	3.11
OSO	0.74
O	0.13
ONO	0.09
NO	0.07
NNO	0.03

4.1.1.2. Tratamiento estadístico de las velocidades de viento

Con las mediciones de velocidades de viento se construyeron los diagramas de distribución de frecuencias de velocidades de viento y frecuencias acumuladas, los cuales son mostrados en la **Figura 12** y **Figura 13**, respectivamente.

Figura 12

Distribución de frecuencias de velocidades de viento (10 m.s.n.s.)

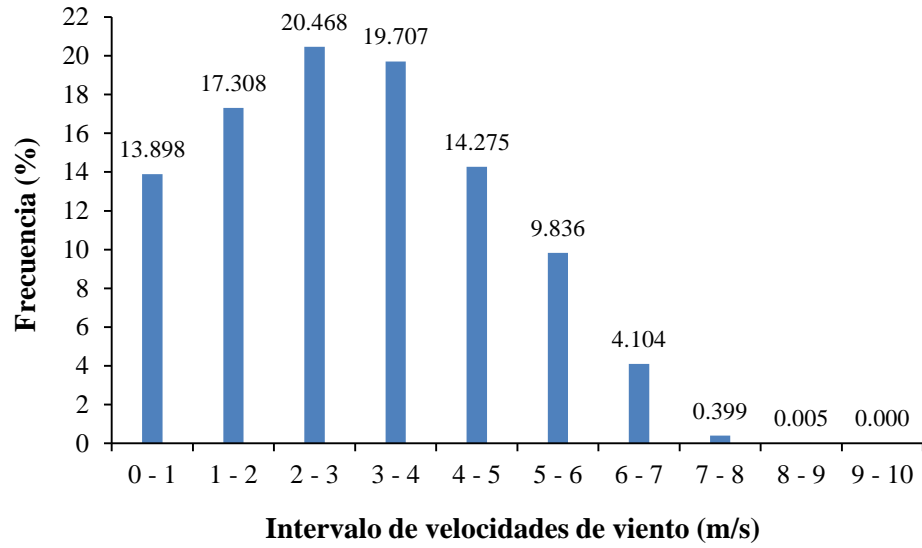
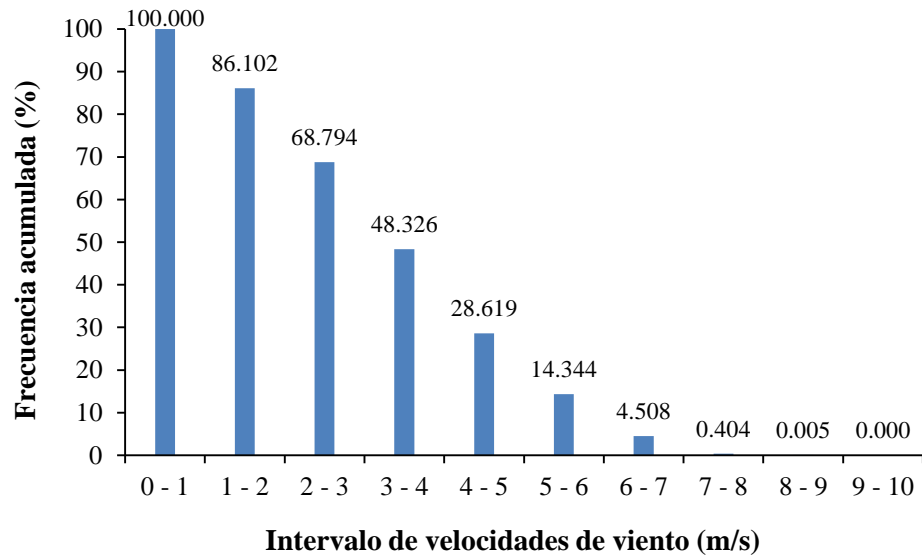


Figura 13

Distribución acumulada de frecuencias de velocidades de viento



Como se aprecia en la **Figura 12**, la mayor incidencia de viento correspondió al intervalo entre 2 y 3 m/s (20.5%) seguido del intervalo entre 3 y 4 m/s (19.7%). Notar que el acumulado de frecuencias de velocidades de viento menor a 5 m/s representó el 85.7% del total.

Dichas velocidades corresponden a bajas densidades de energía, por ello, la generación de energía eléctrica usando aerogeneradores parece ser técnicamente inviable para la altura de 10 m.s.n.s. dentro del Campus de la *UNS*. Para comprobar dicha afirmación, a continuación, la caracterización de las velocidades de viento fue llevada a cabo usando la distribución de Weibull.

4.1.1.3. Distribución de Weibull

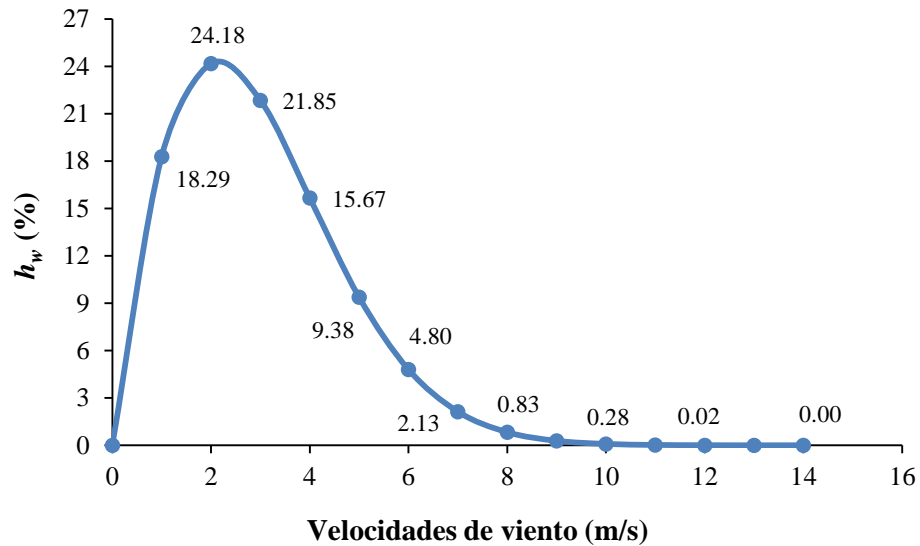
La caracterización de las velocidades de viento del Campus de la *UNS* fue realizada con la formulación correspondiente a la Sección 2.3. Así, con las Ecuaciones (2) - (4), los parámetros k , S y \bar{v} fueron calculados como 1.8, 3.3 y 3 m/s, respectivamente.

La velocidad de viento promedio de 3 m/s es baja, ya que los álabes de algunos aerogeneradores empiezan a girar a partir de dicha velocidad. Por lo tanto, queda comprobado que la generación de energía eléctrica usando aerogeneradores es técnicamente inviable para la altura de 10 m.s.n.s. dentro del Campus de la *UNS*.

Adicionalmente, con la Ecuación (5) se calculó la función de densidad de probabilidad de Weibull y sus valores se muestran en la **Figura 14**. Notar que la frecuencia predominante de 24.2% pertenece a la velocidad de viento de 2 m/s.

Figura 14

Distribución de Weibull (10 m.s.n.s.)



4.1.1.4. Velocidades de viento a la altura del eje del rotor de los aerogeneradores

Se asumió que los aerogeneradores serán montados en torres ancladas sobre los techos de los edificios del Campus de la UNS. Debido a esto, se estimó que el eje de los rotores de los aerogeneradores estará ubicado a una altura de 30 m.s.n.s. Asimismo se asumió que la interacción del flujo de aire con los edificios, donde serán instalados los aerogeneradores, no afectarán la dirección e intensidad del viento.

Por ello, los datos de velocidades de viento medidos a 10 m.s.n.s. fueron extrapolados para una altura de 30 m.s.n.s. utilizando la Ecuación (1). En dicha ecuación, el valor de ϵ oscila entre 0.25 y 0.4 para terrenos muy accidentados y ciudades (Fernández, 1993). En la presente tesis se utilizó el valor de 0.27 para ϵ .

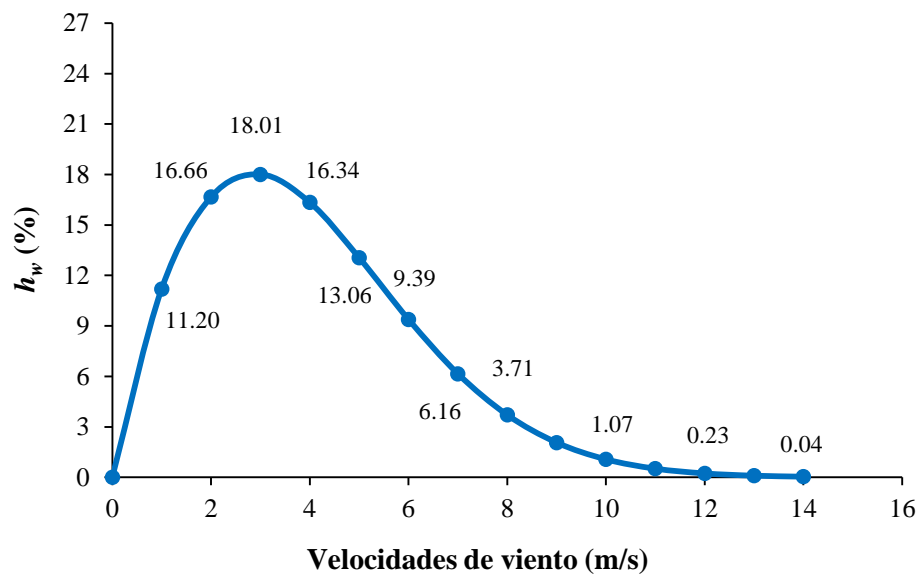
Con la Ecuación (4) se calculó nuevamente el valor de \bar{v} , el cual corresponde a 4 m/s. Mientras que los parámetros k y S fueron calculados como 1.8 y 4.5, respectivamente. Notar

que este valor de velocidad de viento proyectado es más atractivo que el medido a 10 m.s.n.s., ya que contiene una mayor densidad energética.

Nuevamente, con la Ecuación (5) se calculó la función de densidad de probabilidad de Weibull y sus valores se muestran en la **Figura 14**. Como se aprecia en la figura, la curva se aplanó, es decir, se redujo la densidad de probabilidad máxima, pero aumentó el valor de las frecuencias alrededor de la velocidad promedio.

Figura 15

Distribución de Weibull (velocidades de viento proyectadas a 30 m.s.n.s.)



El punto de diseño de los aerogeneradores deberá ser cercano a la velocidad de viento con mayor probabilidad de ocurrencia (menor a 10 m/s) y no a la que se encuentra frecuentemente en los aerogeneradores comerciales (mayor a 10 m/s).

4.1.2. Simulación y elección de perfiles aerodinámicos

4.1.2.1. Diseño preliminar del rotor

Para la determinación de las características geométricas y aerodinámicas empleadas en la simulación de los perfiles aerodinámicos, un diseño preliminar del rotor del aerogenerador fue realizado. Los parámetros usados en dicho diseño son mostrados en la **Tabla 3**. Entre los parámetros mostrados resaltan la potencia del aerogenerador (P), su coeficiente de potencia (C_p), la velocidad de incidencia del viento (V_∞), la celeridad (λ), la eficiencia mecánica-eléctrica ($\eta_{mec-elect}$) y la densidad del aire (ρ_{aire}).

Tabla 3

Parámetros usados en el diseño preliminar del rotor

Parámetro	Valor
P	1 kW
C_p	0.4
V_∞	8 m/s
λ	8
$\eta_{mec-elect}$	0.8
ρ_{aire}	1.225 kg/m ³

Con ello, se determinó un Re de 827 897 en el punto de diseño. Por ello, los perfiles aerodinámicos tomados en cuenta en la presente tesis fueron simulados con Re similares (Re máximo de 1'000 000). En todas las simulaciones se consideraron las cuerdas de los perfiles (c) con un valor de 1 m.

4.1.2.2. Estudio de independencia de malla

En el estudio de independencia de malla se usaron 3 mallas: Gruesa, Media y Fina. Estas mallas tienen niveles distintos de refinamiento. La definición de los parámetros usados en el estudio y sus valores son mostrados en la **Figura 16** y **Tabla 4** , respectivamente.

Figura 16

Parámetros utilizados en el refinamiento de malla

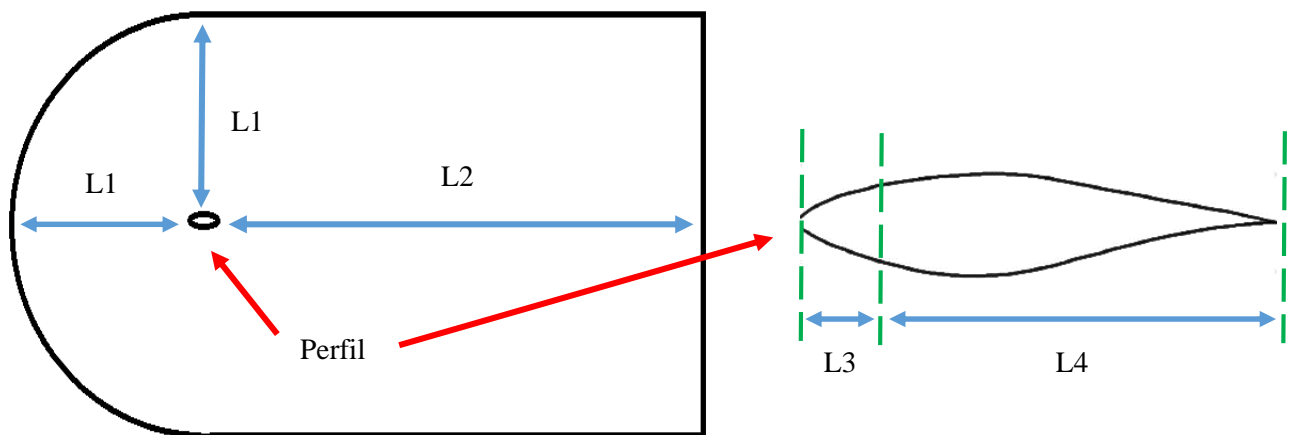


Tabla 4

Características de las mallas utilizadas en el estudio de independencia de malla

Malla	Número de elementos					Total
	L1	L2	L3	L4	Inflation	
Gruesa	70	53	100	64	20	39 060
Media	100	73	110	142	20	78 000
Fina	120	120	182	236	20	156 020

Por medio de la comparación de los coeficientes de sustentación (C_l) y arrastre (C_d), como se aprecia en la **Tabla 5**, se determinó la malla adecuada para su uso en la simulación de los perfiles aerodinámicos. Así, la malla Media fue elegida ya que la variación en los resultados de los coeficientes hallados con las mallas Media y Fina es menor al 1%.

Tabla 5

C_l y C_d obtenidos en el estudio de independencia de malla

Malla	Gruesa	Media	Fina
C_l	1.1121	1.1148	1.1147
C_d	0.02419	0.02361	0.02364

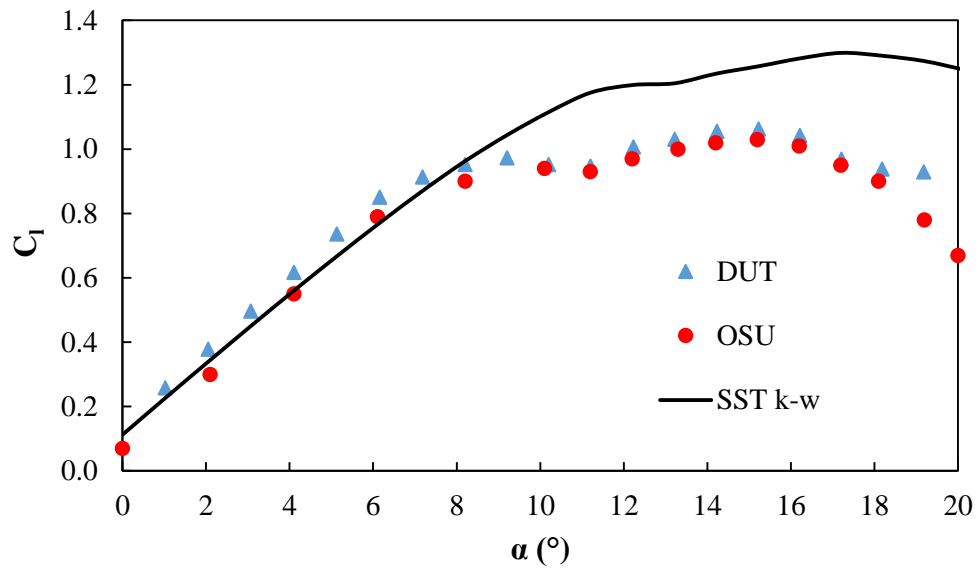
4.1.2.3. Verificación del modelo numérico

El modelo numérico para la simulación de los perfiles fue verificado con ayuda de datos experimentales de C_l y C_d del perfil S809 extraídos de la literatura. Estas mediciones vinieron de 3 fuentes: Delf University of Technology - DUT (Somers, 1997), Ohio State University - OSU (Gregorek et al., 1991) y Colorado State University - CSU (Butterfield et al., 1992). Los Re simulados fueron los correspondientes a los experimentos de donde se obtuvieron las mediciones experimentales (1'000 000, 750 000, 500 000 y 300 000). Los ángulos de ataque (α) correspondieron a valores entre 0° y 20° aproximadamente. Los resultados son mostrados en las **Figura 17-Figura 20**.

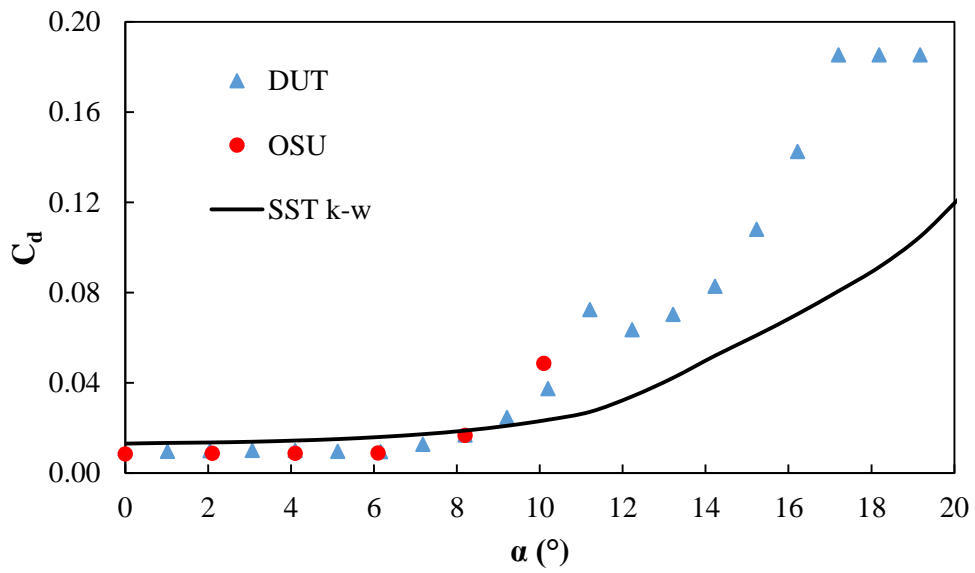
Como se aprecia en las figuras, el modelo numérico predijo relativamente bien los C_l y C_d del perfil S809 para α menores a 10°, lo cual está de acuerdo con la literatura. Para α mayores a 10°, el modelo numérico tuvo dificultades al predecir los valores de los coeficientes. La brecha entre los valores de los coeficientes medidos y aquellos resultantes de la simulación incrementó a medida que α aumentó.

Figura 17

C_l (a) y C_d (b) del perfil S809 para Re de 1'000 000



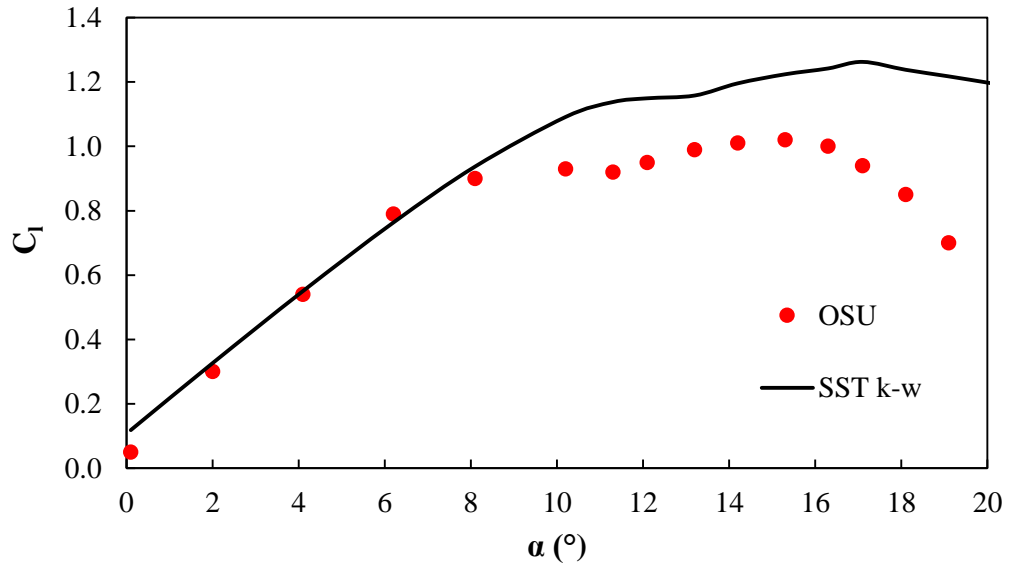
(a)



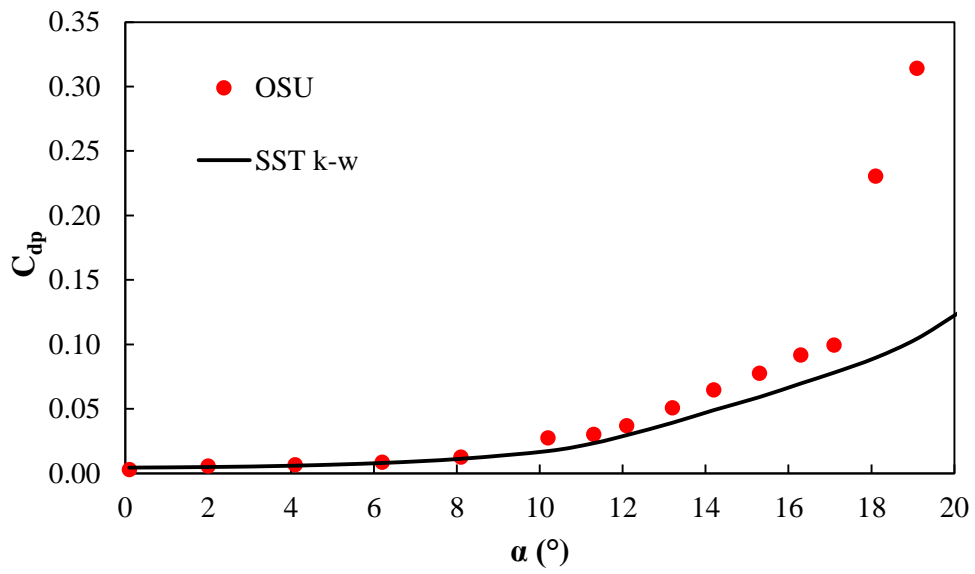
(b)

Figura 18

C_l (a) y C_d (b) del perfil S809 para Re de 750 000



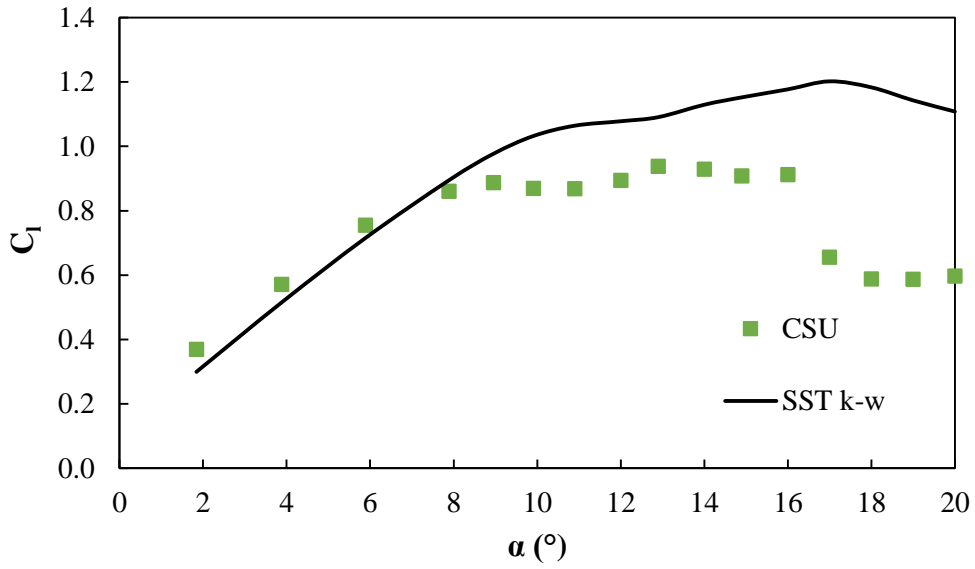
(a)



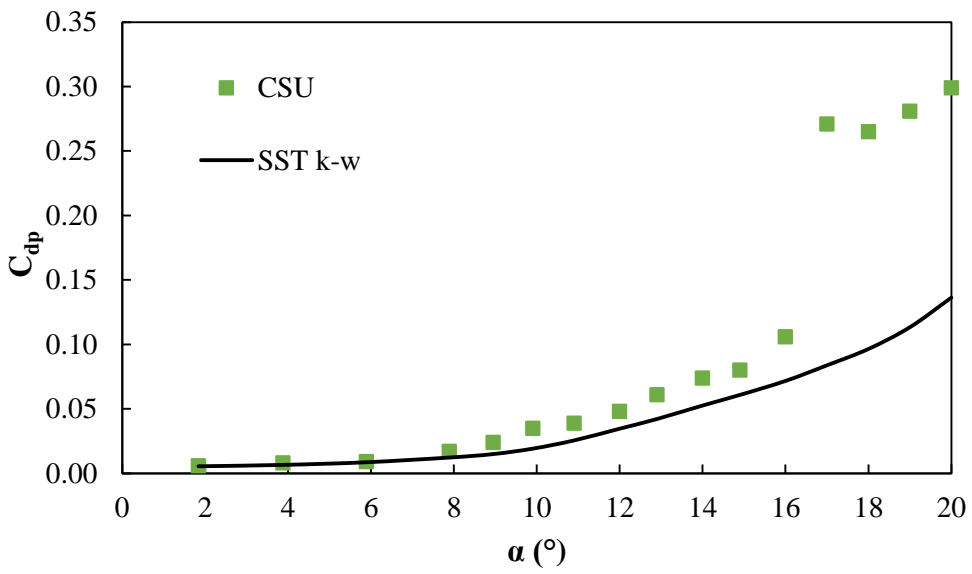
(b)

Figura 19

C_l (a) y C_a (b) del perfil S809 para Re de 500 000



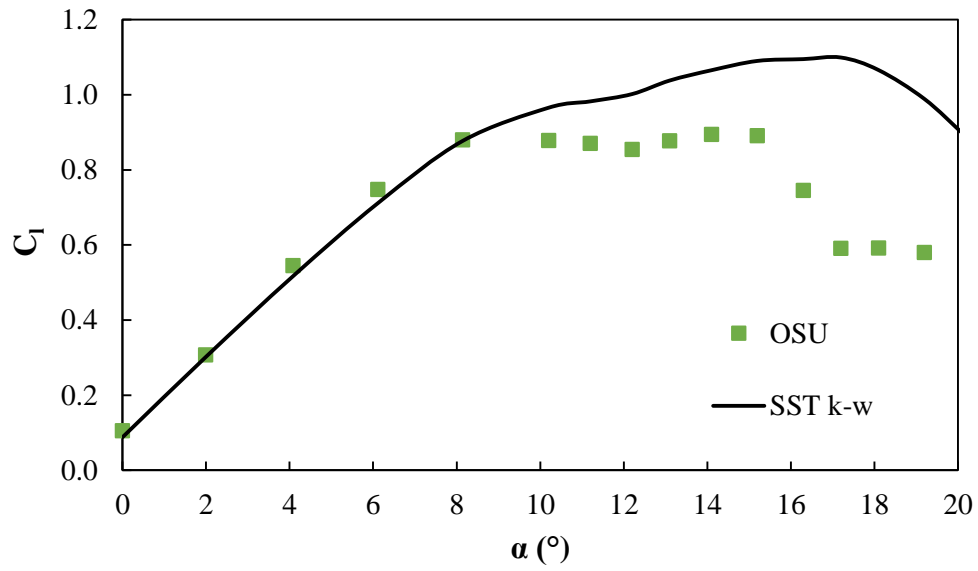
(a)



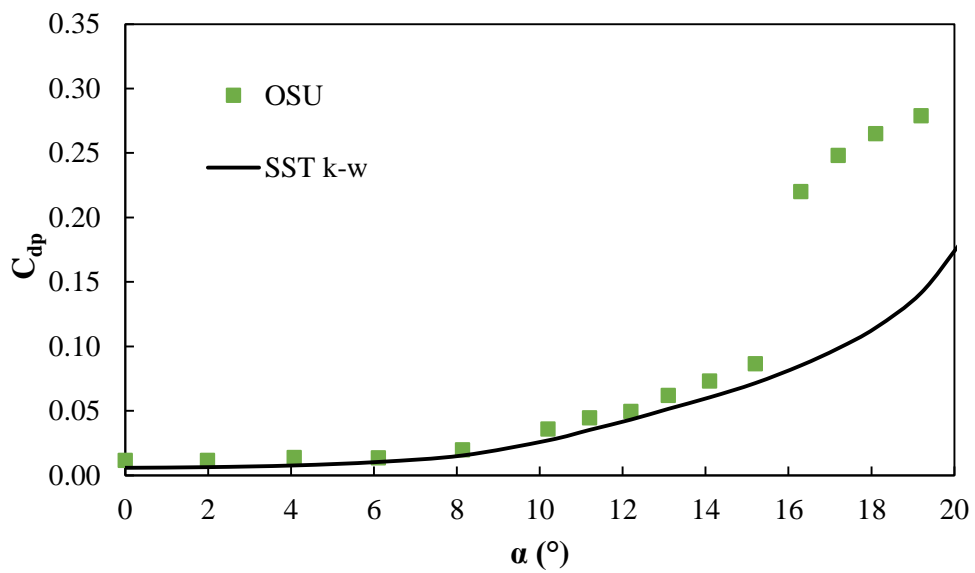
(b)

Figura 20

C_l (a) y C_a (b) del perfil S809 para Re de 300 000



(a)



(b)

El error entre las mediciones y los resultados numéricos de los C_l y C_d es mostrado en la **Tabla 6**. Esta tabla contiene los errores para cada Re simulado. Para el C_l , los errores son menores al 13%, lo cual es aceptable numéricamente. Por otro lado, los errores del C_d llegan a ser de hasta 75.8% para un Re de 750 000, lo cual hace concluir que el modelo numérico no es bueno prediciendo los coeficientes de arrastre, a pesar de ello, errores del orden de magnitud obtenidos en la presente tesis son similares a aquellos encontrados en la literatura.

Tabla 6

Relative Root Mean Square Error (RRMSE) de los C_l y C_d para α entre 0° y 10°

Re	C_l	C_d
1'000 000	10.54	40.30
750 000	12.80	75.80
500 000	12.12	46.76
300 000	7.13	33.21

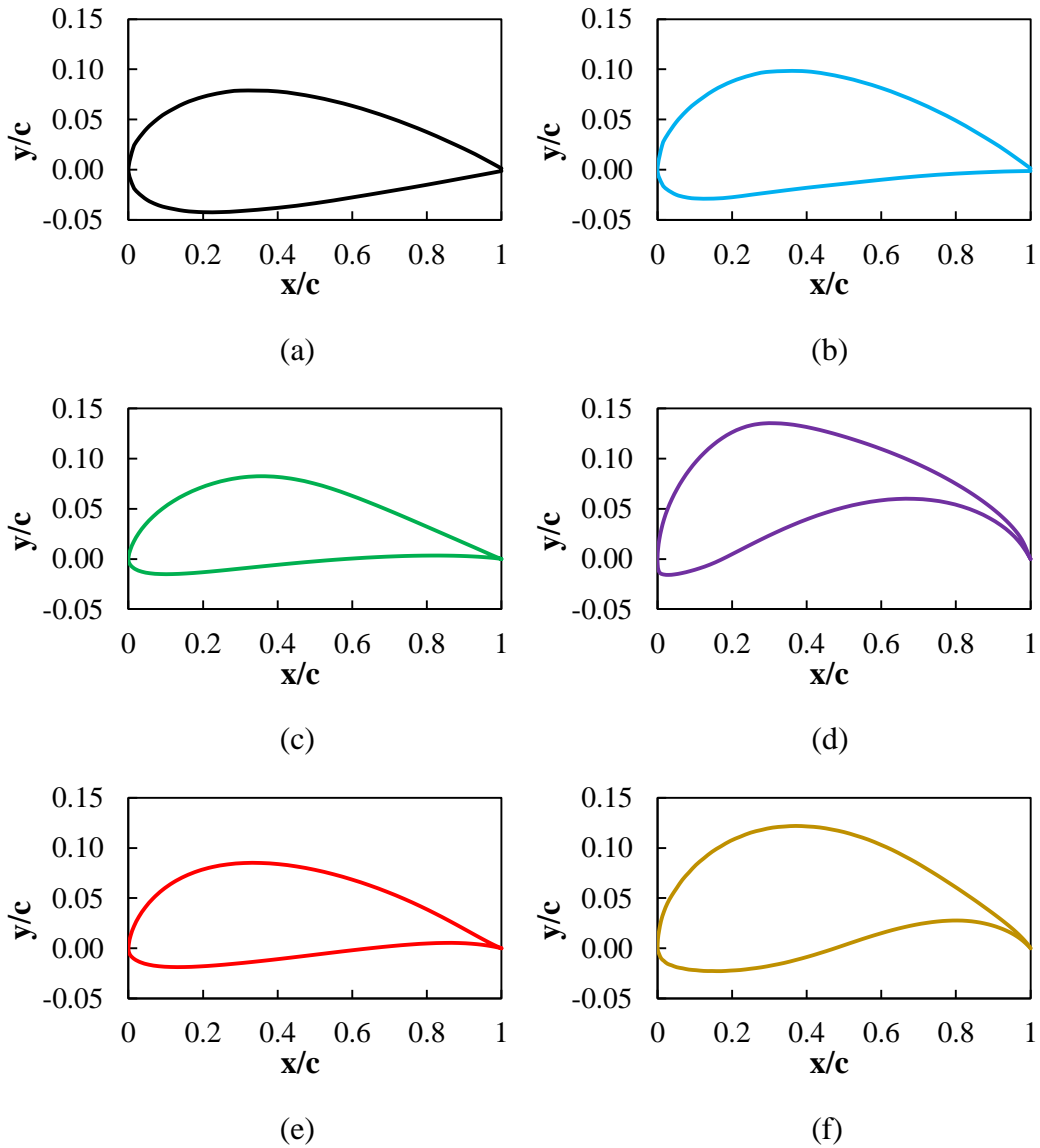
Ya que los aerogeneradores son diseñados para trabajar con α relativamente bajos, la dificultad en la predicción de los coeficientes a altos α no se espera que sea un problema. Notar que en la literatura científica, errores del orden de hasta el 50% son hallados para los C_d (El Khchine y Sriti, 2017).

4.1.2.4. Características cuantitativas de los perfiles

Las simulaciones numéricas fueron realizadas para Re de 250 000 y 500 000, el cual representó las condiciones de trabajo de aerogeneradores de baja potencia del orden de 1 y 5 kW, respectivamente. Los perfiles fueron simulados para α entre 0° y 10° . Las simulaciones fueron realizadas con velocidades relativas (V_{rel}) de 3.65 y 7.30 m/s correspondientes a los Re mencionados. La geometría de los perfiles es mostrada en la **Figura 21**.

Figura 21

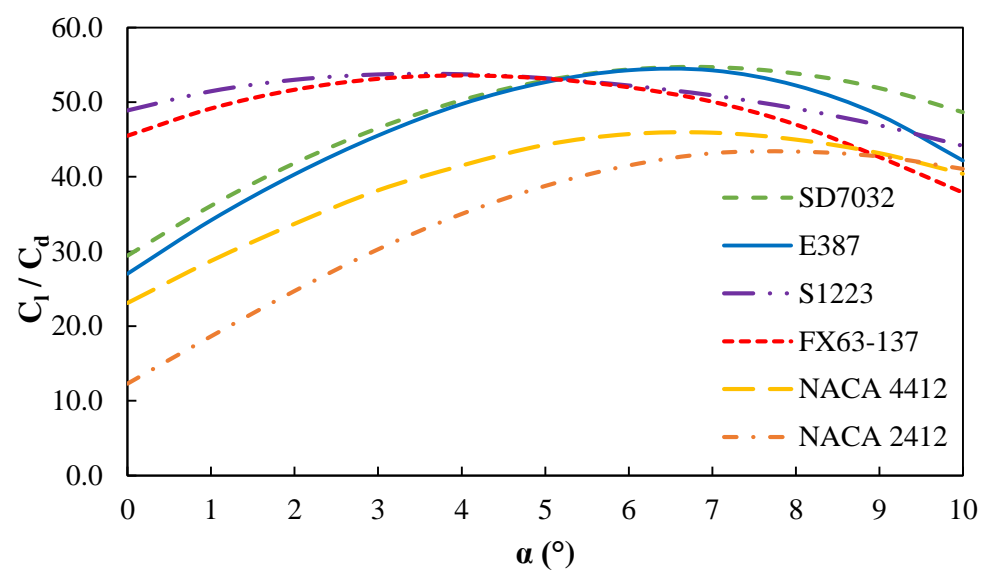
Perfiles aerodinámicos simulados, NACA2412 (a), NACA4412 (b), E387 (c), S1223 (d), SD7032 (e) y FX63-137 (f)



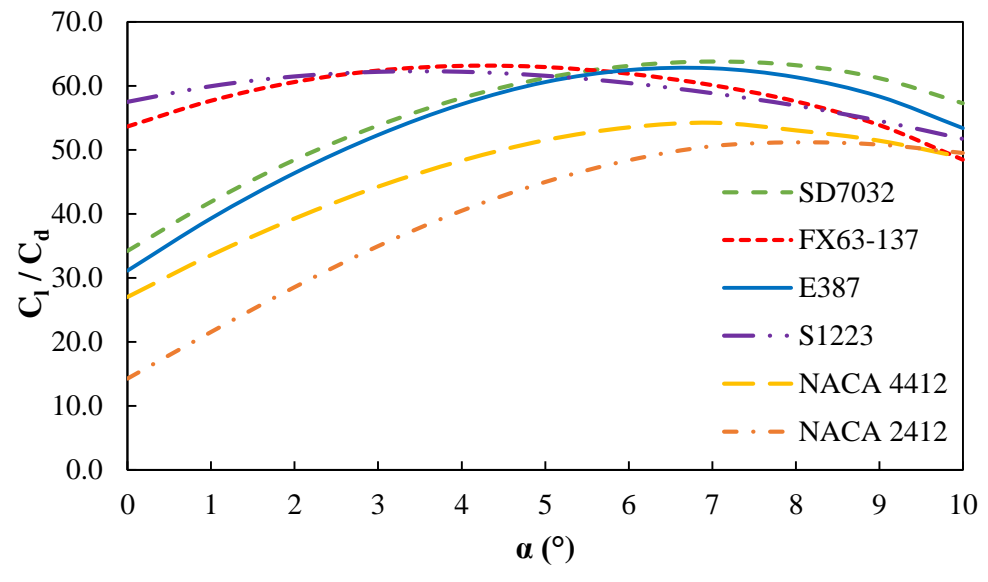
En la **Figura 22**, las relaciones de sustentación/arrastre (C_l/C_d) de los 6 perfiles aerodinámicos estudiados son mostradas. Notar que dicha relación C_l/C_d es importante en la determinación del ángulo de ataque óptimo para el diseño de los aerogeneradores.

Figura 22

C_l/C_d de los perfiles para Re de 250 000 (a) y 500 000 (b)



(a)



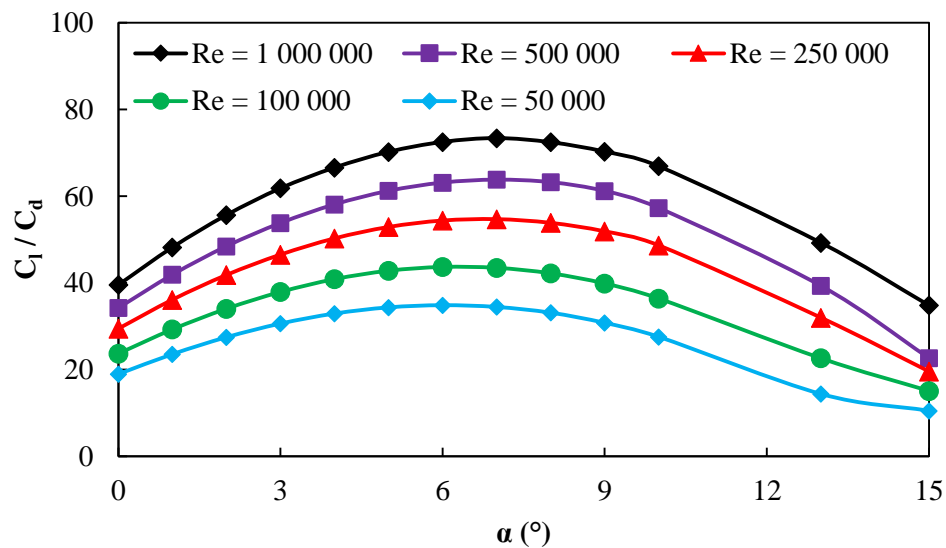
(b)

Como visto en la **Figura 22**, el perfil aerodinámico SD7032 mostró la mayor relación C_l/C_d de 63.80 para un α de 7° y Re de 500 000. Por ello, el diseño de los aerogeneradores se realizó con dicho ángulo y perfil, para el cual se pudo obtener los aerogeneradores con mayor eficiencia. Notar que el perfil NACA4412 solamente alcanzó una relación C_l/C_d máxima de 54.27 para el mismo α y Re que el perfil SD7032.

Adicionalmente, la **Figura 23** muestra las relaciones C_l/C_d del perfil SD 7032 para varios Re y α . Como es esperado, a medida que incrementa el Re , las relaciones C_l/C_d aumentan.

Figura 23

Relación de sustentación / arrastre del perfil SD7032 para varios Re



4.1.2.5. Características cualitativas de los perfiles

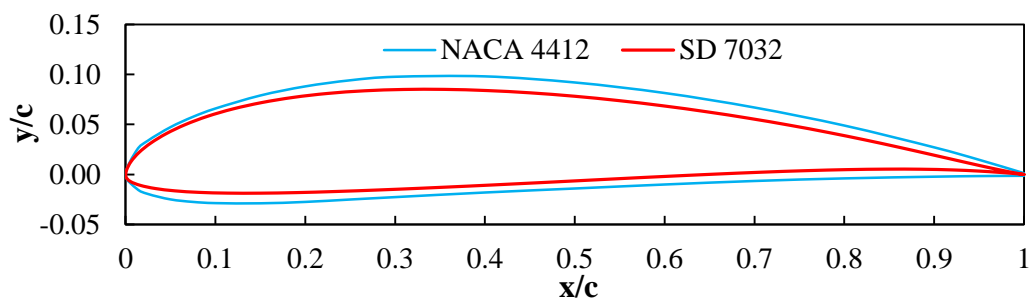
En esta sección se analizaron los perfiles NACA4412 y SD7032. La elección del perfil NACA 4412 es consecuencia de que dicho perfil es ampliamente utilizado en el diseño de rotores de aerogeneradores. Por otro lado, el perfil SD7032 es de sumo interés en esta tesis

ya que dicho perfil mostró las mejores características cuantitativas analizadas en la sección anterior.

La geometría de los perfiles mencionados es presentada en la **Figura 24**. Como se aprecia, las geometrías de ambos perfiles presentan pequeñas variaciones, las cuales pueden incidir en las características aerodinámicas de los perfiles como se hizo notorio en la sección anterior.

Figura 24

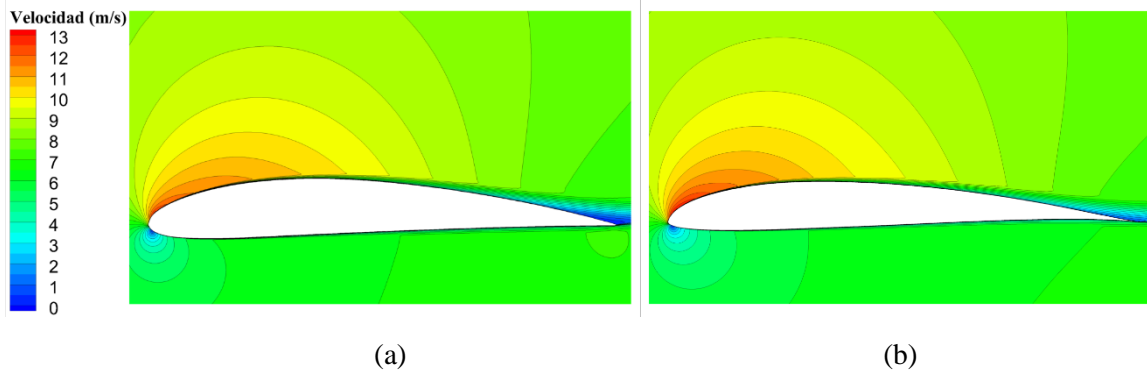
Geometría de los perfiles aerodinámicos NACA4412 y SD7032



La **Figura 25** y **Figura 26** muestran los contornos de velocidad y presión, respectivamente, alrededor de los perfiles NACA4412 y SD7032. Como se aprecia en la **Figura 25**, el borde de ataque del perfil SD7037 presentó mayores velocidades que el perfil NACA4412. Asimismo, el borde de fuga del perfil SD7032 mostró un área relativamente pequeña de velocidades cercanas a cero en comparación con el perfil NACA4412. Esto ayudó a que el perfil SD7032 tuviera menos pérdidas (menor generación de vórtices en el borde de fuga) y por ende su relación C_l/C_d fuera mayor al del perfil NACA4412.

Figura 25

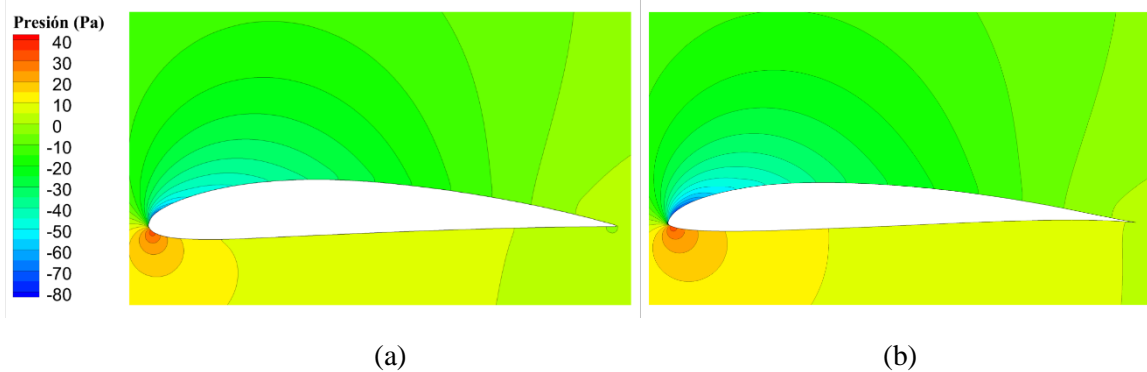
Contornos de velocidad alrededor de los perfiles NACA4412 (a) y SD7032 (b)



La **Figura 26** muestra que presiones mayores fueron alcanzadas en el intradós del perfil SD7032 en comparación con el perfil NACA4412. Mientras que presiones menores fueron calculadas en el extrados del perfil SD7032 en comparación con el perfil NACA4412. Por ello, mayores diferencias de presión son encontradas entre el intrados y extrados del perfil SD7032 favoreciendo así a la maximización de su C_l .

Figura 26

Contornos de presión alrededor de los perfiles NACA4412 (a) y SD7032 (b)



4.1.3. Diseño de los aerogeneradores

4.1.3.1. Cálculos preliminares

Para poder determinar la geometría de los álabes de los aerogeneradores, se estimaron primero los C_p máximos que podrían ser alcanzados por los aerogeneradores dependiendo del Re y λ como se aprecia en la **Figura 27**. Dicha figura muestra que un λ de 6 es el más favorable para el diseño de los aerogeneradores ya que C_p mayores son logrados en ese punto de operación.

De la misma manera, antes de realizar el diseño de los aerogeneradores fue necesario extrapolar los C_l y C_d del perfil SD 7032 para todo el rango de posibles α e introducirlos en la formulación *BEM*. En la **Figura 28**, los coeficientes extrapolados del perfil SD 7032 para un Re de 250 000 son presentados.

Figura 27

Predicción del máximo C_p para diferentes Re y λ

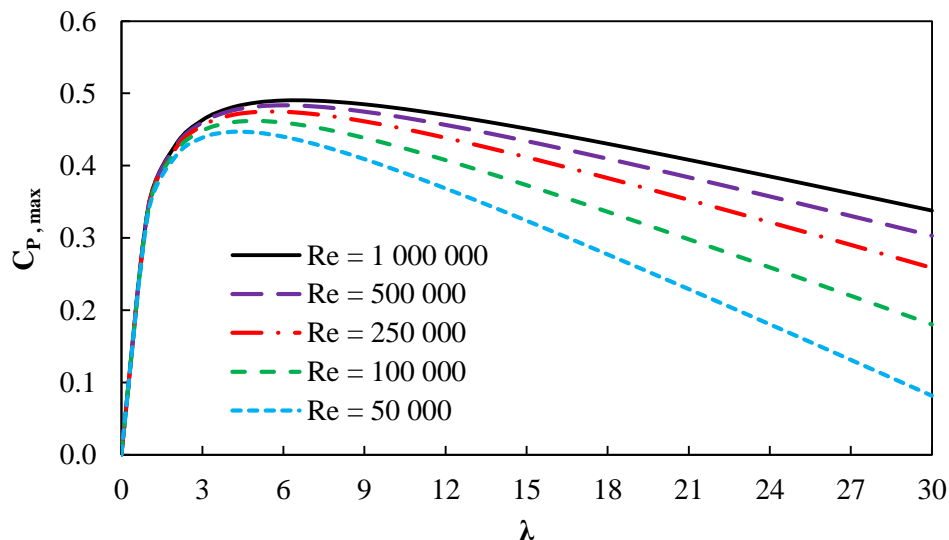
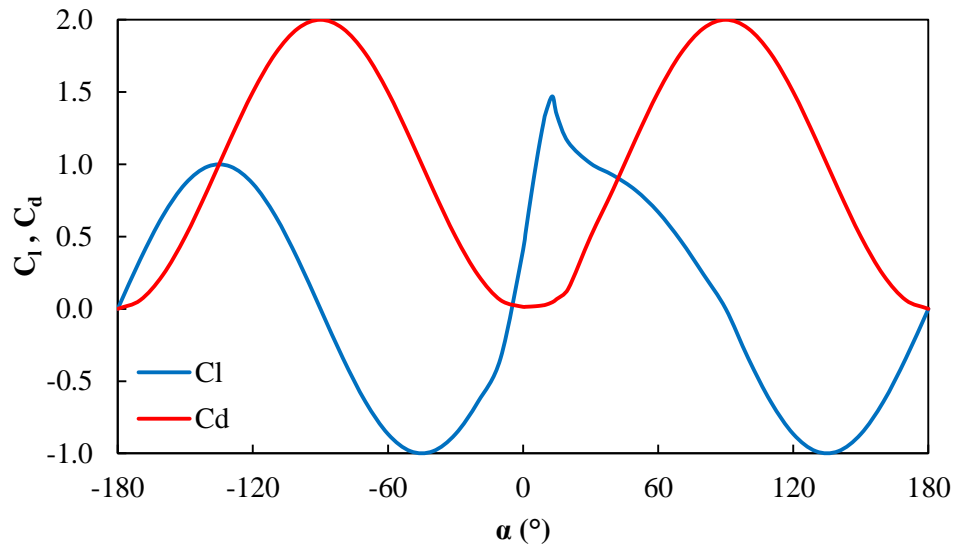


Figura 28

C_l y C_d extrapolados para todos los α (Re de 250 000)



4.1.3.2. Diseño de los álabes

Usando la teoría *BEM* mostrada en la Sección 2.8. , la geometría de los álabes de los rotores de aerogeneradores de 1, 2.5, 5 y 10 kW fue determinada. Para obtener la geometría de los rotores, los álabes fueron divididos en 20 secciones. Los valores de c , ángulo de paso local (θ_p), α , entre otros, fueron hallados para cada una de las 20 secciones. Los parámetros usados en el diseño se aprecian en la **Tabla 7**.

Tabla 7*Parámetros de diseño de los aerogeneradores*

Parámetro	Valor
P	1, 2.5, 5 y 10 kW
C_p	0.4747
V_∞	8 m/s
λ	6
$n_{mec-elect}$	0.8
ρ_{aire}	1.225 kg/m ³
μ	1.7894 x 10 ⁻⁵ kg/m.s
α	7°
<i>Perfil</i>	SD7032

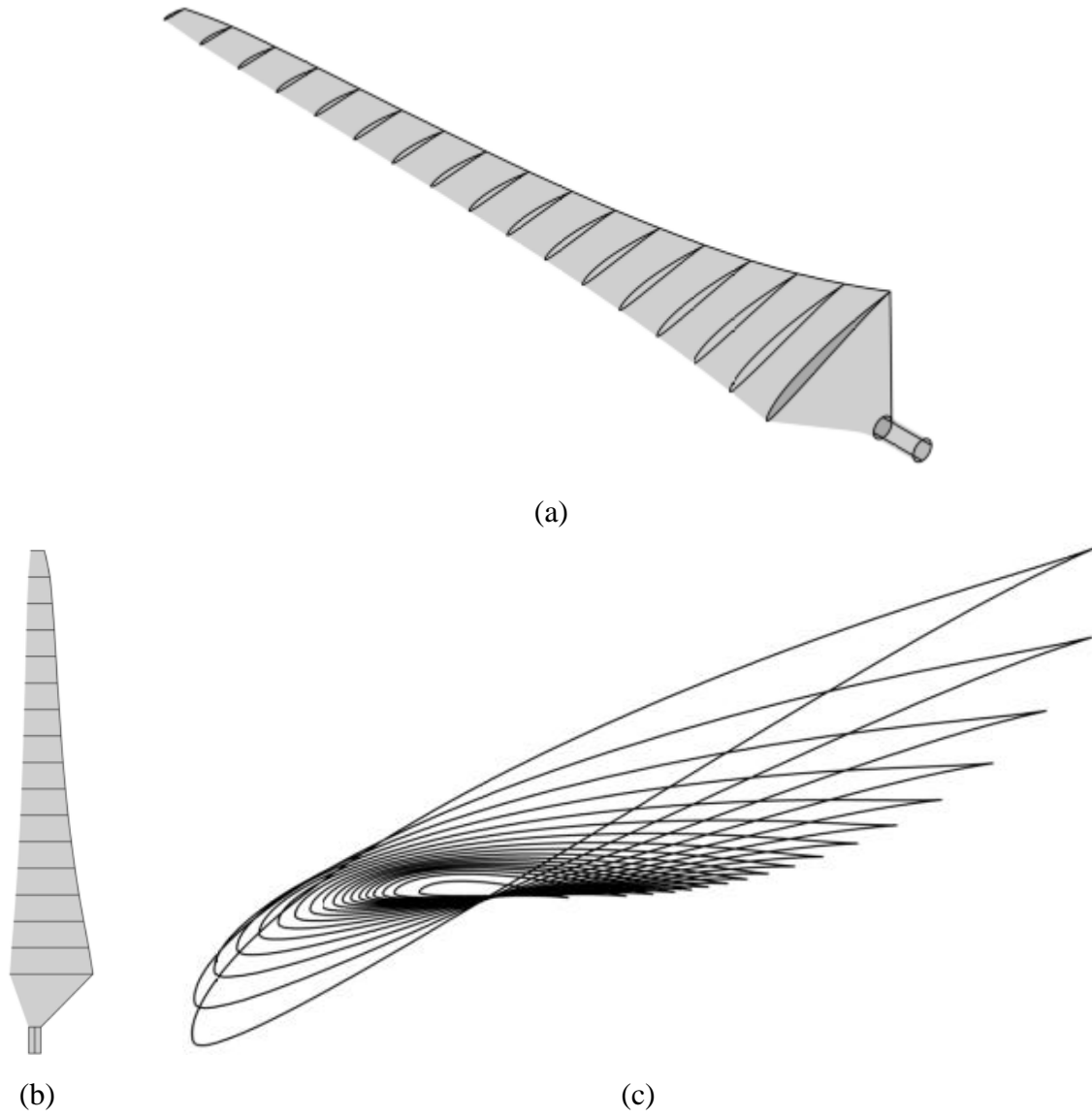
En el diseño de los álabes de aerogeneradores, la velocidad de viento es primordial ya que de ella depende el tamaño del rotor. Usar velocidades bajas resulta en rotores mayores (largo de álabes), en cambio utilizar velocidades altas causa que los rotores sean relativamente pequeños. Notar que para mantener una buena eficiencia del rotor es necesario que la velocidad de diseño sea lo más cercana posible a la velocidad de máxima ocurrencia del lugar donde se desea instalar los aerogeneradores.

En esta tesis, como visto en la **Tabla 7**, se escogió una velocidad de viento de 8 m/s para el diseño de los álabes. Esto hace que los rotores sean un poco más grandes de lo habitual, pero mantienen una eficiencia aceptable cuando los aerogeneradores trabajan con velocidades bajas de viento, las cuales son las predominantes en el Campus de la *UNS*. Notar que la elección de una velocidad de viento menor haría que los rotores diseñados sean muy grandes y ello podría afectar considerablemente en sus costos totales.

La longitud de los álabes diseñados (R) correspondió a 1.663, 2.617, 3.688 y 5.207 m. para los aerogeneradores de 1, 2.5, 5 y 10 kW, respectivamente. La geometría del álabe del aerogenerador de 1 kW es mostrada en la **Figura 29**.

Figura 29

Vistas de un álabe del aerogenerador de 1 kW, isométrica (a), elevación (b) y perfiles aerodinámicos (c)



(a)

(b)

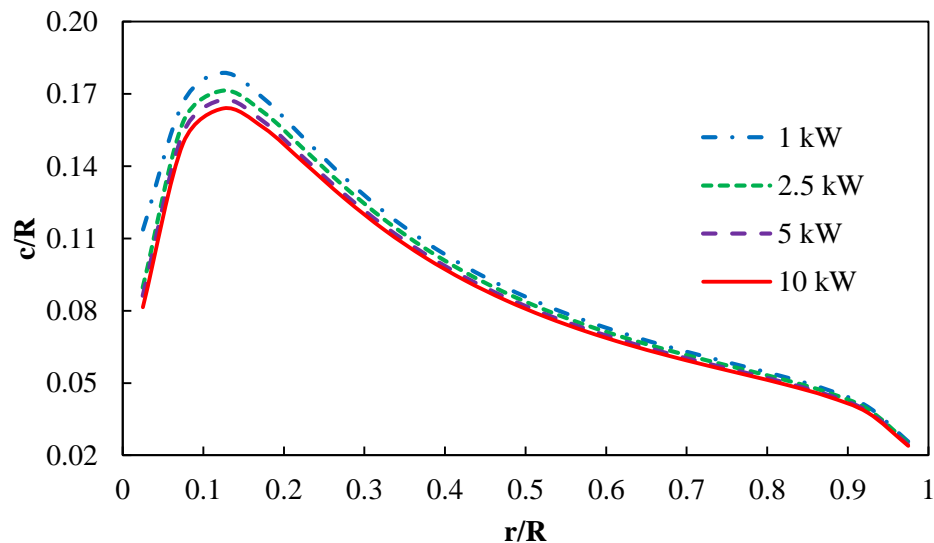
(c)

La geometría de los álabes de los otros aerogeneradores fue similar al de 1 kW, pero con algunas variaciones en cuanto a su c y ángulo de torsión (θ_T). Por ello, un análisis adicional de estos parámetros fue realizado a continuación.

Las cuerdas de los perfiles de los distintos aerogeneradores diseñados fueron analizadas en su forma adimensional para poder compararlas de forma adecuada. Notar que la cuerda adimensional (c/R) es calculada dividiendo la cuerda (c) entre la longitud del álabe (R). La **Figura 30** muestra la cuerda adimensional de los perfiles que conforman los álabes de los aerogeneradores.

Figura 30

c/R de los perfiles que conforman los álabes de los aerogeneradores diseñados



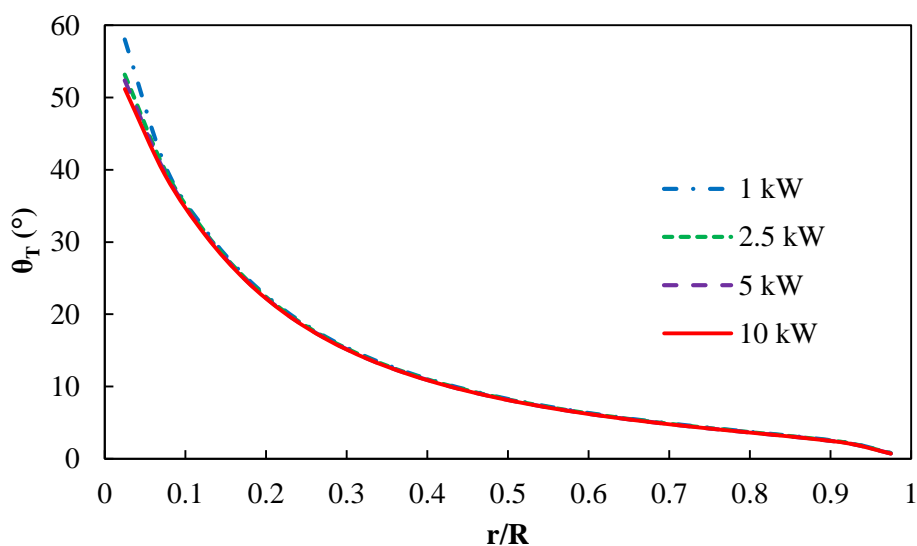
Como se observa en la **Figura 30**, para potencias menores (por ejemplo, 1 kW) las c fueron mayores en la zona cercana al eje del rotor, más específicamente en la zona que ayuda al arranque del aerogenerador. En dicha zona, por el contrario, las cuerdas fueron menores para potencias mayores (por ejemplo, 10 kW), por ello, a medida que el aerogenerador aumentó

en potencia y tamaño, las cuerdas de sus perfiles disminuyeron haciendo que los álabes sean relativamente más delgados.

El θ_T de los perfiles es mostrado en la **Figura 31**. En este caso, el θ_T fue similar para todos los perfiles que conformaron los álabes. Una pequeña variación de dicho ángulo se hizo notoria en la zona más cercana al eje del rotor. Notar que dicha zona es la que menos aportó en la generación de energía por parte de los aerogeneradores.

Figura 31

θ_T de los perfiles que conforman los álabes de los aerogeneradores diseñados

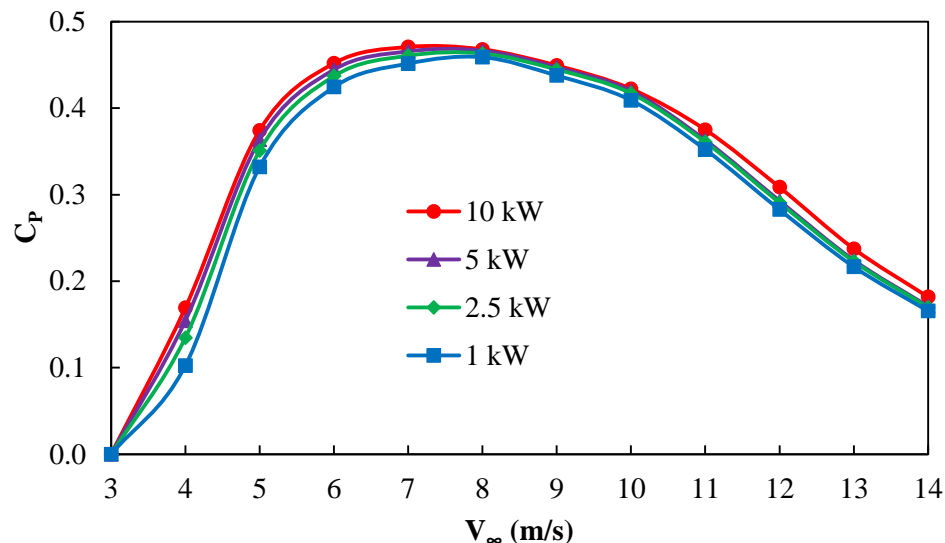


4.1.3.3. Potencia y eficiencia de los aerogeneradores

Los C_p alcanzados por los aerogeneradores a distintas velocidades, es decir, en el punto de diseño (design point) y en condiciones fuera de este (off-design points) son mostrados en la **Figura 32**.

Figura 32

C_p alcanzado por los aerogeneradores con respecto a V_∞



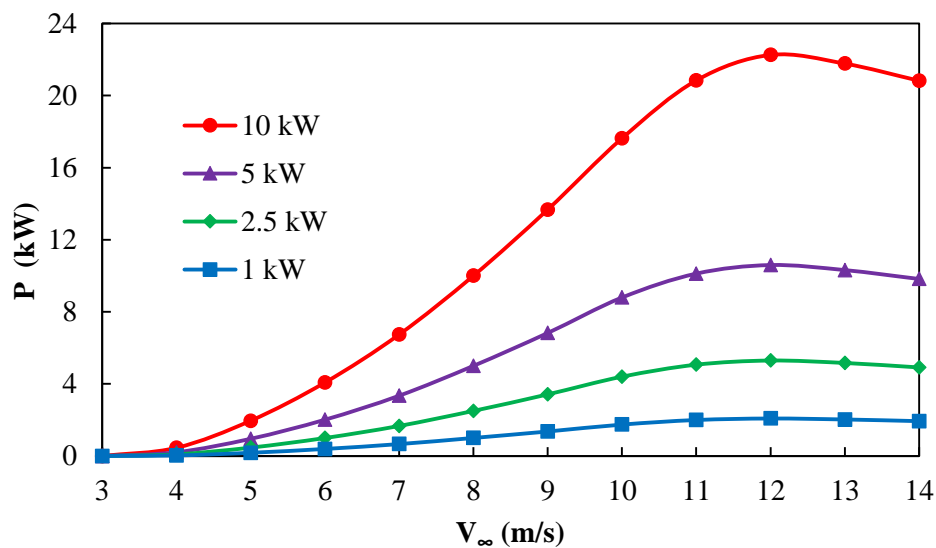
Como es esperado, el máximo C_p fue alcanzado en el punto de diseño (8 m/s de velocidad de viento), mientras que el C_p disminuyó en condiciones fuera del punto de diseño. Se consideró que el arranque de los aerogeneradores se daría a partir de los 3 m/s de velocidad de viento incidente (V_∞), el cual es un valor típico en este tipo de máquinas. Por ello, la eficiencia y generación de energía para V_∞ de 3 m/s fue considerada como cero. Notar que los C_p de todos los aerogeneradores fueron similares en el punto de diseño, pero una disminución notoria se apreció para velocidades relativamente altas y bajas. Por ejemplo, para una velocidad de viento de 4 m/s, la eficiencia del aerogenerador de 1 kW fue aproximadamente 10% mientras que para el aerogenerador de 10 kW dicha eficiencia estuvo alrededor de 17%. En general se apreció que a mayor potencia de diseño, mayor C_p alcanzado.

La **Figura 33** muestra la potencia de salida de los aerogeneradores (P) con respecto a la velocidad de viento incidente (V_∞). Como es esperado, la potencia generada aumentó a medida que la velocidad de viento creció hasta un punto máximo alrededor de los 12 m/s, a

partir del cual empezó a disminuir ligeramente. Esta disminución se debió a los efectos de entrada en pérdida por parte de los álabes de los aerogeneradores, es decir, las fuerzas de sustentación disminuyeron mientras que las fuerzas de arrastre aumentaron rápidamente.

Figura 33

Potencia alcanzada por los aerogeneradores con respecto a V_{∞}



4.1.3.4. Producción de energía de los aerogeneradores

Usando los datos de las frecuencias de viento (**Figura 15**) y las potencias generadas (**Figura 33**), la energía anual generada para las distintas V_{∞} fue calculada y es mostrada en la **Figura 34**. A pesar que las bajas V_{∞} (menor a 5 m/s) fueron las predominantes en el Campus de la UNS, estas aportaron menor energía que las V_{∞} medias (entre 5 y 10 m/s) ya que estas últimas tienen una mayor densidad energética. Por otro lado, las V_{∞} altas (mayores a 10 m/s) tuvieron un aporte energético relativamente bajo ya que su frecuencia de ocurrencia fue muy baja.

Finalmente, la producción anual de energía de los aerogeneradores (*PAE*) es mostrada en la **Figura 35**. Ya que los aerogeneradores diseñados fueron de baja potencia, el escalamiento

fue casi lineal en cuanto a la potencia de diseño, es decir, la relación de energía producida entre el aerogenerador de 1 kW y aquel de 2.5 kW estuvo alrededor de 1/2.5. De forma similar sucedió con los otros aerogeneradores diseñados. Notar que esta linealidad se va perdiendo a medida que las potencias de diseño son mayores.

Figura 34

Energía anual producida por los aerogeneradores a distintas V_{∞}

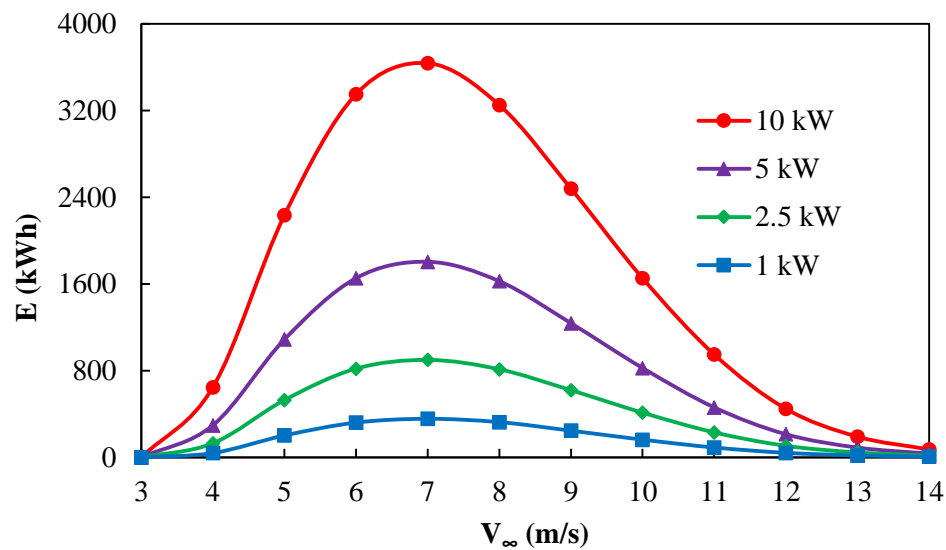
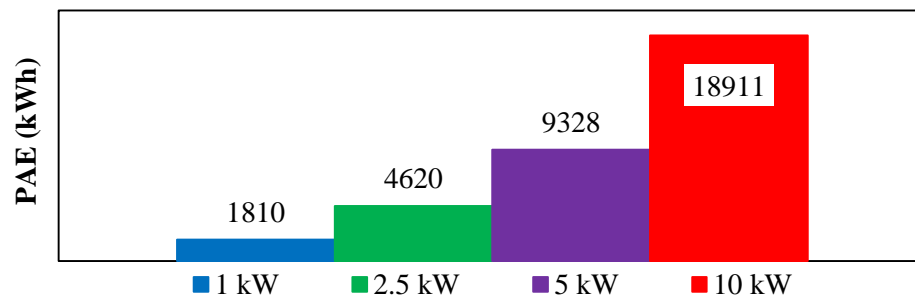


Figura 35

PAE de los aerogeneradores diseñados



4.2. Discusión

- Para la altura de 10 m.s.n.s., los parámetros k , S y \bar{v} fueron calculados como 1.8, 3.3 y 3 m/s, respectivamente. Cabe mencionar que la velocidad de viento promedio de 3 m/s es baja, por lo tanto, la generación de energía eléctrica usando aerogeneradores es técnicamente inviable para dicha altura dentro del Campus de la UNS.
- Los datos de velocidades de viento fueron extrapolados para una altura de 30 m.s.n.s. (altura del eje del rotor de los aerogeneradores) usando un ϵ de 0.27. Con ello, los parámetros k , S y \bar{v} fueron calculados como 1.8, 4.5 y 4 m/s, respectivamente. Notar que este valor de velocidad promedio es más atractivo que el medido a 10 m.s.n.s. ya que contiene una mayor densidad energética.
- El diseño preliminar del rotor del aerogenerador de 1 kW se realizó asumiendo una V_∞ de 8 m/s, λ de 8, $\eta_{mec-elect}$ de 0.8 y C_p igual a 0.4. Este diseño resultó en un Re de 827 897, por ello, los perfiles aerodinámicos fueron simulados con Re menores a 1'000 000 y se usó una c de 1 m.
- El estudio de independencia de malla se determinó que la malla más adecuada para las simulaciones fue aquella Media ya que la variación en los resultados de los coeficientes hallados con las mallas Media y Fina es menor al 1%.
- En la etapa de verificación del modelo numérico, este predijo relativamente bien los C_l y C_d del perfil S809 para α menores a 10° , pero tuvo dificultades al predecir los coeficientes para ángulos mayores. La brecha entre los valores de los coeficientes medidos y aquellos resultantes de la simulación incrementó a medida que α aumentó.
- En la etapa de verificación, el error entre las mediciones y los resultados numéricos para el C_l fue menor al 13%, lo cual es aceptable numéricamente. Por otro lado, los errores del C_d llegaron a ser de hasta 75.8% para un Re de 750 000, lo cual hace concluir que el modelo numérico no es bueno prediciendo los C_d , a pesar de ello, errores del orden de magnitud obtenidos son también encontrados en la literatura.

- Se escogió una velocidad de viento de 8 m/s para el diseño de los álabes. Esto hizo que los rotores sean más grandes de lo habitual, pero mantuvieron una eficiencia aceptable al trabajar con bajas velocidades de viento, las cuales son las predominantes en el Campus de la *UNS*.
- El máximo C_p fue alcanzado en el punto de diseño (8 m/s de velocidad de viento), mientras que el C_p disminuyó en condiciones fuera del punto de diseño. Para una velocidad de viento de 4 m/s, la eficiencia del aerogenerador de 1 kW fue aproximadamente 10% mientras que para el aerogenerador de 10 kW dicha eficiencia estuvo alrededor de 17%.
- La potencia generada por los aerogeneradores aumentó a medida que la velocidad de viento creció hasta un punto máximo alrededor de los 12 m/s, a partir del cual empezó a disminuir ligeramente. Esta disminución se debió a los efectos de entrada en pérdida por parte de los álabes de los aerogeneradores, es decir, las fuerzas de sustentación disminuyeron mientras que las fuerzas de arrastre aumentaron rápidamente.
- A pesar que las bajas velocidades (menores a 5 m/s) fueron las predominantes en el Campus de la *UNS*, estas aportaron menor energía que las velocidades medias (entre 5 y 10 m/s) ya que estas últimas tienen una mayor densidad energética. Por otro lado, las altas velocidades (mayores a 10 m/s) tuvieron un aporte energético relativamente bajo ya que su frecuencia de ocurrencia fue muy baja.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se analizaron con éxito 6 perfiles aerodinámicos para la obtención de la geometría óptima de los rotores de aerogeneradores de baja potencia de 1, 2.5, 5 y 10 kW para su operación en el Campus de la *UNS*. Este análisis incluyó la caracterización de las velocidades y direcciones de viento dentro del Campus de la *UNS*, la selección y simulación de perfiles aerodinámicos usando una metodología basada en *CFD*, la determinación de la geometría de los rotores de aerogeneradores de baja potencia de 1, 2.5, 5 y 10 kW y la estimación de la cantidad de energía anual generada por estos.
- La dirección de viento predominante en el Campus de la *UNS* correspondió a Sur Sur Oeste (SSO) con un 90.24% de frecuencia de suceso. Las direcciones Sur (S) y Sur Oeste (SO) presentaron frecuencias de 5.37% y 3.11%, respectivamente. Las demás direcciones presentaron frecuencias menores al 1%. Las velocidades de viento predominante a la altura de 10 m.s.n.s. estuvieron en el intervalo entre 2 y 3 m/s (frecuencia de 20.5%) seguido del intervalo entre 3 y 4 m/s (19.7%). El acumulado de frecuencias de velocidades menor a 5 m/s representó el 85.7% del total. Notar que la frecuencia de velocidades de viento nula es 0%.
- Se seleccionaron los perfiles NACA 2412, NACA 4412, E387, S1223, SD7032 y FX63-137 para el estudio. El perfil aerodinámico SD7032 fue el que mostró una mayor relación C_l/C_d de 63.80 para un α de 7° y Re de 500 000. Por ello, el diseño de los aerogeneradores se realizó con dicho ángulo y perfil, para el cual se pudo obtener los aerogeneradores con mayor eficiencia. Notar que el perfil NACA4412 solamente alcanzó una relación C_l/C_d máxima de 54.27 para los mismos α y Re mencionados. El borde de ataque del perfil SD7037 presentó mayores velocidades que el perfil NACA4412. El borde de fuga del perfil SD7032 mostró un área

relativamente pequeña de velocidades cercanas a cero en comparación con el perfil NACA4412. Esto ayudó a que el perfil SD7032 tuviera menos pérdidas y por ende una mayor relación C_l/C_d que el perfil NACA4412.

- Se usó un modelo numérico basado en *CFD* para la simulación de los perfiles, el cual fue verificado con ayuda de datos experimentales de C_l y C_d del perfil S809 extraídos de la literatura científica. Los resultados mostraron que para el C_l , los errores son menores al 13%, lo cual es aceptable numéricamente. Por otro lado, los errores del C_d llegan a ser de hasta 75.8% para un Re de 750 000, lo cual hizo concluir que el modelo numérico no es bueno prediciendo los C_d , a pesar de ello, errores del orden de magnitud obtenidos en la presente tesis son similares a aquellos encontrados en la literatura. Adicionalmente, ya que los aerogeneradores son diseñados para trabajar con α relativamente bajos, la dificultad en la predicción de los coeficientes a altos α no se esperó que sea un problema.
- Los aerogeneradores fueron diseñados con un λ de 6, el cual fue el más favorable ya que C_p mayores son logrados en ese punto de operación. Se escogió una velocidad de viento de 8 m/s para el diseño de los álabes. La longitud de los álabes diseñados fue de 1.663, 2.617, 3.688 y 5.207 m. para los aerogeneradores de 1, 2.5, 5 y 10 kW, respectivamente. A medida que los aerogeneradores aumentaron en potencia y tamaño, las cuerdas de sus perfiles disminuyeron haciendo que los álabes sean relativamente más delgados. El θ_T fue similar para todos los perfiles que conformaron los álabes.
- El escalamiento de los aerogeneradores fue casi lineal en cuanto a la potencia de diseño, es decir, la relación de energía producida entre el aerogenerador de 1 kW y aquel de 2.5 kW estuvo alrededor de 1/2.5. De forma similar sucedió con los otros aerogeneradores diseñados. Notar que esta linealidad se va perdiendo a medida que las potencias de diseño son mayores. Se estima que los aerogeneradores diseñados de 1, 2.5, 5 y 10 kW producirían 1 810, 4 620, 9328 y 18 911 kWh/año, respectivamente.

5.2. Recomendaciones

- Obtener datos de velocidades y direcciones de viento del Campus de la *UNS* para un periodo de 10 años, con lo cual los análisis estadísticos serán más confiables.
- Comprobar que a la altura de 30 m.s.n.s. las estructuras dentro del Campus de la *UNS* no perturbarán el flujo que llega al rotor de los aerogeneradores.
- Realizar simulaciones de los perfiles aerodinámicos con modelos de turbulencia más complejos para poder captar mejor la física que rige al viento alrededor de los perfiles.
- Llevar a cabo simulaciones numéricas de los álabes diseñados para obtener mejores aproximaciones de la potencia y energía generada por ellos. Asimismo, estudiar numéricamente las características de la interacción del viento con los álabes.
- Efectuar un análisis mecánico de los rotores de los aerogeneradores diseñados con el perfil SD7032 para comprobar que no se presentarán problemas estructurales durante su operación.
- Realizar un análisis económico de los aerogeneradores diseñados y compararlo con aerogeneradores comerciales para cuantificar mejor los beneficios del diseño con bajas velocidades de viento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y VIRTUALES

- Airfoil Tools. (08 de enero de 2022). *Airfoil Tools*. Airfoil Tools. <http://airfoiltools.com>
- Ansys. (2017). *User's Guide*. Ansys Fluent 17.1.
- Ansys. (2010a). *Lecture 2: Introduction to CFD Methodology* [Diapositiva de PowerPoint]. Introduction to ANSYS FLUENT.
- Ansys (2010b). *Lecture 4: Cell Zones and Boundary Conditions* [Diapositiva de PowerPoint]. Introduction to ANSYS FLUENT.
- Belamadi, R., Djemili, A., Ilinca, A. y Mdouki, R. (2016). Aerodynamic performance analysis of slotted airfoils for application to wind turbine blades. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 79-99.
- Butterfield, C. P., Musial, W. P. y Simms, D. A. (1992). *Combined Experiment Phase I Final Report*. NREL/TP-257-4655.
- Cortez, M. (2014). *Análisis aerodinámico de la hélice de un aerogenerador tripala de eje horizontal de 3 KW mediante simulación numérica* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú], Alicia.
- Delta Volt (03 de enero de 2022). *Black 300, el Aerogenerador Eficiente*. Delta Volt. <http://deltavolt.pe/pv-systems/black300>
- El Khchine, Y. y Sriti, M. (2017). Boundary layer and amplified grid effects on aerodynamic performances of S809 airfoil for horizontal axis wind turbine (HAWT). *Journal of Engineering Science and Technology*, 12(11), 3011 - 3022.
- Elfarrar, M. A., Sezer-Uzol, N. y Akmandor, I. S. (2013). NREL VI rotor blade: numerical investigation and winglet design and optimization using CFD. *Wind Energy*, 17(4), 605-626.
- Fernández, P. (1993). *Energía Eólica*. Servicio Publicaciones E.T.S.I. Industriales y T.
- Fluent (07 de diciembre de 2021). *ANSYS FLUENT*. The Pressure-Velocity Coupling Method. <https://www.sharcnet.ca>
- Gonzales, S. y Chiroque, J. E. (2006). Diseño y construcción de un aerogenerador de 500 W con imanes permanentes para pequeñas demandas eléctricas de zonas rurales. *Tecnia*, 16(2), 69-76.
- Grasso, F. (2011). Usage of Numerical Optimization in Wind Turbine Airfoil Design. *Journal of Aircraft*, 48, 248-255.
- Gregorek, G. M., Hoffmann, M. J. y Mulh, K. E. (1991). *Wind Tunnel Test of the S809 Airfoil Model*. Aeronautical and Astronautical Research Laboratory. Ohio State University.

- Guillermo, J. (2006). *Simulación fluidodinámica alrededor de un perfil NACA mediante el método de volúmenes finitos* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos], Alicia.
- Hansen, M. (2015). *Aerodynamics of Wind Turbines*. Routledge.
- Hsiao, F. B., Bai, C. J. y Chong, W.T. (2013). The Performance Test of Three Different Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) Blade Shapes Using Experimental and Numerical Methods. *Energies*, 6, 2784-2803.
- LIDERS (04 de enero de 2022). *Aerogeneradores LIDERS*. LIDERS. <http://www.energiasrenovablesperu.com/aerogeneradores-solares.asp?p=4>
- Lopez, M. B., Leal, D. F. y Lemos, S. Y. (2015). Sistema de Control para Aerogeneradores Empleando Lógica Difusa. *Difu100@ Revista en Ingeniería y Tecnología, UAZ*, 8(3).
- Manwell, J. F., McGowan, J. G. y Rogers, A. L. (2009). *Wind energy explained: theory design and application*. Wiley.
- Mathew, S. (2006). *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer.
- Mauro, S., Lanzafame, R., Messina, M. y Pirrello, D. (2017). Transition turbulence model calibration for wind turbine airfoil characterization through the use of a Micro-Genetic Algorithm. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 1-16.
- Mohammadi, K., Alavi, O., Mostafaeipour, A., Goudarzi, N. y Jalilvand, M. (2016). Assessing different parameters estimation methods of Weibull distribution to compute wind power density. *Energy Conversion and Management*, 108, 322–335.
- Naqvi, M. A., Abbas, A., Hamid, M., Tarar, H. y Ahmed, L. (2015). Aerodynamic Design Optimization of Residential Scale Wind Turbine Blades for Lower Wind Speeds. *International Journal of Renewable Energy Research*, 5(2), 373-385.
- National Renewable Energy Laboratory. (17 de noviembre de 2017). *NWTC Information Portal*. http://wind.nrel.gov/airfoils/Shapes/S809_Shape.html
- Pro Viento (05 de enero de 2022). *Aerogeneradores*. <http://www.proviento.com.pe/aerogeneradores.html>
- Rodriguez, C. V. (2019). *Estudio numérico del comportamiento aerodinámico de los álabes de un aerogenerador de 10 kW para mejorar su eficiencia* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. Alicia.
- Saber, M. R. y Djavareshkian, M. H. (2014). Comparison of Performance Base and Optimized Blades of Horizontal Axis Wind Turbine. *International Journal of Renewable Energy Research*, 4(1), 61-68.

- Sayed, M. A., Kandil, H. A. y Shaltot, A. (2012). Aerodynamic analysis of different wind-turbine-blade profiles using finite-volume method. *Energy Conversion and Management*, 64, 541-550.
- Schlichting, H. (1979). *Boundary-Layer Theory*. McGraw-hill.
- Seguro, J. V. y Lambert, T. W. (2000). Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 75-84.
- Shen, X., Yang, H., Chen, J., Zhu, X. y Du, Z. (2016). Aerodynamic shape optimization of non-straight small wind turbine blades. *Energy Conversion and Management*, 119, 266-278.
- Somers, D. M. (1997). *Design and Experimental Results for the S809 Airfoil*. NREL/SR-440-6918.
- Tenguria, N., Mittal, N. D. y Ahmed, S. (2010). Investigation of blade performance of horizontal axis wind turbine based on blade element momentum theory (BEMT) using NACA airfoils. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(12), 25-35.
- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indraja, V. y Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1351-1371.
- U.S. Energy Information Administration. (12 de agosto de 2021). *Types of Wind Turbines: U.S. Energy Information Administration*. U.S. Energy Information Administration. https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm/index.cfm?page=wind_types_of_turbines
- Versteeg, H. y Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The finite volume method*. Prentice Hall.
- Wais, P. (2017). A review of Weibull functions in wind sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1099-1107.

ANEXOS

Anexo 1

Velocidades horarias de viento (m/s).

1.5	4.5	1.3	2.0	5.1	1.7	3.1	5.6	0.8	1.6	4.4	3.4	1.3	2.3	3.5	0.7	2.5	4.4	3.0	5.6	0.7	4.5	1.9	0.9	5.7
0.7	3.9	1.9	2.0	4.6	2.1	2.3	4.9	2.6	2.1	4.1	4.4	1.9	1.3	4.0	0.9	3.0	4.4	2.7	5.2	0.4	5.6	1.3	1.2	4.8
0.8	3.6	3.4	1.7	4.0	3.5	2.3	4.2	3.8	1.9	3.6	3.9	1.2	1.5	4.2	0.6	3.5	3.9	1.9	5.2	0.6	6.0	1.2	1.6	4.6
0.8	4.1	5.3	2.4	3.8	4.8	2.4	3.6	4.9	0.7	2.8	3.7	1.1	2.1	3.5	0.6	2.9	3.6	2.3	4.4	0.5	6.3	1.2	3.6	3.7
1.2	4.1	5.1	2.4	2.8	5.4	1.5	3.5	5.8	0.8	2.5	4.5	0.8	1.6	3.6	0.8	3.5	3.6	1.8	3.2	0.4	6.1	0.8	4.4	2.7
1.2	3.5	5.6	1.6	2.8	5.0	0.4	3.1	6.5	1.0	2.2	5.4	1.1	1.7	3.2	1.5	4.8	2.1	1.5	2.8	0.5	6.1	0.7	4.3	2.9
0.7	2.4	5.8	2.1	2.0	5.7	0.5	2.7	5.9	0.4	3.3	5.7	0.6	1.7	3.1	0.8	4.8	2.4	3.1	2.3	0.7	6.0	0.4	4.7	2.8
0.4	2.6	5.5	1.9	2.1	5.4	0.5	2.7	5.9	0.6	3.0	5.9	0.5	2.3	3.0	1.1	4.8	2.4	5.7	1.2	0.8	5.5	0.5	4.9	2.3
0.8	2.0	5.5	0.9	1.4	4.7	0.6	1.8	5.2	0.8	2.8	5.9	0.8	2.3	2.4	0.9	4.2	1.3	5.5	0.5	1.1	4.5	0.5	5.5	1.8
2.2	2.2	5.2	1.9	0.7	4.2	1.7	1.3	4.6	2.2	2.4	4.8	2.0	2.4	1.9	0.6	3.5	0.7	6.7	1.1	1.3	3.6	0.6	4.5	0.7
3.5	0.6	4.0	3.2	1.0	2.9	4.5	1.1	4.2	4.4	3.3	4.0	3.7	3.2	1.8	0.9	2.4	0.5	6.4	1.1	2.1	3.3	0.7	3.9	1.1
4.3	1.2	3.5	5.2	0.9	3.1	6.0	0.4	3.4	5.4	3.5	3.2	5.2	3.4	1.3	1.2	3.1	0.9	5.8	0.6	2.6	3.6	0.4	3.4	1.4
5.1	1.1	2.7	6.2	0.5	2.9	6.8	0.5	3.1	5.2	3.0	2.9	6.3	4.3	2.5	1.4	3.5	0.6	5.6	0.4	2.9	2.7	0.6	3.4	1.5
5.5	0.8	2.6	6.4	0.5	2.8	6.6	0.5	2.5	5.2	2.5	2.7	5.5	5.2	3.1	2.6	3.7	1.2	5.2	0.5	3.1	2.3	0.8	3.1	1.8
5.9	1.3	2.9	5.9	0.4	2.5	6.7	0.5	2.1	5.5	0.8	3.2	5.5	5.5	1.7	3.8	3.3	1.5	3.8	0.4	3.8	1.3	2.2	2.8	1.1
5.4	1.0	3.0	6.1	1.1	2.8	6.5	0.6	1.8	4.7	0.7	2.3	5.7	4.8	0.6	4.2	3.0	2.8	3.9	0.4	4.6	1.3	2.9	2.5	0.8
5.2	1.8	2.6	5.8	0.8	2.7	7.1	0.7	1.6	5.1	0.8	1.8	5.1	4.2	1.1	5.0	2.8	4.1	3.6	0.4	4.3	1.9	3.8	2.2	2.1
4.8	2.5	1.7	5.0	2.0	2.6	6.4	1.7	2.8	4.5	1.8	1.8	4.7	4.0	0.8	5.6	1.9	5.3	2.4	0.5	3.7	1.4	4.5	1.3	3.1
3.3	3.7	1.5	3.9	4.3	2.6	5.0	2.6	2.2	4.1	1.7	2.3	4.4	3.3	0.4	5.3	1.9	6.0	2.7	1.0	2.6	0.5	4.6	0.6	3.9
3.1	4.8	1.9	3.7	5.7	2.2	4.1	3.6	0.5	3.1	3.0	2.9	3.4	3.0	0.5	5.1	3.1	6.2	3.2	2.4	2.4	0.4	4.2	0.7	4.1
3.0	5.8	2.0	4.3	6.3	1.5	3.5	4.4	0.7	3.4	4.3	1.8	3.0	2.8	1.9	4.5	3.0	5.4	3.0	3.8	2.4	0.4	4.1	0.7	4.7
2.7	6.2	0.9	3.9	6.7	0.5	3.5	5.1	0.9	3.1	4.5	0.9	4.3	2.5	1.5	3.3	2.9	6.2	3.8	4.6	1.9	0.6	4.1	0.8	4.9
2.1	6.1	0.5	3.3	6.7	0.4	2.6	5.0	0.7	2.8	4.2	0.4	4.0	2.5	1.5	1.9	3.2	6.0	3.2	4.9	1.2	1.2	4.1	1.3	5.7
0.9	5.6	0.4	3.4	6.0	0.4	1.9	5.0	0.5	2.6	4.6	0.5	2.9	2.9	2.3	2.0	2.3	5.1	3.7	6.3	0.6	2.0	3.0	1.0	5.4
0.8	5.4	0.7	3.2	5.1	0.4	1.6	4.9	0.8	1.7	3.9	1.1	1.7	2.8	3.3	2.0	3.7	4.3	3.9	6.4	0.4	3.2	2.5	0.4	5.5
0.7	5.4	1.8	2.9	4.9	1.6	1.7	4.3	1.9	1.1	3.8	3.1	1.9	2.3	4.1	0.7	3.7	3.8	3.0	5.9	0.4	4.7	2.7	0.7	4.6
0.6	5.3	2.9	2.5	4.1	3.1	1.9	3.5	3.4	1.4	3.3	3.2	2.2	2.2	4.5	0.8	3.5	3.3	1.0	5.3	0.4	5.7	2.4	0.9	4.0
0.6	4.7	3.9	1.8	3.3	4.9	1.3	3.4	5.1	1.6	2.8	3.8	2.4	2.1	4.5	1.6	3.9	3.3	0.5	4.7	0.4	5.9	1.6	1.6	3.5
0.9	4.1	5.1	0.9	3.0	5.3	1.6	3.3	6.2	1.7	2.5	4.9	2.4	1.2	5.0	1.7	3.8	2.8	0.7	4.0	0.5	6.9	1.0	2.2	2.6
0.4	3.7	5.5	1.5	3.1	6.1	2.3	4.0	6.1	1.3	3.0	6.3	1.8	1.2	4.8	1.8	4.1	3.4	1.4	3.3	0.5	6.6	0.7	4.9	3.3
0.4	3.2	5.7	1.0	2.5	6.1	2.1	2.5	5.8	1.3	2.9	5.9	0.8	1.4	4.0	2.2	4.1	3.4	3.2	2.4	0.4	6.0	0.7	5.2	2.9
0.4	2.0	6.0	0.6	1.7	5.6	1.4	1.2	5.0	1.8	2.7	5.7	0.5	3.1	3.1	1.3	3.7	3.4	5.1	2.3	0.4	5.6	0.8	5.9	2.7
0.9	1.6	5.3	1.3	2.2	5.5	1.4	1.2	4.6	2.0	2.1	5.7	0.7	4.0	3.2	1.7	4.3	2.6	5.9	1.0	0.8	4.9	1.3	5.8	1.7
2.0	1.9	5.0	2.8	1.8	4.2	1.3	0.6	4.6	3.1	0.7	5.1	1.9	4.4	3.1	1.1	3.8	2.4	6.4	1.3	1.2	4.4	1.4	5.1	0.7
3.3	2.6	4.6	4.6	1.9	4.5	2.3	0.9	3.8	5.1	0.6	4.4	3.3	4.7	2.8	0.6	2.9	2.8	6.0	1.4	2.6	3.8	0.9	4.3	1.5
4.6	0.9	3.8	6.0	1.8	4.4	3.9	0.4	3.2	5.5	1.1	3.0	4.7	5.3	2.8	1.1	2.8	3.0	5.1	1.7	3.4	2.5	1.0	4.6	2.4
5.4	0.7	4.0	6.2	1.1	4.7	4.9	0.7	3.1	6.2	1.5	2.7	5.7	6.3	3.0	2.2	2.9	2.8	4.4	2.1	3.6	2.7	2.0	3.8	2.1
5.7	1.5	3.2	6.1	1.3	3.8	5.5	0.4	3.2	6.1	2.7	3.0	5.9	5.8	2.3	2.7	2.6	3.4	3.9	1.4	5.1	2.6	2.2	3.0	1.3
5.7	1.5	3.2	6.1	1.4	3.6	5.7	1.0	2.2	5.8	2.3	3.2	5.8	5.3	1.5	2.9	2.8	1.4	3.7	1.5	4.5	3.2	3.6	2.4	1.2
5.6	1.1	3.1	5.8	1.8	3.0	6.0	1.1	1.8	5.0	2.9	2.5	5.9	4.7	1.7	3.0	3.2	1.9	3.1	0.8	5.0	2.7	4.7	1.4	1.7

Anexo 1 (continuación)

Velocidades horarias de viento (m/s).

5.5	4.0	3.2	3.8	3.1	3.8	2.5	1.7	2.8	3.2	4.5	4.2	5.7	4.2	1.7	4.0	3.0	2.1	3.2	0.6	4.9	1.0	5.4	1.7	2.6
5.3	3.5	3.5	3.6	2.6	2.9	2.7	0.8	3.9	4.7	5.1	4.4	4.8	2.7	1.0	4.7	2.2	3.7	3.5	0.4	4.3	1.3	6.0	0.8	3.8
4.4	3.0	2.6	3.4	2.8	2.9	1.9	2.6	3.9	5.0	5.6	4.3	4.6	1.4	0.8	4.2	2.2	4.8	3.1	0.6	2.8	2.5	5.8	1.1	4.6
4.2	2.8	2.3	2.7	2.3	2.9	2.1	3.6	4.9	5.1	5.4	4.1	4.3	1.1	1.0	4.1	1.5	5.4	2.2	2.3	2.7	2.7	6.6	1.5	5.1
3.9	2.4	2.2	2.5	1.9	2.6	2.4	4.9	5.3	5.2	5.2	3.7	4.2	0.8	1.4	3.5	0.6	5.6	1.1	4.1	2.4	2.3	5.4	1.5	6.2
3.2	2.8	3.4	2.3	2.4	2.5	2.9	5.6	5.9	5.2	5.3	2.8	3.7	1.2	0.9	2.7	0.5	5.6	0.8	4.9	3.3	1.4	5.0	1.7	6.8
3.7	3.2	3.3	2.1	2.6	2.6	2.9	6.4	6.2	5.3	4.9	2.2	2.9	1.7	2.7	2.3	0.4	4.5	0.5	5.7	1.8	0.9	5.6	1.3	6.3
3.4	2.6	2.7	2.1	2.8	3.1	3.0	6.3	6.0	4.4	4.7	2.2	2.3	1.1	2.7	0.8	0.6	4.8	0.4	6.3	1.1	2.5	4.6	0.8	5.7
2.2	1.5	0.7	2.7	3.4	3.0	4.1	6.3	5.8	4.0	4.6	2.1	0.9	0.8	3.6	0.4	2.2	3.9	2.0	6.2	0.6	4.5	3.8	0.5	4.7
2.3	0.8	0.6	2.5	4.0	2.8	4.9	5.6	5.4	3.1	3.5	2.2	1.2	1.1	4.6	0.4	1.4	3.7	2.0	6.3	0.6	4.1	3.2	0.4	4.4
2.4	0.7	1.3	1.1	5.2	2.4	5.7	5.9	4.0	2.9	4.0	2.5	1.3	0.9	4.7	1.0	2.8	3.6	2.5	5.9	0.8	6.1	2.9	0.7	3.6
2.2	0.4	0.5	2.7	5.7	3.4	5.1	5.1	3.2	2.5	4.5	2.5	0.6	0.5	4.6	1.5	3.5	4.1	2.5	5.2	1.2	6.8	3.0	1.1	3.4
2.4	1.3	1.3	4.2	6.0	3.5	4.7	4.3	3.7	3.1	3.5	2.5	0.7	0.5	5.0	1.2	4.3	2.9	2.8	4.4	0.7	6.4	2.1	1.7	3.4
0.7	3.3	1.6	5.5	5.7	4.3	4.5	3.8	4.2	3.1	2.8	1.8	0.4	1.4	4.2	0.7	5.1	2.8	3.0	4.2	0.6	5.4	1.0	3.7	3.2
0.5	3.8	2.4	6.7	5.3	4.9	3.8	2.3	3.5	2.9	1.6	0.7	0.4	1.3	3.7	1.0	6.0	2.3	3.5	1.1	0.6	4.9	1.5	4.2	2.9
1.0	4.5	3.0	7.1	5.5	4.5	3.6	2.2	3.1	2.5	1.5	1.0	0.5	1.2	3.1	0.6	5.6	2.8	4.4	1.7	1.0	5.4	1.4	4.7	2.2
0.9	5.6	3.3	6.2	5.5	3.5	3.6	1.7	2.1	1.8	2.8	2.0	0.8	1.6	2.9	0.5	4.4	1.8	5.4	2.8	1.3	4.6	2.0	5.4	1.3
0.9	5.7	4.1	6.6	5.6	3.2	3.4	1.2	1.5	1.0	2.9	1.8	1.5	1.9	2.6	0.4	4.3	0.5	6.9	2.6	2.0	4.2	0.6	5.4	2.8
2.2	5.9	4.2	6.2	5.0	3.1	2.8	1.2	0.6	1.2	2.4	1.5	2.4	1.8	2.2	0.4	3.9	1.3	6.4	2.7	2.2	3.8	0.9	4.9	2.3
3.1	5.2	4.4	5.0	4.9	3.0	1.8	1.4	0.7	1.7	3.9	2.8	3.0	3.4	2.3	1.0	4.0	1.5	6.3	2.1	3.4	3.7	1.9	4.4	2.1
3.7	5.4	4.8	4.6	4.8	3.0	1.1	1.1	0.6	2.0	3.4	3.6	2.0	4.1	2.6	1.9	3.1	0.8	5.9	1.6	3.3	3.7	1.7	3.7	1.4
4.5	5.9	5.0	4.3	2.9	2.7	1.9	0.8	0.7	2.4	3.3	3.5	2.5	4.5	2.2	2.7	2.1	1.6	5.3	0.9	4.0	1.6	3.4	3.2	0.6
5.1	5.1	3.9	4.1	1.8	2.9	1.5	0.6	0.4	2.8	3.6	3.6	4.2	4.9	1.8	4.1	2.5	2.6	4.7	0.7	4.9	0.6	6.3	2.6	0.6
5.9	5.0	3.1	2.9	2.4	2.8	1.9	0.6	0.4	2.4	3.4	4.1	4.9	4.4	1.4	4.4	2.7	3.1	4.1	1.4	5.4	0.5	6.5	2.2	0.8
5.8	4.0	3.2	3.2	3.3	2.4	1.0	0.5	1.3	2.5	3.2	4.8	5.8	3.5	1.3	5.0	2.4	4.6	4.0	1.9	4.9	0.7	5.8	1.8	0.8
5.2	3.7	2.5	3.2	3.3	2.2	0.6	0.4	2.0	3.1	4.0	4.6	5.4	2.7	0.5	4.9	2.0	5.8	3.6	0.4	3.5	1.3	5.8	0.9	2.6
4.4	3.5	2.4	2.4	3.1	3.0	1.5	0.7	2.2	4.7	4.4	5.1	5.6	2.7	1.2	5.0	1.6	6.7	3.3	1.1	3.1	0.9	6.2	1.1	3.5
3.9	3.3	2.5	2.2	3.2	2.8	2.6	1.0	3.4	4.9	5.4	4.4	4.4	2.4	1.7	4.2	1.4	7.0	2.6	2.8	2.6	1.3	5.7	1.4	5.1
3.4	3.1	2.7	2.4	3.4	2.4	3.8	1.1	4.5	5.3	5.5	3.5	4.5	1.9	1.4	3.9	0.7	6.3	1.9	4.1	1.8	2.8	5.0	1.0	6.1
2.8	3.3	2.5	2.1	2.6	3.0	2.5	2.2	5.3	5.2	5.0	3.1	3.2	0.8	1.4	2.8	0.6	6.0	0.8	5.4	2.4	3.3	4.6	0.5	6.2
3.0	2.8	1.6	2.3	2.5	3.0	2.1	2.1	5.5	4.9	4.7	3.2	2.7	1.2	1.9	2.0	0.4	5.8	0.9	5.4	1.9	2.7	3.4	0.5	5.9
3.8	2.3	0.7	2.6	2.0	3.3	3.5	1.9	5.8	5.0	4.9	2.7	2.5	0.9	2.2	1.2	0.5	4.8	1.3	5.6	0.4	2.2	3.5	0.4	5.1
3.1	2.5	0.5	2.5	1.5	4.0	4.7	3.0	5.2	4.6	4.1	1.9	3.2	1.8	2.7	1.7	0.5	3.9	1.2	6.0	0.5	2.7	3.7	0.5	4.8
2.7	1.8	0.6	2.1	2.8	4.8	5.2	3.8	4.8	4.2	3.7	1.8	2.7	2.9	3.1	1.7	1.1	3.8	1.6	5.1	0.9	3.5	3.8	0.4	5.3
3.1	1.3	0.4	2.3	3.0	5.4	5.7	4.6	4.9	4.4	3.0	3.2	2.8	1.9	2.6	1.8	1.7	3.7	1.7	5.2	0.4	4.5	4.0	0.5	5.3
2.1	0.9	0.6	2.2	3.8	6.1	4.9	4.1	4.7	3.9	2.5	3.0	2.6	0.9	3.9	1.4	1.5	3.6	1.1	4.9	0.4	5.6	3.0	1.1	4.8
2.0	0.8	1.3	2.7	5.9	5.8	4.9	4.4	4.8	3.0	2.9	2.7	1.4	0.9	4.7	1.1	1.6	3.5	1.7	4.9	0.8	5.7	1.6	2.5	4.4
1.8	1.0	2.3	2.1	6.3	5.9	4.0	3.5	3.8	3.0	2.8	1.9	2.1	0.6	4.1	1.2	3.6	3.8	2.7	3.3	0.5	4.8	0.9	2.6	3.5
2.0	0.8	3.6	3.5	6.1	5.8	4.0	3.4	3.4	2.5	2.2	1.4	1.6	0.9	3.9	1.8	4.3	3.1	4.0	2.6	0.5	5.4	0.8	3.4	3.6
2.4	1.4	4.6	5.1	5.9	5.6	3.4	2.8	3.5	2.1	1.8	1.4	1.5	0.9	3.7	1.5	4.7	2.4	4.5	2.2	0.8	4.7	1.3	3.6	3.1
2.0	1.7	5.3	5.6	5.5	4.5	3.1	2.8	3.0	2.2	2.7	1.6	2.0	1.2	3.2	0.9	4.6	1.8	5.9	1.0	1.1	4.1	0.5	4.2	3.1
3.2	3.1	5.6	6.2	4.7	5.3	3.3	3.1	3.2	1.0	1.6	1.3	2.3	1.3	3.2	1.4	4.4	2.3	7.3	1.1	2.1	3.2	0.5	4.6	2.5
4.5	5.0	6.1	5.9	4.4	3.6	3.6	2.7	1.9	1.4	1.6	0.9	1.6	1.9	3.0	1.4	3.8	1.2	6.7	1.1	2.3	3.0	1.4	4.3	0.6
5.5	5.7	5.9	5.0	4.2	3.2	2.7	3.3	1.6	1.3	1.8	1.2	1.8	2.5	2.0	1.4	4.2	1.6	6.0	0.8	4.3	2.3	2.1	4.3	1.2
5.6	4.8	5.7	4.5	3.9	4.0	2.7	3.0	1.7	0.5	1.6	1.4	2.3	2.6	2.5	1.8	3.9	2.2	5.5	1.7	4.8	1.3	2.1	4.1	1.5

Anexo 1 (continuación)

Velocidades horarias de viento (m/s).

5.9	5.0	5.6	4.3	4.2	3.3	2.7	1.9	1.4	0.4	2.7	2.9	3.3	3.5	2.8	2.4	4.1	1.6	4.4	1.4	5.7	0.9	0.8	3.4	0.7
6.3	4.4	4.8	4.0	3.0	3.3	3.2	0.8	1.7	1.2	2.8	3.7	3.7	3.2	2.3	3.4	3.8	3.3	3.9	1.7	5.2	0.6	2.4	2.6	1.4
6.1	4.2	3.7	3.4	3.4	3.2	2.8	1.1	1.2	2.1	3.0	3.9	4.1	3.7	2.2	4.4	3.2	3.5	3.7	1.5	5.0	0.9	4.0	1.6	1.1
6.2	3.9	3.0	4.0	3.1	2.7	2.1	1.0	0.8	2.2	4.1	4.0	4.3	3.4	1.9	4.8	3.4	4.5	3.2	2.1	4.3	0.7	4.5	1.0	0.7
5.9	3.9	2.8	3.6	2.6	2.5	1.1	0.6	1.2	1.6	3.8	4.2	3.5	2.8	0.9	4.9	3.4	4.9	3.7	0.9	2.5	0.5	5.3	1.2	0.9
5.6	3.7	2.8	3.0	3.1	1.9	0.9	1.8	1.5	2.8	3.6	5.0	3.6	3.2	0.9	4.2	3.9	6.0	2.9	1.6	1.4	0.8	6.4	1.1	2.5
4.9	3.4	3.0	1.8	2.5	1.9	1.7	3.1	1.9	3.1	4.3	4.8	2.7	2.9	1.3	3.6	3.8	6.3	2.7	2.5	1.9	1.4	6.4	1.1	4.4
4.5	3.5	2.5	2.0	3.1	2.2	2.9	4.6	3.2	3.3	4.4	4.3	2.6	2.6	1.1	2.7	3.8	6.4	2.1	3.3	2.7	0.7	5.7	1.5	5.2
4.8	3.6	1.7	2.0	2.9	2.2	4.3	5.5	4.3	3.4	5.0	3.8	2.8	2.2	2.2	2.8	3.4	6.7	2.3	4.6	2.3	0.8	5.6	1.3	5.9
3.8	3.6	2.2	2.0	2.9	1.7	5.7	5.8	5.0	3.4	4.2	3.3	2.5	1.8	2.2	1.9	2.9	6.9	2.5	5.9	0.6	0.9	4.6	1.1	5.8
2.8	2.8	2.4	2.3	2.7	1.7	6.1	5.7	4.6	3.1	4.2	2.6	1.9	1.6	2.0	1.8	2.3	5.4	2.5	6.1	0.7	2.1	3.5	0.5	4.9
3.1	2.0	1.5	2.3	2.7	2.0	6.8	6.1	4.7	3.0	3.7	2.1	2.3	0.6	2.5	1.8	1.7	5.2	2.7	5.9	1.7	3.5	4.0	0.7	4.2
3.7	0.4	1.7	2.9	2.6	2.5	6.9	6.0	4.3	2.3	3.1	2.1	2.5	1.2	3.5	1.5	0.9	5.1	1.1	6.0	1.9	4.9	4.5	0.4	3.8
2.9	0.8	2.3	2.1	3.1	3.4	6.4	5.4	4.0	1.8	2.8	2.5	2.1	1.6	3.6	1.1	2.5	4.4	0.6	5.1	1.2	5.7	3.5	0.6	3.4
3.2	1.0	3.2	2.8	3.9	4.1	6.2	4.7	3.9	2.0	2.7	2.5	1.9	0.8	4.2	0.8	3.5	4.2	1.0	4.5	0.6	5.0	1.7	1.4	3.2
2.5	1.2	3.5	4.0	3.9	4.7	6.3	3.8	3.3	1.1	2.1	2.4	1.9	1.1	4.3	0.6	4.5	4.8	0.5	3.6	0.8	5.2	1.0	3.1	2.7
2.1	2.8	4.0	5.0	4.5	5.1	5.7	3.9	2.9	2.1	1.4	1.6	1.6	1.2	4.3	0.4	5.1	4.3	2.2	3.0	0.5	5.4	0.8	5.2	1.9
1.7	2.8	4.3	5.2	5.6	4.5	4.7	3.5	2.8	1.2	1.0	1.6	1.1	1.5	3.7	0.4	4.4	4.3	3.6	1.7	0.4	4.9	0.9	5.6	0.9
1.7	3.4	5.7	5.7	5.2	4.6	4.4	3.4	0.7	0.4	0.7	1.6	0.7	2.1	3.0	0.5	4.8	2.9	6.0	0.9	0.5	4.0	0.9	5.5	0.7
3.0	4.5	6.6	6.0	5.1	4.2	3.9	2.7	0.7	0.4	0.7	0.8	0.9	3.0	2.7	0.4	4.8	2.8	6.6	1.2	1.1	3.5	0.9	5.6	1.3
2.6	5.0	6.3	5.9	4.5	3.8	3.7	3.2	2.3	0.4	2.2	1.2	1.5	4.3	3.0	0.7	4.5	2.3	6.7	0.7	1.8	3.1	0.7	6.2	2.0
3.0	5.5	6.7	5.8	3.6	3.1	2.9	3.5	3.1	1.1	1.6	1.9	1.8	5.5	2.8	0.7	4.2	1.0	6.2	1.4	2.7	2.7	0.5	5.3	2.0
4.5	6.7	6.2	5.4	3.7	2.9	2.4	2.9	1.7	1.1	1.3	2.3	1.6	6.0	2.1	1.0	3.6	1.2	6.6	0.7	3.6	2.5	0.5	4.8	1.5
5.3	6.5	6.0	4.7	3.7	3.5	2.1	2.6	2.1	0.8	1.2	1.5	2.1	6.5	0.9	1.3	3.9	1.5	6.1	1.1	4.9	1.8	0.8	4.5	1.1
5.8	6.4	5.6	4.1	3.9	3.2	3.3	2.8	1.2	0.5	1.3	2.7	2.4	5.7	1.3	2.2	4.4	2.5	5.6	1.6	6.0	1.1	1.7	3.6	1.0
5.4	5.4	5.3	3.6	3.6	3.1	2.9	2.4	1.0	1.0	1.7	3.2	3.3	6.1	1.0	2.9	3.9	4.6	4.3	1.3	6.4	0.6	2.1	3.6	0.5
6.1	5.1	4.8	4.1	3.1	2.7	2.4	1.3	0.5	2.0	3.5	4.2	3.3	6.2	0.5	2.6	3.3	6.0	3.7	0.7	5.8	0.7	2.9	3.4	0.5
5.7	4.1	4.5	3.5	3.2	1.5	1.8	0.8	0.5	2.0	4.0	3.9	3.8	4.7	1.4	2.6	2.8	5.0	3.9	0.5	4.8	0.5	4.7	2.7	0.5
5.0	3.5	4.2	3.3	3.0	0.9	1.3	1.1	1.2	2.0	4.8	4.8	3.8	4.4	1.5	2.6	3.0	5.9	4.0	0.4	4.4	0.5	4.2	1.9	1.5
4.7	3.3	3.4	3.6	3.1	1.4	0.9	1.6	3.8	3.9	5.4	4.7	3.4	5.3	1.6	3.6	2.3	6.3	3.4	0.5	3.7	0.5	4.5	2.0	2.3
4.5	1.9	3.0	3.2	2.6	2.0	1.0	3.2	5.0	4.5	5.4	3.9	2.8	4.2	1.9	2.9	2.7	7.3	1.9	1.6	2.7	0.4	3.8	0.6	3.0
4.6	1.8	3.2	2.3	2.9	0.9	2.4	3.7	5.5	5.0	4.9	3.3	2.7	2.4	0.9	3.1	1.8	7.3	1.7	3.7	1.9	0.7	3.6	0.5	3.9
4.3	1.5	4.3	2.2	3.1	1.3	3.2	6.0	5.7	4.3	4.5	3.1	2.5	1.9	0.5	2.8	2.3	7.0	2.1	4.1	1.6	0.5	3.0	0.6	4.8
4.7	1.8	3.9	2.1	2.8	1.4	3.0	6.2	5.2	4.2	3.7	2.4	2.0	1.9	1.3	2.6	2.4	5.8	2.1	3.8	0.6	0.6	3.3	0.5	5.3
4.3	1.1	3.7	2.0	2.9	1.7	3.6	6.2	5.5	4.3	3.4	2.5	2.1	0.9	2.4	2.6	2.8	5.5	1.9	4.9	1.2	1.2	2.6	0.4	5.5
2.9	1.1	3.4	2.2	3.0	3.3	4.4	5.9	6.0	3.8	3.3	2.0	3.1	1.2	3.2	1.5	3.0	5.6	1.8	5.6	0.9	2.4	2.9	0.4	5.1
2.2	1.5	2.3	2.9	3.4	3.8	5.4	5.8	5.2	3.3	2.6	1.9	3.3	2.1	4.7	1.2	3.0	4.7	2.0	5.3	1.7	4.1	2.0	0.5	4.7
2.4	1.2	1.2	3.3	3.7	4.3	5.7	5.8	4.1	2.9	2.9	1.9	3.3	1.1	5.4	1.0	3.5	4.5	1.5	4.7	1.4	5.3	1.3	1.1	3.4
1.9	1.9	2.0	4.0	3.7	5.1	5.9	5.9	3.6	2.9	2.3	1.6	3.8	0.9	5.3	1.5	4.1	4.1	0.9	3.9	0.7	5.5	1.0	1.9	2.4
2.1	1.1	2.2	4.2	4.1	5.9	6.1	4.9	3.1	2.2	0.7	1.3	3.4	1.7	5.3	1.0	3.3	4.2	1.1	3.2	1.4	4.9	1.6	2.8	2.2
2.4	2.3	2.9	4.6	4.3	5.9	5.0	4.9	3.6	1.6	1.5	1.0	1.4	1.3	4.9	0.6	3.3	2.7	1.8	2.3	0.7	4.9	2.5	5.2	1.2
2.2	1.4	3.8	5.4	4.9	5.3	4.1	4.9	3.6	1.0	1.4	0.6	1.1	2.1	3.9	0.5	3.7	2.6	2.8	1.8	1.5	4.1	1.8	5.4	0.6
2.5	2.3	4.5	5.5	6.1	4.7	3.8	4.2	3.0	0.8	1.7	0.6	0.9	2.5	4.1	0.7	4.4	2.1	4.2	1.1	1.3	4.2	0.6	6.2	0.4
3.1	4.0	5.5	5.5	5.9	3.7	3.5	3.3	3.6	0.7	1.1	1.0	1.5	1.8	3.9	0.5	4.4	1.0	5.8	0.9	1.3	3.6	0.5	6.0	0.4
3.3	5.3	6.4	5.8	6.0	3.0	3.0	3.3	3.2	0.5	1.1	0.5	3.6	2.6	3.3	0.6	4.2	1.4	6.8	1.0	1.4	2.8	0.7	6.1	0.4

Anexo 1 (continuación)

Velocidades horarias de viento (m/s).

3.2	5.8	6.7	5.7	4.7	2.7	3.5	3.0	1.9	0.6	1.2	0.6	4.3	3.5	3.2	1.1	3.9	1.4	6.4	1.1	3.7	2.4	1.1	6.1	0.4
3.9	6.1	6.4	5.0	4.2	3.2	2.5	2.3	0.8	0.4	1.2	1.1	4.2	4.7	2.7	1.9	3.8	1.0	6.1	1.0	5.3	2.8	0.6	5.9	0.6
4.4	5.9	6.4	4.2	3.8	3.5	1.8	1.9	1.0	0.4	0.9	1.6	4.9	4.9	2.8	2.5	3.5	1.0	5.5	1.1	5.9	3.6	0.5	5.1	0.9
4.5	5.5	6.2	3.5	3.7	3.0	2.4	2.0	0.9	0.6	0.9	2.9	4.6	5.1	2.2	3.2	2.6	0.6	4.7	1.8	6.2	2.9	0.6	4.5	1.2
5.2	5.2	5.3	3.6	3.8	3.0	2.9	2.2	1.0	0.5	1.9	3.3	4.7	5.0	2.5	3.4	2.9	0.5	4.3	1.8	5.4	3.4	1.4	4.3	0.7
6.0	4.8	4.7	3.5	3.2	2.9	2.6	2.6	0.5	2.1	3.4	3.7	5.3	4.4	2.0	3.6	2.4	0.9	3.7	1.6	5.7	1.0	1.5	4.9	0.7
5.5	4.3	5.2	3.3	3.2	2.9	2.6	2.3	0.7	3.5	4.1	4.8	4.2	4.3	2.1	3.4	2.5	1.1	4.1	1.8	5.8	1.3	2.2	4.4	1.0
5.0	3.8	3.9	3.0	2.4	2.4	2.2	1.5	1.8	3.3	4.7	4.7	4.3	3.5	1.3	3.7	1.5	2.0	3.3	0.9	4.8	0.5	2.9	3.7	2.2
4.3	3.5	3.7	2.9	0.8	1.5	1.6	2.4	2.5	4.4	5.6	4.7	3.7	3.4	0.9	3.9	1.1	4.5	2.7	1.3	3.4	0.4	3.5	3.9	3.8
3.9	3.7	3.9	2.7	1.6	2.2	1.2	2.1	3.0	5.1	6.1	4.1	2.9	3.0	2.0	2.7	2.1	5.9	2.2	1.8	3.2	0.4	3.6	3.5	5.2
3.7	3.2	3.1	2.7	1.7	2.6	1.9	1.8	2.9	5.6	6.0	3.2	2.3	2.8	1.9	2.4	2.0	6.6	1.8	2.6	3.9	0.6	2.4	2.5	6.1
3.7	2.5	2.6	2.6	2.0	2.6	2.6	2.5	4.1	5.0	5.2	2.6	1.5	2.2	1.6	2.5	1.9	5.9	1.8	4.4	3.5	0.6	2.2	0.7	6.2
3.4	2.1	2.6	2.3	2.4	2.1	2.8	3.0	3.9	4.5	3.8	2.7	1.0	2.4	1.3	2.5	1.4	5.5	0.6	5.5	3.9	1.0	1.4	1.9	6.3
3.8	2.0	2.2	1.8	2.1	2.7	3.9	3.8	4.5	4.2	3.6	2.3	0.5	1.2	1.0	2.8	1.5	5.0	0.8	6.0	1.7	1.7	0.7	1.6	5.2
3.3	1.9	2.2	0.8	2.4	4.4	5.0	4.4	4.8	3.3	3.4	1.2	1.1	0.5	2.3	2.4	1.6	4.4	1.2	5.8	0.7	2.7	2.2	1.1	5.7
2.5	2.0	1.9	0.5	2.2	5.3	5.5	4.9	4.0	3.2	2.9	0.6	1.1	0.8	2.4	2.3	2.8	4.2	1.3	5.4	0.6	4.6	1.2	0.7	5.0
2.5	2.0	0.8	1.1	2.1	5.9	5.3	5.2	3.7	3.5	2.9	1.0	1.5	1.0	3.2	2.8	3.3	3.8	0.5	5.2	1.1	5.3	1.1	0.9	4.3
2.4	1.3	0.6	2.2	2.9	5.7	4.9	5.2	3.0	2.9	3.2	1.4	1.3	0.6	3.7	2.6	4.0	3.0	0.6	4.4	2.0	5.1	0.8	0.7	3.8
0.9	1.6	0.9	1.6	3.1	5.9	5.0	5.0	3.4	2.9	3.3	1.0	1.3	0.4	4.3	2.2	3.9	1.8	1.4	2.9	1.9	4.7	0.4	1.5	3.3
0.8	2.1	2.5	2.3	4.3	5.5	4.6	4.9	3.4	2.6	3.6	0.4	0.5	0.4	3.7	1.9	4.3	1.0	2.4	0.8	1.6	4.5	0.4	3.2	2.3
0.9	2.5	3.6	3.7	5.1	5.4	4.3	4.9	2.9	2.9	1.8	0.4	0.4	0.5	3.1	1.4	4.3	0.5	3.1	1.1	1.8	4.9	0.5	5.1	2.2
1.1	3.2	4.1	4.8	5.0	4.7	4.7	4.7	2.7	2.7	0.8	0.6	0.7	0.9	3.4	1.8	5.6	0.6	4.7	1.6	0.9	4.4	0.5	6.1	2.2
1.6	4.9	5.0	5.1	4.8	3.5	4.2	3.9	3.0	2.6	1.0	0.5	1.4	1.6	3.3	1.7	4.7	0.6	5.3	2.7	0.6	3.2	0.7	6.2	0.6
3.1	6.2	4.9	5.0	4.6	3.3	2.9	4.0	3.2	2.7	1.0	0.5	1.8	2.0	3.6	2.0	4.3	0.5	6.5	2.4	0.9	2.9	0.5	5.7	1.0
5.1	6.8	5.2	5.1	4.0	3.9	2.8	4.4	1.3	2.2	0.9	1.0	3.0	2.4	2.8	2.3	3.7	2.9	6.2	2.2	2.5	2.4	0.4	5.4	1.4
5.6	6.5	5.6	4.9	4.1	3.9	3.0	3.7	0.5	1.8	0.6	2.0	3.5	2.2	3.3	2.3	3.1	0.7	5.6	2.1	5.3	2.1	1.0	4.9	1.4
5.9	6.1	5.5	3.8	4.4	3.3	2.5	3.4	1.1	1.1	1.0	2.4	4.1	3.4	2.7	3.3	2.6	1.1	5.8	0.9	5.7	1.5	1.0	4.0	1.4
5.9	6.5	4.8	3.4	3.8	3.4	2.5	2.5	1.4	1.2	1.0	2.4	5.0	3.6	2.3	3.9	2.5	1.3	4.7	0.6	5.4	1.0	1.7	4.0	1.7
6.2	5.8	4.0	3.0	3.5	2.8	1.8	0.5	0.8	1.2	2.1	2.7	5.6	3.7	2.5	4.6	2.4	0.9	4.3	0.4	5.5	0.7	2.6	3.6	2.2
6.0	5.0	4.0	2.7	3.7	2.5	0.9	0.5	0.7	1.1	4.2	3.9	5.3	3.1	2.3	4.6	2.5	1.8	3.5	0.5	5.2	0.9	3.3	3.0	2.0
6.1	4.3	3.6	2.6	3.2	3.2	0.4	0.4	0.7	1.7	4.1	3.9	5.2	3.4	2.0	4.9	3.1	3.2	3.0	0.9	5.0	1.6	4.3	3.2	3.1
5.3	3.6	3.2	2.5	3.0	3.7	0.5	0.9	1.8	1.7	3.6	3.5	4.4	2.3	1.2	4.6	3.9	4.7	3.0	1.9	4.8	1.7	5.4	3.2	3.2
3.6	3.3	2.9	2.8	2.9	3.3	0.5	2.9	2.2	2.0	3.7	3.7	3.6	2.5	1.0	4.6	3.7	5.6	2.6	2.2	4.1	1.6	5.6	3.7	4.7
4.0	2.7	3.6	2.8	2.7	3.0	0.5	4.2	3.3	2.9	4.8	4.0	2.7	2.4	0.7	4.0	3.2	6.1	2.7	1.5	3.5	1.2	4.5	3.2	5.1
3.3	2.9	3.6	1.5	2.0	2.9	0.6	5.2	3.4	3.0	4.2	3.4	2.4	2.2	0.9	3.4	3.5	5.8	2.7	1.9	3.9	1.0	4.0	2.7	5.5
3.4	2.7	3.0	1.2	2.0	2.2	1.1	6.1	3.8	3.6	3.4	3.2	2.1	2.2	1.8	3.0	3.7	6.3	1.7	3.1	4.0	1.2	4.3	2.2	5.4
2.4	2.8	2.5	1.5	1.7	2.0	1.6	5.8	4.6	4.5	3.6	2.4	1.8	2.5	3.5	2.4	2.1	5.4	1.6	4.2	3.3	1.7	4.1	1.8	5.6
2.3	2.7	2.5	1.0	2.0	2.6	1.7	6.2	4.8	3.8	3.5	2.6	2.4	2.1	4.5	0.7	0.6	4.3	1.2	5.3	0.8	2.3	3.5	1.2	5.5
2.1	2.4	2.7	1.8	3.0	2.4	2.1	5.6	5.1	2.8	2.9	2.4	2.0	1.8	5.4	0.5	0.8	4.1	0.7	5.1	1.3	4.7	2.9	0.8	5.3
2.7	2.5	2.9	2.9	3.1	2.4	3.1	5.4	4.6	2.5	3.1	1.7	2.7	2.0	6.0	0.6	0.7	4.0	0.6	4.9	1.5	5.9	2.3	0.6	4.4
2.5	2.6	2.0	3.1	3.1	3.9	4.8	5.3	3.2	1.5	3.4	1.0	3.2	1.3	5.8	0.5	1.3	3.8	0.7	3.9	1.4	6.0	1.7	0.8	3.5
1.6	2.6	2.0	2.5	3.4	4.3	4.5	5.1	3.5	1.4	3.1	0.6	3.5	0.9	6.1	0.6	2.1	3.1	1.4	3.1	1.4	6.0	1.0	1.2	2.9
1.3	2.8	2.1	3.7	3.2	4.8	5.2	5.6	3.1	1.8	2.4	0.9	2.0	1.3	6.0	0.4	3.1	2.8	1.2	2.1	1.3	5.4	0.4	1.2	2.7
1.6	2.5	3.0	4.4	3.5	5.2	4.5	4.8	3.0	0.8	1.3	0.9	0.9	1.5	5.6	0.4	5.1	2.4	2.3	1.9	0.8	5.3	0.7	1.7	3.4
1.2	2.4	3.2	5.0	3.5	5.8	3.6	4.1	2.2	0.8	1.5	1.2	0.8	1.3	4.6	0.4	5.9	2.6	3.1	1.5	0.7	4.7	0.4	3.2	2.8

Anexo 1 (continuación)

Velocidades horarias de viento (m/s).

2.2	2.1	3.6	5.6	4.4	5.0	3.8	3.7	1.3	0.5	1.9	0.9	1.8	1.2	3.8	0.4	5.4	2.9	4.8	0.5	0.5	4.1	0.4	4.3	2.3
2.7	2.6	3.4	5.4	3.1	4.0	3.6	3.6	0.4	0.8	1.4	1.1	1.1	1.9	3.9	0.5	4.9	3.2	6.2	0.4	0.5	3.9	0.5	5.4	2.1
2.9	2.8	4.2	5.5	3.4	4.1	3.7	3.3	0.6	1.9	0.7	2.0	0.5	3.0	3.1	0.9	5.0	3.2	6.1	0.8	0.6	2.8	0.5	5.6	2.2
3.5	3.8	5.0	5.3	3.6	3.4	3.4	2.6	0.8	2.1	0.7	1.8	0.8	4.5	2.4	1.7	4.5	2.9	5.4	0.5	1.0	2.6	0.4	5.1	2.0
4.1	3.2	5.1	5.1	3.2	3.2	3.1	2.7	1.3	1.9	0.7	2.2	2.2	6.1	1.6	3.2	3.8	2.4	5.4	0.8	3.0	1.6	1.0	4.2	1.4
4.7	4.0	5.1	4.1	3.1	3.6	2.5	1.8	0.5	2.0	0.5	2.6	3.8	6.1	0.5	4.2	3.8	1.4	5.4	1.1	4.3	1.0	1.5	3.8	1.5
5.6	4.9	5.2	3.7	2.8	2.7	2.7	1.2	0.7	1.4	1.3	2.4	5.5	6.1	0.4	5.6	4.3	0.5	4.4	0.9	5.7	1.7	1.6	2.9	2.2
5.7	5.2	4.8	3.7	2.8	2.5	2.9	1.7	1.0	1.0	1.6	3.1	5.4	5.4	0.6	5.6	3.3	1.6	3.2	1.0	5.6	2.1	2.3	2.2	1.2
5.7	4.8	3.9	3.4	3.1	2.3	2.6	1.6	0.6	0.7	2.6	2.9	4.9	4.9	0.4	5.7	3.0	2.7	2.7	0.6	5.7	1.0	4.1	2.2	1.0
5.3	3.7	3.2	2.9	2.9	2.2	1.9	1.2	1.8	1.5	3.1	4.0	4.9	4.0	0.7	6.0	2.7	4.4	2.4	0.4	5.8	1.2	5.6	2.7	1.2
4.7	2.9	2.6	2.9	2.3	2.7	1.4	0.6	3.3	1.5	3.5	4.3	3.7	3.5	1.1	5.3	2.8	5.3	1.9	0.9	4.7	0.5	5.9	2.8	1.7
4.0	2.7	3.4	2.6	1.7	2.9	1.3	1.1	5.4	3.0	4.9	4.7	3.8	3.3	0.8	5.3	2.0	5.8	0.8	0.9	3.8	0.8	5.7	3.1	3.1
4.0	2.7	3.3	2.6	1.5	2.3	0.9	3.2	6.6	3.9	4.8	4.7	3.1	3.4	0.9	5.0	2.4	6.0	0.7	1.2	3.6	0.9	5.6	2.6	5.8
3.2	2.6	2.9	2.9	1.5	1.7	1.3	3.8	7.1	4.5	4.5	3.8	3.4	3.2	1.0	4.6	2.2	6.0	1.6	1.2	3.5	0.4	5.7	1.9	6.3
3.4	2.7	2.8	2.5	0.8	2.4	1.4	4.4	7.0	4.4	4.5	2.7	3.9	1.4	1.1	4.2	2.6	5.2	0.9	4.1	2.0	0.4	6.2	1.9	6.2
2.5	3.1	1.6	2.0	2.2	2.8	2.0	5.2	6.7	4.6	4.1	1.9	3.2	0.9	1.8	3.1	2.4	5.1	0.5	5.4	1.7	1.0	4.9	1.1	5.7
2.7	2.8	1.5	1.5	2.4	2.2	1.3	5.6	6.6	4.2	3.5	2.0	2.8	1.0	2.5	1.9	2.1	3.9	0.5	5.6	0.6	2.3	3.9	1.3	5.3
2.6	2.3	1.5	1.7	1.9	2.3	2.8	5.9	6.1	3.5	3.3	1.9	1.8	0.7	2.9	2.3	1.1	3.8	0.6	5.9	1.1	2.8	4.1	0.6	5.0
2.0	2.4	1.3	1.1	2.1	2.1	3.4	5.4	5.3	2.8	3.2	2.0	1.0	1.6	4.1	0.7	2.2	3.6	0.5	5.6	0.5	4.4	4.3	0.8	5.0
2.2	2.9	1.8	1.3	3.5	1.7	4.3	5.3	4.2	2.9	2.2	2.2	2.1	1.6	4.2	1.0	3.3	3.4	0.8	5.4	1.1	5.5	3.3	0.9	4.4
1.6	2.8	2.3	1.9	4.3	2.2	3.9	4.6	3.2	3.0	2.0	3.0	1.8	1.4	4.5	0.8	3.3	3.4	1.2	4.6	1.3	5.3	2.1	1.6	3.5
1.9	2.2	2.9	3.2	4.6	3.6	3.7	4.3	2.9	2.3	2.1	1.5	0.5	1.2	4.6	1.9	2.9	2.5	1.0	4.4	0.5	4.8	0.6	2.7	2.9
1.9	2.5	4.1	4.0	6.0	4.2	3.1	3.5	3.1	2.2	1.8	1.1	0.4	0.9	4.2	1.9	2.6	2.8	2.1	3.5	0.5	4.6	1.2	4.8	3.0
1.8	2.9	4.7	3.9	6.3	4.8	3.4	3.8	3.0	2.5	0.8	1.2	0.6	1.1	3.0	1.1	3.4	3.0	2.9	3.0	0.4	4.3	0.7	5.9	3.2
2.1	3.4	4.4	4.0	5.8	4.8	2.9	3.4	2.6	3.3	0.9	0.7	1.1	1.1	3.3	1.3	4.4	1.9	4.2	3.6	0.5	4.0	0.6	6.2	2.6
1.9	3.8	4.0	4.9	5.7	4.6	2.4	3.0	1.3	3.3	0.4	1.5	1.8	1.0	3.0	1.0	4.4	0.9	5.2	3.0	0.8	2.9	0.8	5.5	2.5
2.6	4.9	4.3	4.6	4.9	3.3	1.8	3.0	1.0	2.6	0.8	0.9	2.8	1.2	2.8	1.0	4.3	0.7	5.4	1.7	1.9	1.9	0.7	5.0	1.9
4.0	5.3	4.9	4.5	4.5	3.0	2.5	2.9	1.2	0.7	1.2	1.7	3.3	1.9	2.7	1.3	3.9	1.3	4.7	1.3	3.5	1.8	0.6	4.2	1.5
5.5	6.0	4.8	4.1	4.4	3.2	3.0	1.8	1.2	0.6	0.6	1.3	4.6	2.9	2.5	2.8	3.4	1.4	4.9	1.1	4.3	0.8	0.7	4.4	0.9
6.3	6.6	5.3	4.2	4.3	3.6	2.9	0.7	1.6	0.5	0.9	1.8	4.9	4.6	2.5	4.5	3.3	0.5	4.6	1.6	5.9	0.5	1.1	3.9	1.1
6.2	6.1	5.3	3.7	3.8	2.9	2.5	0.6	2.9	0.6	1.4	2.8	5.9	5.0	1.4	5.5	3.5	0.8	4.1	1.8	5.6	0.4	2.5	3.8	1.2
6.4	5.5	4.7	3.9	3.3	3.2	1.8	0.4	2.2	1.1	2.4	3.7	6.1	5.3	1.7	5.9	3.6	1.9	3.2	0.6	5.6	0.5	4.3	3.4	0.5
5.4	5.1	5.2	3.6	3.3	3.2	1.1	0.5	1.8	1.3	3.2	3.8	5.9	4.9	1.8	6.4	3.7	2.7	2.2	0.8	5.6	0.6	5.0	2.5	0.5
5.3	4.4	4.6	3.2	3.1	2.7	1.3	0.4	2.1	2.9	3.8	4.0	5.3	4.0	1.6	6.2	3.5	4.2	1.9	0.5	4.9	1.1	6.6	2.5	0.8
4.6	4.1	4.8	3.8	1.6	2.4	1.7	0.4	1.8	2.9	4.8	3.9	4.7	3.1	0.7	6.8	3.0	4.9	2.4	0.4	4.1	1.7	5.8	2.0	1.0
3.8	4.0	4.7	3.9	1.3	2.1	1.1	0.6	2.2	3.3	5.7	4.7	3.9	2.5	0.6	6.0	2.1	5.1	1.5	1.6	3.9	1.4	5.9	1.2	2.4
3.7	4.2	3.7	3.7	1.0	2.0	1.6	1.5	2.7	3.7	5.5	4.3	3.1	1.7	0.5	5.7	0.9	5.4	1.9	2.8	3.2	0.7	5.9	1.5	4.2
3.1	4.7	2.9	3.2	1.2	1.9	1.4	1.8	3.1	4.0	4.8	3.7	3.3	2.1	0.9	4.6	0.4	5.8	2.2	2.8	2.7	0.5	5.2	1.3	4.6
3.5	3.5	3.7	2.9	0.9	2.1	2.8	2.5	4.4	4.0	4.4	3.4	3.2	1.6	1.8	4.3	0.7	5.8	2.7	4.4	2.5	0.5	4.3	0.8	5.1
3.0	2.5	3.5	3.1	1.3	1.5	3.3	3.9	4.8	4.2	4.0	3.1	2.2	1.4	1.5	3.9	1.1	5.6	3.3	4.8	0.9	1.1	3.8	0.8	4.9
2.7	0.9	3.0	2.5	1.0	0.8	3.9	4.6	5.3	4.0	3.5	2.9	1.9	1.5	2.3	3.7	1.6	4.4	2.3	5.8	0.9	3.0	2.5	1.1	4.7
3.0	2.3	3.2	2.7	2.6	1.6	5.5	5.0	5.2	3.4	3.4	2.7	1.7	0.7	3.0	3.4	1.6	3.7	0.8	5.5	0.5	4.0	3.5	0.7	4.0
2.5	3.1	3.1	2.4	4.5	2.2	6.5	5.9	4.3	2.9	3.4	2.7	1.9	1.3	3.6	3.4	2.1	3.0	0.5	4.9	1.1	4.6	3.4	0.9	3.7
2.1	2.5	2.5	1.6	5.5	3.9	6.7	5.4	3.1	2.3	3.0	1.9	2.3	1.3	4.4	3.2	2.5	2.9	0.5	4.8	1.6	4.7	3.3	1.2	2.8
2.2	1.8	3.0	1.5	5.6	4.0	5.9	4.9	2.5	1.6	3.2	0.7	2.1	1.2	4.1	2.4	2.8	2.7	0.4	3.2	1.6	4.9	2.6	1.3	2.4



DECLARACION JURADA DE AUTORÍA

Yo, **Christian Vladimir Rodriguez Díaz**, estudiante de la

Facultad:	Ciencias		Educación		Ingeniería	X
Escuela Profesional:	Ingeniería en Energía					
Departamento Académico:	Energía, Física y Mecánica					
Escuela de Posgrado	Maestría			Doctorado		

Programa:

De la Universidad Nacional del Santa; Declaro que el trabajo de investigación intitulado:

“Análisis aerodinámico de perfiles para el diseño de aerogeneradores de baja potencia en condiciones de viento del campus de la UNS”

presentado en folios, para la obtención del Grado académico: ()

Título profesional: (**X**) Investigación anual: ()

- He citado todas las fuentes empleadas, no he utilizado otra fuente distinta a las declaradas en el presente trabajo.
- Este trabajo de investigación no ha sido presentado con anterioridad ni completa ni parcialmente para la obtención de grado académico o título profesional.
- Comprendo que el trabajo de investigación será público y por lo tanto sujeto a ser revisado electrónicamente para la detección de plagio por el VRIN.
- De encontrarse uso de material intelectual sin el reconocimiento de su fuente o autor, me someto a las sanciones que determinan el proceso disciplinario.

Nuevo Chimbote, 12 de Agosto de 2022

Firma:

Nombres y Apellidos: **Christian Vladimir Rodriguez Díaz**

DNI: **47878570**



ACTA DE APROBACIÓN DE ORIGINALIDAD

Yo, **Amancio Ramiro Rojas Flores**, asesor de la

Facultad:	Ciencias		Educación		Ingeniería	X
Departamento Académico	Energía, Física y Mecánica					
Escuela de Posgrado	Maestría:			Doctorado		

Programa:

De la Universidad Nacional del Santa. Asesor del trabajo de Investigación intitulado:

“Análisis aerodinámico de perfiles para el diseño de aerogeneradores de baja potencia en condiciones de viento del campus de la UNS”

Del estudiante: **Christian Vladimir Rodriguez Díaz**

De la escuela: **Ingeniería en Energía**

Constato que la investigación presentada tiene un porcentaje de similitud del **16 %** el cual se verifica con el reporte de originalidad de la aplicación Turnitin adjunto.

Quién suscribe la presente, declaro el haber analizado dicho reporte y concluyo que las coincidencias detectadas no se conforman como plagio. A mi claro saber y entender, la investigación cumple con las normas de citas y referencias establecidas por la Universidad Nacional del Santa.

Nuevo Chimbote, 12 de Agosto de 2022

Firma:

Nombres y Apellidos del Asesor/Presidente UI: **Amancio Ramiro Rojas Flores**

DNI: **32806031**

Tesis_titulación

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%

INDICE DE SIMILITUD

16%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	cybertesis.uni.edu.pe Fuente de Internet	12%
2	accedacris.ulpgc.es Fuente de Internet	1%
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Universidad Señor de Sipan Trabajo del estudiante	<1%
5	idoc.pub Fuente de Internet	<1%
6	Repositorio.Unsa.Edu.Pe Fuente de Internet	<1%
7	Christian V. Rodriguez, Cesar Celis. "Design optimization methodology of small horizontal axis wind turbine blades using a hybrid CFD/BEM/GA approach", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2022 Publicación	<1%

8	Submitted to Universidad Europea de Madrid Trabajo del estudiante	<1 %
9	repositorioinstitucional.uabc.mx Fuente de Internet	<1 %
10	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1 %
11	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
12	Submitted to Universitat Politècnica de València Trabajo del estudiante	<1 %
13	bibliotecadigital.oducal.com Fuente de Internet	<1 %
14	repositorio.puce.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
15	wind.willyweather.com.au Fuente de Internet	<1 %
16	Alfredo Haro, Hector Young, Boris Pavez. "Fuzzy Logic Active Yaw Control of a Low-Power Wind Generator", IEEE Latin America Transactions, 2021 Publicación	<1 %
17	docplayer.es Fuente de Internet	<1 %

18

Fuente de Internet

<1 %

19

www.emitec-industrial.ch

Fuente de Internet

<1 %

20

Submitted to Indiana University

Trabajo del estudiante

<1 %

21

doku.pub

Fuente de Internet

<1 %

22

futur.upc.edu

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía

Activo