

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO - CHILE**



**“COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE
EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE
SIMULACIÓN OPENFOAM 3D”**

FELIPE ANDRÉS GRIFFITHS FONCK

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**Profesor Guía: Rodrigo Cassineli
Profesor Correferente: Nicolas Thiers**

Agosto - 2022



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA



DEDICATORIA

Quisiera dedicarle este documento a todas las personas que me han apoyado durante mi carrera universitaria. Mis padres que pacientemente me apoyaron durante este arduo, pero iluminante camino. Mis compañeros de universidad con quienes compartí frustraciones y victorias. Mis profesores que me ayudaron a llegar a una mejor versión de mí mismo, además de enseñarme las materias correspondientes. Por último, a esta institución, que me ha entregado las herramientas y lecciones de vida que utilizare por el resto de mi vida, con este trabajo espero poder cumplir con el lema de la universidad.



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

AGRADECIMIENTOS

Le debo dar agradecimientos a todas las personas que facilitaron y ayudaron con todas las dificultades que se me presentaron al hacer este trabajo de título. Agradezco a mi profesor guía, Rodrigo Cassineli por la paciencia y apoyo durante el trabajo, por guiarme a una visión más concreta y realizable de la memoria, darme material de apoyo y solucionar problemas computacionales. Agradezco al profesor Nicolas Thiers por el tiempo que dedico a ayudarme con la divergencia e inestabilidad de las simulaciones, que fueron motivo de grandes dolores de cabeza. Agradezco a mi compañero memorista, Álvaro Barbatos que siempre proporciono ayuda e información sobre el programa OpenFOAM y su utilización, además de apoyo sobre el tema de aerogeneradores.



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA



RESUMEN

En el presente informe se han modelado 2 palas simplificadas de aerogeneradores industriales, de 10 a 30 kilowatts, de eje horizontal modeladas de dos perfiles alares, uno, FFA-W3-211, utilizado en grandes aerogeneradores industriales y el otro, DU-93-W-210, encontrado como el más eficiente para las condiciones ambientales del país en simulación 2D, para verificar cual es el más eficiente a condiciones ambientales representativas de Chile, mediante simulación computacional 3D en el programa OpenFOAM. La pala más eficiente resulto ser la pala que utiliza el perfil alar DU-93-W-210, la cual se recomienda para el diseño de aerogeneradores dentro del país como una alternativa para la generación de energía eléctrica de baja escala.

Palabras Clave—Turbina Eólica; OpenFOAM; CFD; Chile; HAWT

ABSTRACT

This paper consists of the modeling of 2 simplified industrial Horizontal axis wind turbine blades, of 10 to 30 kilowatts of potency, with two distinct airfoils, one, FFA-W3-211, used in large industrial wind turbines and the other, DU-93-W-210, found to be the most efficient in 2D simulations for wind conditions relating to the country, to verify which one is most efficient using 3D simulation on the program OpenFOAM. The blade using the airfoil DU-93-W-210 was found to be the most efficient, this airfoil is recommended to be used in the future design of aerogenerators within the country for small scale alternative power generation.

Keywords— Wind Turbine; OpenFOAM; CFD; Chile; HAWT



GLOSARIO

VAWT: Aerogenerador de Eje Vertical
(*Vertical Axis Wind Turbine*)

HAWT: Aerogenerador de Eje Horizontal
(*Horizontal Axis Wind Turbine*)

y^+ : Altura Adimensional

D: Arrastre [N]

d: Arrastre por Unidad de Longitud [N/m]

α : Ángulo de Ataque [$^\circ$]

ϕ : Ángulo del Triángulo de Velocidad [$^\circ$]

θ : Ángulo de Sección "Pitch" [*grados*]

θ_0 : Ángulo de Pitch [$^\circ$]

θ_0 : Ángulo de Torsión [$^\circ$]

BEM: Blade Element Momentum Theory

C_d : Coeficiente de Arrastre (Drag)

C_p : Coeficiente de Poder

C_l : Coeficiente de Sustentación (Lift)

C_n : Coeficiente Normal

C_t : Coeficiente Tangencial

K_v : Constante de Von Karman

c: Cuerda [m]*

CFD: Dinámica de Fluidos Computacional
(*Computational Fluid Dynamics*)

δ : Delta

δ_{ij} : Delta Kronecker

ρ : Densidad [kg/m^3]

∂ : Diferencial

div: Divergente ($\nabla \cdot$)

k: Energía Cinética Turbulenta [J/kg]

ERNC: Energía Renovable No Convencional

τ : Esfuerzo Cortante [N/m^2]

τ_{ij} : Esfuerzo Viscoso [N/m^2]

a : Factor de Inducción Axial

a' : Factor de Velocidad Angular Inducida

F_{tip} : Factor de Perdida de Punta (Tip Loss
Factor)

φ' : Fluctuación de φ respecto la media
temporal

f : Función

F_e : Fuerza Empuje [N]

F_t : Fuerza Torque [N]

g: Gravedad [m/s^2]

grad: Gradiente (∇)

I_E : Intensidad Turbulenta

L_0 : Largo Característico

m : Masa [kg]

ϕ_p : Media Temporal de la Función φ

U,V,W: Media Temporal de la Función
Turbulenta de Velocidades de u,v,w

\vec{n} : Normal

N: Numero de Palas

Ma: Numero de Mach

Re: Numero de Reynolds

T: Periodo de Tiempo

P: Presión

φ : Propiedad Ejemplo

R: Radio Total

r: Radio

RMS: Raíz Media Cuadrada (Root Mean
Square)

RANS: Reynolds Averaged Navier-Stokes

y : Separación de la Pared

σ_r : Solidez

S: Superficie

L: Sustentación [N]

I: Sustentación por Unidad de Longitud [N/m]

ϵ : Tasa de Disipación de Energía

t: Tiempo [s]

Γ : Terminio Difusivo

S_φ : Terminio Fuente

\vec{C} : Velocidad Absoluta [m/s]

u^+ : Velocidad Adimensional

λ : Velocidad de Punta

λ_r : Velocidad de Punta Local

u^t : Velocidad de Fricción

c_∞ : Velocidad del sonido en el medio [m/s]

u,v,w: Velocidades en $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ [m/s]

\vec{C}_{rel} : Velocidad Relativa [m/s]

ω : Velocidad Rotacional [rad/s]

C_i : Velocidad Promedio [m/s]

ν_μ : Viscosidad cinemática [$N \cdot m \cdot s / kg$]

μ : Viscosidad Dinámica [$N \cdot s / m^2$]

μ_t : Viscosidad Turbulenta

\mathcal{V} : Volumen de Control

UTFSM: Universidad Técnica Federico Santa
María.

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	4
ABSTRACT	4
INDICE DE ILUSTRACIONES	3
INDICE DE GRÁFICOS	5
INDICE DE TABLAS.....	7
INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO 1: Objetivos	11
1.1 Objetivo General	11
1.2 Objetivos Específicos.....	11
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 Base Teórica Dinámica de Fluidos.....	12
2.1.1 Ecuaciones Gobernantes	12
2.1.2 Viscosidad.....	14
2.1.3 Numero de Reynolds	15
2.1.4 Numero de Mach	15
2.1.5 Flujos Turbulentos	15
2.1.6 Descomposición de Reynolds.....	16
2.1.7 Torbellinos o Eddies y Cascada de Energía.....	17
2.1.8 Reynolds Averaged Navier-Stokes equation	19
2.1.9 Espesor Capa Limite.....	20
2.2 Aerogeneradores.....	23
2.2.1 Limite de Betz y eficiencia actual.....	24
2.2.2 Estructura de una HAWT	24
2.2.3 Velocidad de punta	25
2.2.4 Perfil Alar aerogenerador.....	26
2.2.5 Palas de un aerogenerador	27
2.3 Dinámica de Fluidos Computacional CFD	33
2.3.1 Modelos Turbulentos	34
2.3.2 Discretización	37
2.3.3 Algoritmos de solución para velocidad y presión en flujos continuos	38
2.3.4 Law of the Wall en CFD.....	40
2.3.5 Numero de Courant.....	40
CAPÍTULO 3: ESTADO DE LA ENERGIA EÓLICA EN CHILE	41
3.1 Parques Eólicos a Considerar	42
3.1.1 Parque Eólico Taltal.....	42
3.1.2 Parque Eólico Talinay II (Poniente)	45
3.1.3 Parque Eólico Vientos del Pacifico	47
3.2 Condiciones Eólicas a Considerar.....	49
CAPÍTULO 4: MODELAMIENTO DE LAS PALAS	50
4.1 Modelamiento Palas Aerogenerador usados en Chile.....	51
4.1.1 Modelamiento Pala preliminar del aerogenerador	51
4.1.2 Modelamiento Palas del aerogenerador	54
4.2 Modelamiento Pala Nrel Phase VI.....	57



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

CAPÍTULO 5: VALIDACION Y SISTEMA COMPUTACIONAL	58
5.1 OPENFOAM.....	58
5.1.1: Sistema de Mallado.....	58
5.2 Configuración a utilizar.....	61
5.3 Condiciones de Borde	67
5.4 Esquemas de Discretización.....	68
5.5 “Solvers” de OpenFOAM	69
5.6 Control General de la Simulación	70
5.7 Validación Mallado	70
CAPÍTULO 6: SIMULACIÓN DE LAS PALAS MODELADAS.....	82
6.1 Configuraciones Generales	82
6.2 Resultados	82
6.2.1 FFA-W3-211.....	82
6.2.2 DU-93-W-210.....	88
6.3 Análisis de los Resultados.....	93
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES	94
7.1 Recomendaciones.....	95
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
ANEXOS.....	99



INDICE DE ILUSTRACIONES

1: Turbina Eléctrica de Charles F. Brush, 1887	8
2: Volumen de control fijo cartesiano	12
3: Visualización de la capa turbulenta y sus vórtices	18
4: Cascada de energía, cascada de Kolmogorov.....	18
5: Capa Turbulenta	21
6: Turbinas de viento de eje horizontal (HAWT) y vertical (VAWT)	23
7: Eficiencia máxima del diseño según cantidad de palas, valores correspondientes a diseños en operación (2012).....	24
8: HAWT vista lateral y trasera.....	25
9: Partes de un perfil alar	26
10: Fuerza de sustentación y arrastre en un perfil alar	27
11: Secciones de una pala.....	28
12: Visualización del volumen de control para el modelo BEM.....	28
13: Triangulo de velocidad considerando rotación de la pala	29
14: Triangulo de fuerzas en el perfil alar.....	30
15: Efecto “Stall” sobre un perfil alar	33
16: Mapa del recurso eólico de Chile del explorador eólico	41
17: Pala formada con los perfiles alares FFA-W3-211	56
18: Pala formada con los perfiles alares DU-93-W-210.....	56
19: Pala formada con los perfiles S809, del experimento Nrel fase VI.....	57
20: Información General del sistema OpenFOAM [13].....	58
21: Mallado y objeto.....	59
22: Malla refinada en los borde del objeto	59
23: Mallado con el volumen extraído	60
24: Mallado moldeado al objeto	60
25: Niveles de refinamiento.....	60
26: SnappyHexMesh de una volumen semi cilíndrico	62
27: Mallado utilizando 4 regiones en “blockmesh”.....	62
28: Mallado sin estructura “unstructured” del semi-cilindro.....	63
29: Dimensiones generales del dominio computacional Fuente: Elaboración Propia.....	65
30: Corte lateral del mallado del dominio computacional.....	65
31: Ampliación del volumen refinado, vista lateral	66
32: Imagen del interfaz de mallado arbitraria, vista frontal	66
33: Presión en las palas Nrel VI, simulación de Courant 9, 15 segundos simulados	71
34: Presión en las palas Nrel VI, simulación de Courant 0.9, 15 segundos simulados	71
35: Mallado de una sección correspondiente 60% de la pala con capas agregadas, refinamiento 7, expansión de capas 1.2.....	74
36: Campo de velocidad relativa en la dirección x alrededor del perfil alar al 30% de la pala Nrel VI.....	80
37: Campo de velocidad relativa en la dirección x alrededor del perfil alar al 80% de la pala Nrel VI.....	80



38: Contorno de Presión de la pala Nrel VI, a la izquierda el extrado y a la derecha el intrado del perfil alar presión dividido por densidad.....	81
39: Contorno de Presión de la pala FFA, a la izquierda el extrado y a la derecha el intrado del perfil alar en presión dividido por densidad	83
40: Campo de velocidad relativa en la dirección X alrededor del perfil alar al 30% de la pala FFA	86
41: Campo de velocidad relativa en la dirección X alrededor del perfil alar al 47% de la pala FFA	86
42: Campo de velocidad relativa en la dirección X alrededor del perfil alar al 63% de la pala FFA	87
43: Campo de velocidad relativa en la dirección X alrededor del perfil alar al 80% de la pala FFA	87
44: Contorno de Presión de la pala FFA, a la izquierda el extrado y a la derecha el intrado del perfil alar en presión dividido por densidad	88
45: Campo de velocidad relativa en la dirección X alrededor del perfil alar al 30% de la pala DU-93	91
46: Campo de velocidad relativa en la dirección X alrededor del perfil alar al 47% de la pala DU-93	91
47: Campo de velocidad relativa en la dirección X alrededor del perfil alar al 63% de la pala DU-93	92
48: Campo de velocidad relativa en la dirección X alrededor del perfil alar al 80% de la pala DU-93	92



INDICE DE GRÁFICOS

1: Capacidad instalada Chile 2021	9
2: Velocidad en un punto, en el tiempo, en régimen turbulento.....	16
3: Perfil de velocidad laminar y turbulento	21
4: Distribución de velocidad cerca de la pared.....	23
5: CP vs velocidad de punta, respecto el máximo teórico posible	26
6: Potencia en función de la velocidad del viento de una turbina eólica.....	31
7: relación entre largo de cuerda a lo largo de la pala según método.....	32
8: Histograma de las velocidades del viento a 30[m] desde 1980 a 2017	43
9: Función de densidad de Probabilidad de la velocidad del viento en Taltal.....	44
10: Velocidades Promedio de un año típico en Taltal	44
11: Histograma de las velocidades del viento a 30[m] desde 1980 a 2017	46
12: Función densidad de Probabilidad de la velocidad del viento en Talinay II.....	46
13: Velocidades Promedio de un año típico en Talinay II	47
14: Histograma de las velocidades del viento a 30[m] desde 1980 a 2017	48
15: Función de densidad de Probabilidad de la velocidad del viento en Vientos del Pacifico	48
16: Velocidades Promedio de un año típico en Vientos del Pacifico.....	49
17: Perfiles alares seleccionados para las palas modeladas y el caso de validación.	51
18: Dimensión de la cuerda a lo largo de la pala.....	52
19: Coeficiente de sustentación y ecuación auxiliar en función al ángulo de ataque para el diseño de la pala	53
20: Comparación Ángulo de torsión a lo largo de la pala prueba	53
21: Comparación del Largo de cuerda a lo largo de la pala prueba	54
22: Residuales de la simulación, Valores residuales vs Tiempo	63
23: Presión a lo largo del perfil alar al 30% de la pala.....	72
24: Presión a lo largo del perfil alar al 80% de la pala.....	72
25: Valores de presión a lo largo de la cuerda a 30% de la pala	73
26: Valores de presión a lo largo de la cuerda a 80% de la pala	73
27: Valores de presión a lo largo de la cuerda de la pala al 80%	75
28: Presión a lo largo de la cuerda al 30% de la pala	76
29: Presión a lo largo de la cuerda al 80% de la pala	77
30: Presión a lo largo de la cuerda del perfil alar al 30% de la pala.....	77
31: Presión a lo largo de la cuerda del perfil alar al 47% de la pala.....	78
32: Presión a lo largo de la cuerda del perfil alar al 63% de la pala.....	78
33: Presión a lo largo de la cuerda del perfil alar al 80% de la pala.....	79
34: Presión a lo largo de la cuerda al 30% de la pala FFA.....	84
35: Presión a lo largo de la cuerda al 47% de la pala FFA.....	84
36: Presión a lo largo de la cuerda al 63% de la pala FFA.....	85
37: Presión a lo largo de la cuerda al 80% de la pala FFA.....	85
38: Presión a lo largo de la cuerda al 30% de la pala DU-93.....	89
39: Presión a lo largo de la cuerda al 47% de la pala DU-93.....	89
40: Presión a lo largo de la cuerda al 63% de la pala DU-93.....	90



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA



41: Presión a lo largo de la cuerda al 80% de la pala DU-93	90
42: C_l/C_d vs Ángulo de ataque simulado en X-foil	103



INDICE DE TABLAS

1: Especificaciones Generales del aerogenerador Vespa v122/3000	42
2: Especificaciones Generales del aerogenerador Vespa v100/2000	45
3: Cambio de velocidad de punta según la velocidad del viento.....	55
4: Condiciones de Borde Generales	67
5: Esquemas de discretización utilizados	68
6: Configuración del documento “fvSolvers”	70
7: Tiempos de simulación utilizando 10 cores.	74
8: Torque generado y error respecto simulación propia en OpenFOAM.....	75
9: Empuje generado en las palas y error respecto simulación OpenFOAM.....	76
10: Resultados fuerzas simulación pala FFA-W3-211	83
11: Resultados fuerzas simulación pala DU-93-W-210	88
12: Valores de OpenFOAM del modelo k-epsilon.....	99
13: Valores de la ecuación 56.....	100
14: Valores de la pala optima preliminar.....	100
15: Pala Simplificada DU-93-210	101
16: Pala simplificada FFA-W3-211	102
17: Pala pala Nrel Phase VI, perfil alar S809.....	103

INTRODUCCIÓN

Dentro de las energías renovables más utilizadas en la historia de la humanidad, está la energía eólica. En sus inicios se utilizó para propulsar barcos por medio de velas y moler granos en molinos. Al comienzo del siglo veinte, se creó una de las primeras turbinas eólicas para la generación de energía eléctrica.

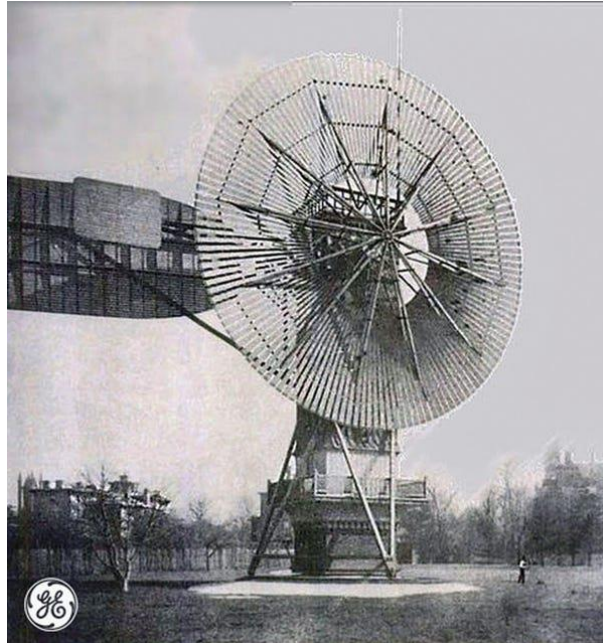


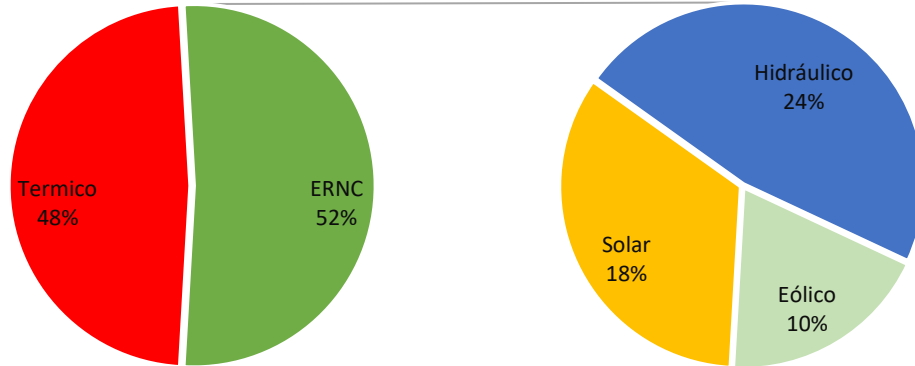
Ilustración 1: Turbina Eléctrica de Charles F. Brush, 1887
Fuente: Business Insider [7]

Esta masiva turbina eólica produjo 12 kilowatts de energía [7]. Durante esta época, el avance de esta tecnología fue opacada por los motores de combustión y vapor, pero en tiempos de falta de combustible, como durante las guerras mundiales, las turbinas eólicas resurgieron como alternativa para la producción energética, por ser autosustentables. En la actualidad, el peligro del cambio climático y la eventual escasez de los combustibles fósiles han culminado en un gran avance en la investigación y producción de energías renovables, entre ellas la energía eólica.

Actualmente en Chile las energías renovables conforman alrededor del 52% de la capacidad instalada (2021) [8] y 10% de esta pertenece a energía eólica (19% de las Energías renovables).

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Gráfico 1: Capacidad instalada Chile 2021
Fuente: Elaboración Propia



Chile tiene en la mira que para el 2050 un 70% del requerimiento energético sea suministrado por energías renovables. Una meta que requerirá la óptima utilización de los recursos energéticos del país, entre ellos, la energía eólica y los aerogeneradores.

Un aerogenerador capta la energía cinética del viento para hacer girar una turbina, que, mediante un inductor, genera corriente directa, la cual se transforma a corriente alterna por medio de un convertidor. Las aspas de estas turbinas, denominadas palas, son un conjunto de perfiles alares que varían en ángulo y tamaño desde la raíz hacia la punta. Las palas tienen una forma bastante compleja, ya que, idealmente, se manufacturan según las condiciones de operación, las cuales resultan en la curvatura de las palas que ayudan a que el viento incida en ellas de la manera más eficiente posible. Esta complejidad es una de las razones del alto precio de producción de las palas.

Las turbinas eólicas se separan según configuración de su eje, horizontal o vertical, y el poder generado. Los aerogeneradores de baja potencia son aquellos que producen menos de 5 kilowatts de potencia, normalmente usados para uso particular. Los aerogeneradores de potencia mayor a 5 kilowatts se les denomina aerogeneradores industriales. Usualmente cuando uno piensa en turbinas eólicas, se viene a la mente las de parques eólicos de 80 metros de altura o los pequeños utilizados en granjas, pero existe una variedad de rangos de tamaño.

La eficiencia de estas turbinas eólicas ha llegado a captar cerca de un 50% [6] de la energía total del viento en condiciones ideales, de un máximo posible teórico de 59% conocido como límite de Betz. El componente más influyente en esta eficiencia de las turbinas eólicas es la pala.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

El diseño y creación de una pala de aerogenerador es un proceso complejo que debe tomar en consideración el recurso eólico disponible, la velocidad de giro, que perfil alar se utilizará para captar de mejor manera esta energía y la torsión del ángulo de ataque según los parámetros anteriores. Todas estas consideraciones, sumadas a las consideraciones estructurales para llevar a cabo la construcción de la pala han llevado a la utilización de aerogeneradores que se diseñan para unas condiciones de viento específicas, que posteriormente son utilizados en condiciones de viento similares, pero no optimas, lo cual puede estar generando una pérdida de eficiencia.

En el presente estudio se comparará el comportamiento de palas modeladas con perfiles alares cuya eficiencia es el más adecuado respecto las condiciones de viento de parques eólicos en Chile mediante simulación computacional (CFD) modelando palas de aerogeneradores industriales. El resultado indicara que tan importante es el modelamiento de esta, según condiciones de viento y cómo se comportan las fuerzas aerodinámicas alrededor de esta.

Para ello primero se estudiará la base de la dinámica de fluidos, que es la base teórica en la cual se basaran las idealizaciones y supuestos de las simulaciones en OpenFOAM.

Como la construcción de las palas es un trabajo complejo y los planos de las palas comerciales no son, usualmente, de libre acceso, se modelará unas palas considerando la velocidad de punta, energía eólica disponible y largo de cuerda ideal, según los valores teóricos de la B.E.M. (Blade Element Momentum Theory) y condiciones de operación de aerogeneradores instalados en condiciones similares.

La herramienta computacional con la cual se modelará el comportamiento será OpenFOAM, un programa de libre acceso que permitirá ser utilizado sin costo adicional. Las librerías y funciones abarcan todo lo necesario para poder simular lo requerido, siendo la variable desconocida el poder computacional requerido para llevarlo a cabo, por lo que se debe estudiar la base teórica del análisis de fluidos computacional. Esta base teórica se basa en el método de volúmenes finitos.

CAPÍTULO 1: OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

En el presente trabajo se realizará un análisis comparativo en tres dimensiones de distintas palas o “windblades” de aerogeneradores de eje horizontal considerando distintas condiciones ambientales de nuestro país mediante simulaciones computacionales generadas por un software “*open-source*” llamado OpenFOAM.

1.2 Objetivos Específicos

- Estudiar la dinámica de fluidos y fenómenos involucrados en la aerodinámica de perfiles alares y palas de turbinas eólicas.
- Estudiar los métodos computacionales para modelar los fenómenos físicos aerodinámicos en tres dimensiones de forma eficiente y confiable.
- Estudiar el diseño básico de una pala de turbina eólica, según la teoría aerodinámica.
- Realizar simulaciones en tres dimensiones de distintas palas sometidas a condiciones de viento representativos de distintos sectores geográficos de Chile.
- Identificar, según pala, las condiciones bajo cual son más eficientes, según los resultados del objetivo anterior.
- Proporcionar conclusiones del proceso y resultados, junto con proponer sugerencias sobre futuros estudios relacionados al área investigada.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Base Teórica Dinámica de Fluidos

Para entender los fenómenos físicos que permiten la transformación de energía cinemática del aire a energía mecánica, se definen los fenómenos de la dinámica de fluidos y los números adimensionales que facilitan la teoría.

2.1.1 Ecuaciones Gobernantes

El movimiento de un fluido se modela mediante ecuaciones que gobiernan su comportamiento, basadas en el teorema de transporte de Reynolds, estas ecuaciones se suelen llamar las ecuaciones de Navier-Stokes. Al detallar correctamente la relación entre ellas, se puede resolver directamente problemas de mecánica de fluidos simples bajo ciertas simplificaciones y, mediante herramientas computacionales, se puede simular aproximaciones de los comportamientos más complejos. Estas ecuaciones se basan en un volumen de control, que es una frontera imaginaria que ayuda a delimitar el área en el cual se está trabajando. Especificando las áreas por donde entran y salen los parámetros a controlar, junto con cómo cambian dentro del volumen.

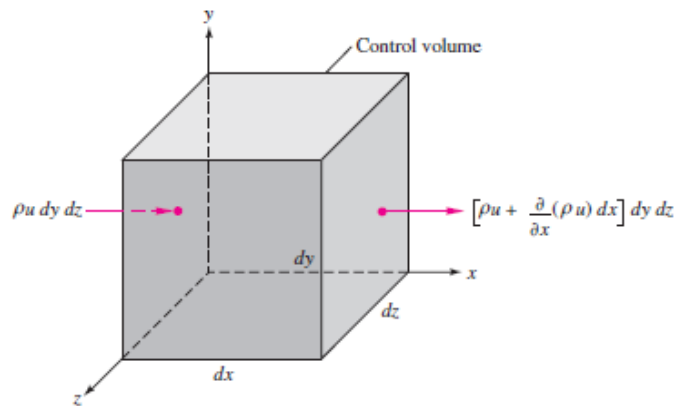


Ilustración 2: Volumen de control fijo cartesiano
 Fuente: Cap. 4, *Differential Relations for fluid flow* [1]

2.1.1.1 Continuidad o Conservación de Masa

Es la variación del total de masa de un cuerpo o volumen de control fijo, en un intervalo de tiempo dt , esta detallada por [1] [3]:

$$\left(\frac{\partial m}{\partial t}\right)_{\text{sys}} = \left(\iiint_{CV} \frac{\partial \rho}{\partial t} \partial v\right) + \iint_{CS} \rho(\vec{C} \cdot \vec{n}) \partial S \quad (1)$$

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

En donde \vec{C} es la velocidad del fluido, ρ es la densidad del fluido, \mathcal{V} el volumen de control (CV) y S la superficie de la superficie de control (CS) y \vec{n} la normal de la superficie. El primer término del lado derecho de la ecuación representa la variación de masa dentro del volumen de control y el segundo la cantidad de masa que sale por las superficies del volumen de control.

2.1.1.2 Conservación de Momento lineal

Al tomar un volumen de control fijo, la sumatoria de fuerzas ejercidas se debe a los esfuerzos de superficie y las fuerzas fuente. Los esfuerzos de superficie, en un fluido, corresponden a los esfuerzos viscosos y las presiones, mientras que las fuerzas fuente son las fuerzas sobre el cuerpo, como la gravedad [2] [3].

$$\frac{D(m\vec{C})}{Dt} = \iint_{CS} (P + \tau_{i,j}) \cdot \vec{n} \partial S + \iiint_{CV} \rho * (\vec{g}) \partial \mathcal{V} \quad (2)$$

En donde P es la presión, $\tau_{i,j}$ los esfuerzos viscosos y \vec{g} la gravedad. El primer término de la derecha de la ecuación es un término difusivo y el segundo es un término de creación dentro del volumen de control, debido a la gravedad.

Por el otro lado, la masa se puede descomponer como el volumen por la densidad, de esta manera se tiene que:

$$\frac{D(m\vec{C})}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{cv} \rho \vec{C} \partial \mathcal{V} + \iint_{cs} (\rho \vec{C} \cdot \vec{C}) \cdot \vec{n} \partial S \quad (2.1)$$

Que detalla el cambio de momento dentro del volumen de control. Al igualar ambas ecuaciones anteriores (2) y (2.1) se tienen las ecuaciones de Navier-Stokes para el momento lineal.

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{cv} \rho \vec{C} \partial \mathcal{V} + \iint_{cs} (\rho \vec{C} \cdot \vec{C}) \cdot \vec{n} \partial S = \iint_{CS} (P + \tau_{i,j}) \cdot \vec{n} \partial S + \iiint_{CV} \rho * (\vec{g}) \partial \mathcal{V} \quad (2.2)$$

2.1.1.3 Simplificaciones y Teorema de Gauss

Las dos ecuaciones (1) y (2.2), representan las formas generales de las ecuaciones usadas para resolver los problemas de dinámica de fluidos, pero para utilizarlas en el software computacional, se expresan mediante el teorema de divergencia de Gauss, tomando en cuenta un diferencial pequeño de cuerpo como volumen de control [3].

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

La conservación de continuidad:

$$\nabla \vec{C} = 0 \quad (3)$$

La conservación de Momento:

$$\rho \frac{\partial \vec{C}}{\partial t} + \rho(\vec{C} \cdot \nabla)\vec{C} = -\nabla P + \mu(\nabla^2 \vec{C}) + \rho \vec{g} \quad (4)$$

En donde μ es la viscosidad dinámica del cuerpo. Cabe mencionar que se considera una densidad constante ρ en estas versiones de las ecuaciones, en caso contrario se debe incluir dentro de los diferenciales.

2.1.2 Viscosidad

La viscosidad es una medida cuantitativa de un fluido que representa su resistencia a fluir [1], la viscosidad produce esfuerzos cortantes que están representados bidimensionalmente en un flujo laminar por:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (5)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante y u es la velocidad unidimensional en la dirección x. La viscosidad de un fluido tiende a cambiar por efecto de la temperatura y presión. En los gases, un aumento en la temperatura aumenta la viscosidad mientras que los cambios de presión generan cambios de viscosidad bastante pequeños [1]. Si el fluido es considerado Newtoniano, su viscosidad es constante independiente del esfuerzo aplicado. La viscosidad de un fluido se puede expresar como dinámica

$$\mu \left[\frac{N \cdot s}{m^2} \right] \quad (6)$$

o cinemática, cuyo nombre se da por las dimensiones.

$$\nu_\mu = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (7)$$

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

2.1.3 Numero de Reynolds

El principal parámetro para estimar el comportamiento viscoso de un fluido es el número adimensional de Reynolds [1]

$$Re = \frac{\rho C_i L_0}{\mu} = \frac{C_i L_0}{\nu_\mu} \quad (8)$$

Donde C_i es la velocidad promedio del flujo en cierta dirección y L_0 el largo característico que depende de la geometría del problema. Este número representa la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas en un fluido y se utiliza para determinar el comportamiento del flujo como laminar o turbulento.

- En el flujo laminar las partículas del fluido se mueven de forma suave imitando laminas. Este comportamiento se encuentra en números de Reynolds bajo [1], en flujo externo ocurre en números menores a 10^5 [2].
- El flujo transitorio es cuando se tiene una mezcla de laminar y turbulento, normalmente en el rango de numero de Reynolds entre 10^5 y 10^7 en un flujo externo.
- En el flujo turbulento las partículas de fluido se mezclan rápidamente y de forma aleatoria formando mini vórtices a lo largo del flujo. En flujo externo se presenta para números de Reynolds mayores a 10^7 [1].

2.1.4 Numero de Mach

En las ecuaciones anteriores, se tienen componentes que dependen de la densidad. Un gas, cuyos cambios de temperatura son mínimos, considerado isotérmico, se puede considerar incompresible, de densidad constante, si la velocidad de este es pequeña en relación con la velocidad del sonido en el mismo medio [2], esta relación está dada por el numero adimensional de Mach

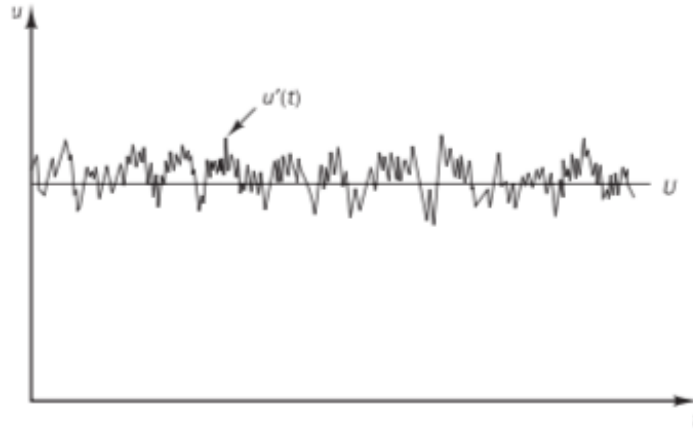
$$Ma = \frac{\vec{c}}{c_\infty} \quad (9)$$

En donde c_∞ es la velocidad del sonido en el medio. Un gas cuyo número de mach es menor a 0.3 se puede tratar como incompresible [1]

2.1.5 Flujos Turbulentos

El comportamiento de las propiedades de un flujo (velocidad, presión, temperatura, energía interna) al estar en un régimen turbulento varían casi aleatoria y caóticamente en función de la posición y el tiempo [3] [4].

Gráfico 2: Velocidad en un punto, en el tiempo, en régimen turbulento
Fuente: Cap. 3, What is Turbulence [3]



2.1.6 Descomposición de Reynolds

En el gráfico 2 se puede ver el comportamiento de la propiedad de velocidad en el tiempo con sus fluctuaciones de un caso genérico. Para facilitar su análisis, se descompone estas propiedades en su valor central sumado su fluctuación turbulenta llamado descomposición de Reynolds [3].

$$u(t) = U + u'(t) \quad [m/s] \quad (10)$$

En donde U es la media temporal de la función turbulenta $u(t)$ [3] [4]

$$U = \bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad [m/s] \quad (10.1)$$

En donde T es un periodo de tiempo promedio mayor a cualquier periodo significativo de fluctuación [4]. De esta manera si tomamos la media temporal de $u(t)$:

$$\bar{u} = U + \bar{u}' = \bar{u} + \bar{u}' \quad (10.2)$$

$$\bar{u}' = 0 \quad (10.3)$$

esta descomposición se puede hacer para todas las propiedades que fluctúan.

$$\varphi(t) = \Phi_p + \varphi'(t) \quad (11)$$

$$\overline{\varphi'} = 0 \quad (11.1)$$

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

2.1.6.1 Varianza, R.M.S y la Energía Cinética Turbulenta Media

El término utilizado para cuantificar el avance de las fluctuaciones alrededor del valor promedio Φ_p , son la varianza y la raíz media cuadrada (R.M.S) [3].

$$\text{Varianza} = \overline{(\varphi')^2} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} (\varphi')^2 dt \quad (12)$$

$$\varphi_{rms} = \sqrt{\overline{(\varphi')^2}} \quad (13)$$

Los valores R.M.S. expresan la magnitud de las fluctuaciones, en específico, este valor aplicado al campo de velocidades nos entrega la intensidad de la turbulencia

$$I_E = \sqrt{\frac{\overline{(u')^2} + \overline{(v')^2} + \overline{(w')^2}}{\overline{C_{tot}}}} \quad (14)$$

$$\overline{C_{tot}} \approx \sqrt{C_i C_i} \quad (14.1)$$

La energía cinética turbulenta media por unidad de masa k , es la mitad de la varianza de la velocidad [3].

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad [J/kg] \quad (15)$$

2.1.7 Torbellinos o Eddies y Cascada de Energía

Las fluctuaciones turbulentas tienen un carácter espacial tridimensional, estos flujos rotacionales se denominan eddies turbulentas o torbellinos. Las eddies de un flujo varían en escala y rango, estos vórtices mueven partículas en el fluido facilitando el intercambio de masa, momento y temperatura [3] [4].

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

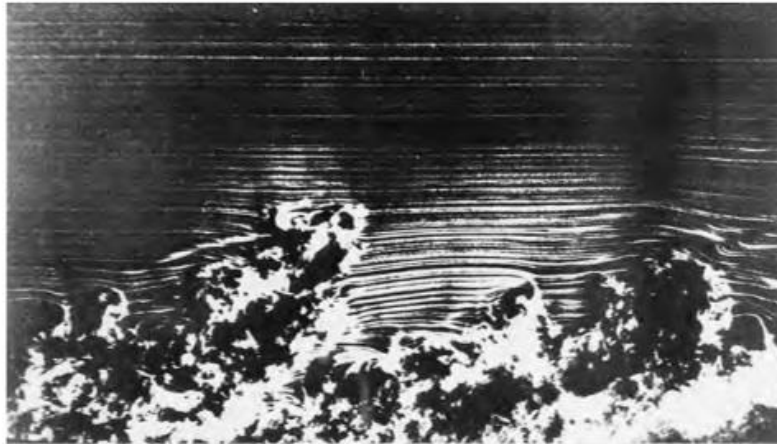


Ilustración 3: visualización de la capa turbulenta y sus vórtices
Fuente: Cap. 3, What is Turbulence [3]

La cascada de energía es el traspaso de energía de torbellinos grandes a unos cada vez más pequeños, hasta que las fuerzas inerciales y viscosas se igualan disipándose en forma de calor. Esta pequeña escala en donde ocurren estos traspasos se denomina la microescala de Kolmogorov, que se pueden expresar en base a la disipación de flujo turbulento ϵ_0 y su viscosidad [3][5].

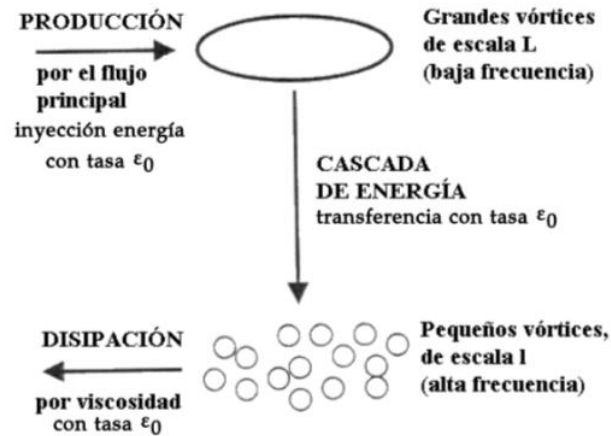


Ilustración 4: Cascada de energía, cascada de Kolmogorov
Fuente: cap. 2.6 El modelo de la Cascada de Energía [5]

En el caso de una turbulencia homogénea e isotrópica, la disipación se puede escribir como [5]:

$$\epsilon = \epsilon_0 = 15\nu \overline{\left(\frac{\partial u'}{\partial x}\right)^2} \quad [m^2/s^3] \quad (16)$$

De la misma manera, se puede expresar para los ejes y o z , cambiando las variables respectivas.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN
CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Los torbellinos grandes tienden ser anisótopos, mientras que los más pequeños se pueden considerar isotrópicos.

2.1.8 Reynolds Averaged Navier-Stokes equation

R.A.N.S. son las ecuaciones de Navier-Stokes, ecuaciones (3) y (4), tomando en cuenta la descomposición de Reynolds, ecuación (11), de esta manera se tiene que la velocidad queda descompuesta en

$$\vec{C}(t) = \bar{C} + C'(t) \quad (17)$$

$$\bar{C} = U + V + W \quad (17.1)$$

$$C' = u' + v' + w' \quad (17.2)$$

La media de la conservación de masa queda como:

$$\nabla \bar{C}(t) = \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} = 0 \quad (18)$$

Y la conservación de momento, ecuación (4), descompuesta por coordenada para visualizar mejor su análisis:

$$x: \quad \rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho \operatorname{div}(U\bar{C}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu(\nabla^2 U) + \rho g - \rho \operatorname{div}(\overline{u'C'}) \quad (19.1)$$

$$y: \quad \rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho \operatorname{div}(V\bar{C}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu(\nabla^2 V) + \rho g - \rho \operatorname{div}(\overline{v'C'}) \quad (19.2)$$

$$z: \quad \rho \frac{\partial W}{\partial t} + \rho \operatorname{div}(W\bar{C}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu(\nabla^2 W) + \rho g - \rho \operatorname{div}(\overline{w'C'}) \quad (19.3)$$

El ultimo termino de cada ecuación corresponde a la transferencia de momento debido a los torbellinos turbulentos [3], estos supuestos esfuerzos adicionales, que no son en realidad esfuerzos, corresponden a los llamados esfuerzos de Reynolds τ_{ij}

$$\begin{matrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{matrix} = -\rho \begin{bmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'^2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Compuesto por tres esfuerzos normales, en la diagonal, y seis esfuerzos cortantes, estos esfuerzos de Reynolds utilizados en modelos de turbulencia generan el concepto de viscosidad turbulenta μ_t . Boussinesq en 1877 propuso un comportamiento de los esfuerzos

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

de Reynolds mediante una analogía con el tensor de esfuerzo viscoso [3], de esta manera se puede expresar los esfuerzos de Reynolds como:

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial \bar{v}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (21)$$

Donde \bar{v} es la velocidad según componente u, v o w , según i, j, k es la energía cinemática turbulenta y δ_{ij} es un delta de Kronecker. Para un flujo incompresible, se debe tener en consideración que

$$\frac{\partial \bar{v}_k}{\partial x_k} = 0 \quad (22)$$

Con el fin de estimar la viscosidad turbulenta, dimensionalmente se modela por una velocidad característica multiplicada por una longitud característica.

$$v_t = vel_c \cdot long_c \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (23)$$

2.1.9 Espesor Capa Limite

Para poder estimar la altura y de la capa limite, se utiliza la versión aproximada

$$\frac{y}{x} = \frac{5.0}{\sqrt{Re_x}} \quad \text{Laminar } 10^3 < Re_x < 10^6 \quad (24)$$

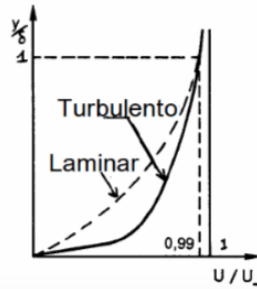
$$\frac{y}{x} = \frac{0.16}{\sqrt[7]{Re_x}} \quad \text{Turbulento } 10^6 < Re_x \quad (24.1)$$

En donde Re_x es el numero de Reynolds según la distancia x . Estos valores corresponden a la teoría integral de cantidad de movimiento de Karman, dando valores hasta 10% más altos que la solución exacta conocida para el flujo de una capa limite laminar de placa plana [1].

2.1.9.1 Capa Limite Dinámica Turbulenta

Debido a la complejidad del comportamiento de la capa limite turbulenta no existen soluciones exactas del flujo, solo aproximaciones, modelos experimentales y computacionales, estos últimos deben ser validados [5]. En flujos limitados por una pared sólida, el perfil de velocidad en un flujo laminar tiende a parecer al de una parábola, en el flujo turbulento este perfil es mucho más pronunciado

Gráfico 3: Perfil de velocidad laminar y turbulento
Fuente: Cap. 4, La Capa Limite Dinámica Turbulenta [5]



El límite entre el flujo turbulento y el flujo laminar es irregular y fluctuante en el tiempo [5].

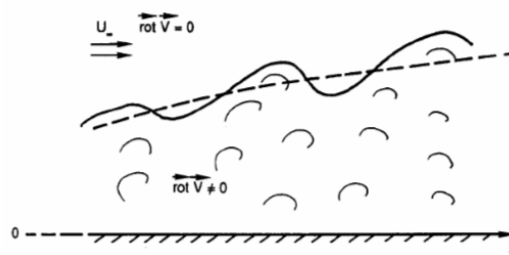


Ilustración 5: Capa Turbulenta
Fuente: Cap. 4, La Capa Limite Dinámica Turbulenta

Esta capa está separada en tres subcapas: la zona turbulenta, la zona intermedia y la zona logarítmica. Para analizar las subcapas, se utiliza una modificación de la ecuación (8), un número de Reynolds que depende de la separación a la pared y :

$$Re = \frac{C_i y}{\nu_\mu} \quad (25)$$

De esta manera, lejos de la pared, se tendrá un número de Reynolds grande, en donde prevalece los efectos inerciales, pero al acercarnos a la pared, existirá una región en donde se igualan en magnitud las fuerzas inerciales y viscosas [3]. En esta región cerca de la pared, en donde los efectos viscosos influyen, la velocidad media es una función que varía según viscosidad, densidad, distancia de la pared y esfuerzo cortante. Dimensionalmente, este comportamiento se modela por la ley de la pared [3] [5]

$$u^+ = \frac{U}{u^t} = f\left(\frac{u^t y}{\nu_\mu}\right) = f(y^+) \quad (26)$$

En donde u^+ , y^+ son números adimensionales que corresponden a velocidad y altura adimensional, sus valores dependen de la zona en la que se encuentren, y u^t es una velocidad conocida como velocidad de fricción.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

$$u^t = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (26.1)$$

En donde τ es el esfuerzo de corte. Según los valores de y^+ se puede modelar el comportamiento de cada subcapa turbulenta:

La Subcapa Turbulenta o linear: Corresponde a sectores muy cercanos a la pared ($y^+ < 5$), en donde la condición de no deslizamiento requiere que la velocidad sea nula, de la misma manera, la velocidad de los torbellinos en los alrededores tiende a cero, por lo que el comportamiento es dominado por efectos viscosos [3] [5]. El flujo en esta área es predominantemente laminar. El espesor de esta capa es extremadamente delgado, por lo que se puede considerar que el esfuerzo cortante τ_w es constante por lo que:

$$u^+ = y^+ \quad (26.2)$$

La Zona Intermedia: Es un el intervalo entre la subcapa logarítmica y la turbulenta ($5 < y^+ < 30$), el comportamiento de esta zona es bastante complejo y existen distintos modelos para modelar su comportamiento [5].

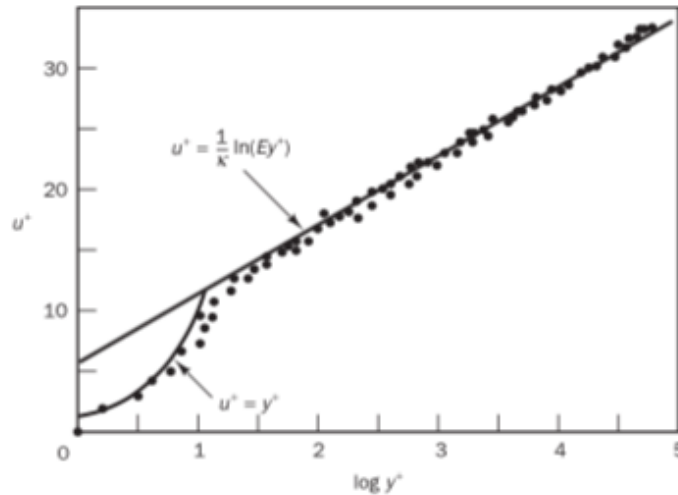
La Subcapa Logarítmica: Es la subcapa más lejana ($30 < y^+ < 500$). En esta zona, los efectos viscosos y turbulentos son importantes, donde [3]:

$$u^+ = \frac{1}{k_v} \ln(y^+) + B = \frac{1}{k_v} \ln(Ey^+) \quad (26.3)$$

Donde k_v es la constante de Von Karman $k_v \approx 0.4$ y B la constante aditiva para superficies lisas $B \in [3.7, 5.5]$ o $E \approx 9.8$ [3][5].

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

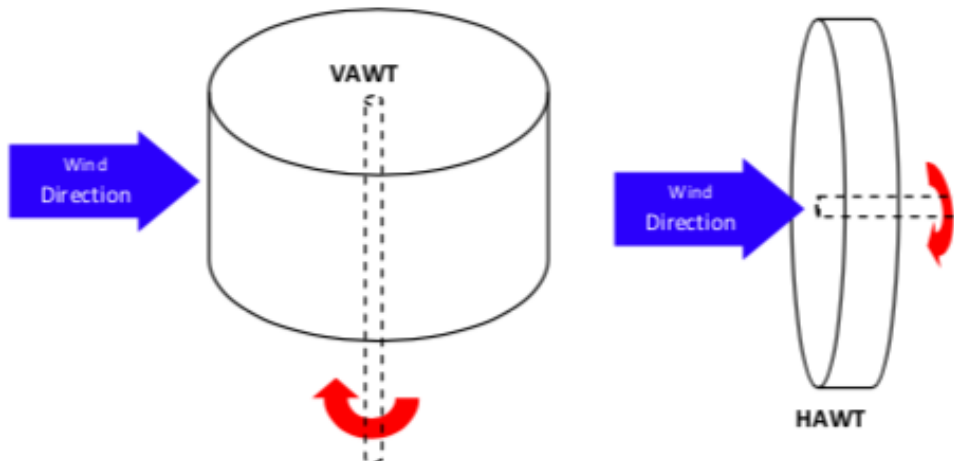
**Gráfico 4: Distribución de velocidad cerca de la pared, *Schlichting, H. (1979)*
Fuente: Cap. 3.4, Characteristics Of Simple Turbulent Flows [3]**



Lejos de la pared, el fluido ya no es afectado por los efectos de la viscosidad, sino que, por los esfuerzos de corte.

2.2 Aerogeneradores

Los aerogeneradores son turbinas eólicas que utilizan la energía cinética del viento, movimiento de aire ocasionado por condiciones climáticas, para producir energía mecánica, la cual posteriormente se transforma en energía eléctrica. Estas turbinas eólicas, se separan en dos categorías según la orientación de su eje, horizontal (HAWT) o vertical (VAWT).



**Ilustración 6: Turbinas de viento de eje horizontal (HAWT) y vertical (VAWT)
Fuente: Wind Turbine Blade Design [6]**

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Las VAWT utiliza la fuerza de arrastre o "*drag*" para la producción de energía mientras que la HAWT utiliza la fuerza de sustentación o "*lift*". En el presente informe se enfocará en las HAWT.

2.2.1 Límite de Betz y eficiencia actual

Las turbinas eólicas de eje horizontal tienen un máximo de eficiencia alcanzable, llamado el límite de Betz que corresponde al 59.3% de la energía del viento. En cuanto a la cantidad de energía que se puede captar en la práctica, se han alcanzado valores cercanos al 50%

Blade Qty	efficiency
1	43%
2	47%
3	50%




Ilustración 7: Eficiencia máxima del diseño según cantidad de palas, valores correspondientes a diseños en operación (2012)
Fuente: Wind Turbine Blade Design [6]

Las turbinas eólicas industriales actuales tienden a empezar a rotar alrededor de 2 a 5 [m/s], dependiendo de su tamaño, a este valor se le llama velocidad de arranque, "*cut in wind speed*". Por el otro lado, para proteger los sistemas mecánicos y estructurales, la turbina dejara de girar mediante el uso de frenos y/u otros sistemas especiales cuando la velocidad del aire se acerque a valores sobre alguna velocidad establecida de corte, "*cut off wind speed*" [19] para evitar posibles daños estructurales o mecánicos.

2.2.2 Estructura de una HAWT

Los aerogeneradores de eje horizontal de uso industrial tienden a tener la misma configuración general.

- La torre es una estructura fija en donde se monta el rotor y la góndola, es el soporte estructural.
- La góndola está ubicada encima de la torre y está unida al rotor, en algunas configuraciones esta estructura puede girar respecto al eje vertical de la torre para adaptarse a la dirección del viento, "*Yaw*".
- El rotor este compuesto por las palas y el centro, las cuales giran alrededor de un eje horizontal, este eje está conectado a la góndola.
- Las palas captan la energía del viento y la convierten en movimiento giratorio, en algunas estructuras estas se pueden girar respecto el radio de giro para cambiar el ángulo de ataque con que el viento se enfrenta a los perfiles alares de la pala, "*Pitch*".

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Para la producción de energía, a grandes rasgos, el rotor hace girar un eje de velocidad baja (3) el cual, mediante una caja de cambios, multiplica sus revoluciones hacia el eje de alta velocidad que está acoplado a un generador, produciendo así corriente eléctrica [6].

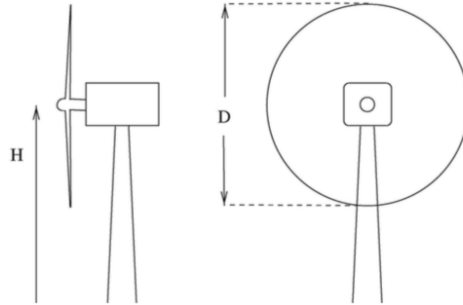


Ilustración 8: HAWT vista lateral y trasera
Fuente: Cap. 1, General introduction to Wind Turbines [9]

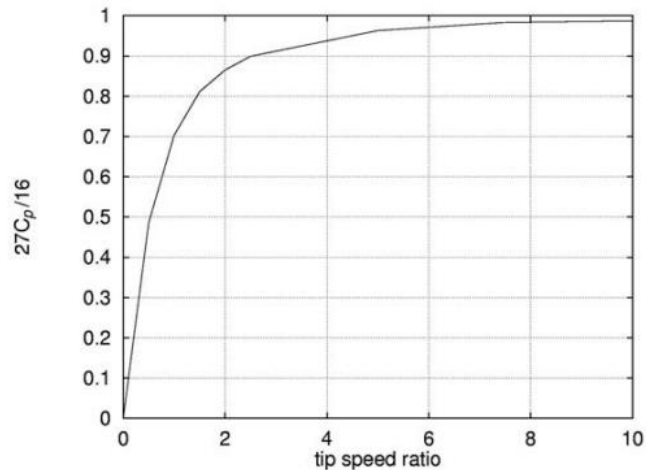
2.2.3 Velocidad de punta

El comportamiento de los aerogeneradores de eje horizontal, como eficiencia, torque, estrés mecánico, aerodinámica y ruido, se puede identificar según el número adimensional velocidad de punta λ [6].

$$\lambda = \frac{\omega R}{\vec{C}_{viento}} \quad (27)$$

En donde ω es la velocidad rotacional en $[rad/s]$ y R el radio total respecto el eje de giro en $[m]$. Un valor de uno o dos es considerado bajo, usualmente correspondiente a molinos de viento o para bombeo de agua, de baja eficiencia. Un valor alto corresponde a los mayores de 10, utilizado mayormente en prototipos de una o dos palas [6], aunque actualmente existen aerogeneradores en este rango de tres palas. La eficiencia aumenta poco en números mayores a 8.

Gráfico 5: CP vs velocidad de punta, respecto el máximo teórico posible
Fuente: Cap. 4, One-Dimensional momentum theory [...] [9]



El sonido generado por un aerogenerador aumenta aproximadamente a la sexta potencia en la escala general [6] con el aumento de la velocidad de punta.

2.2.4 Perfil Alar aerogenerador

Un perfil alar está compuesto por:

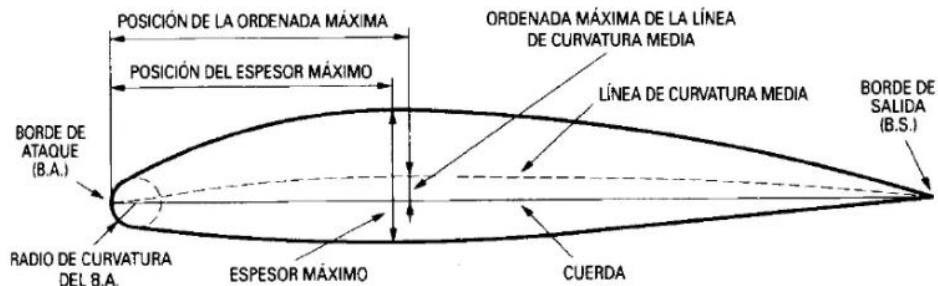


Ilustración 9: Partes de un perfil alar
Fuente: Cap. 3, Origen de las fuerzas aerodinámicas [12]

El borde superior es llamado Extradós, el borde inferior es llamado Intradós. La cuerda es la línea recta entre el borde de ataque y el borde de salida [9][12]. El movimiento del aire por esta estructura genera una diferencia de presión, debido al cambio de velocidad generado por la geometría de la estructura, que genera la fuerza de sustentación.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

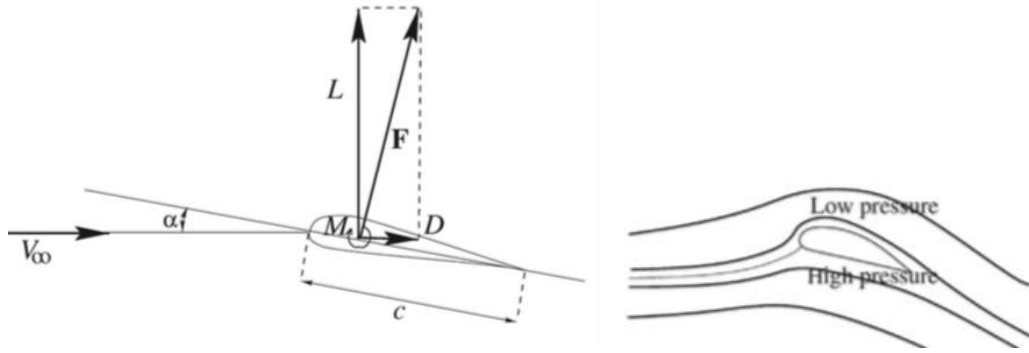


Ilustración 10: Fuerza de sustentación y arrastre en un perfil alar

Fuente: Cap. 2, Two-dimensional Aerodynamics [9]

En donde α es el ángulo de ataque, el ángulo que se forma entre la velocidad relativa y la cuerda c , L es la fuerza de sustentación, D la fuerza de arrastre y F La resultante de estas dos fuerzas. Cada perfil alar tiene un coeficiente de sustentación C_l y de arrastre C_d , números adimensionales que relacionan la fuerza de sustentación y arrastre por unidad de longitud l [N/m] y d [N/m], con la velocidad relativa al cuadrado, la densidad y el largo de cuerda c [m] [9]:

$$C_l = \frac{l}{\frac{1}{2} \rho \vec{C}_{rel}^2 c} \quad (28)$$

$$C_d = \frac{d}{\frac{1}{2} \rho \vec{C}_{rel}^2 c} \quad (29)$$

En las turbinas eólicas se busca maximizar la sustentación y minimizar el arrastre.

2.2.5 Palas de un aerogenerador

Una pala es la extensión de un perfil alar, o varios, que varían en largo y ancho. La raíz (Root) es el área más cercana al rotor y es diseñado, predominantemente, como soporte de la estructura total. La sección media (Mid span) y la punta (TIP) son los sectores de la pala en donde se produce la mayoría de la sustentación, se componen de perfiles alares que reducen su tamaño a lo largo del álabe y rotan su ángulo de ataque. La punta es donde se concentran los vórtices producidos por la interacción entre la pala y el viento, el diseño de su terminación afecta en la eficiencia de pala y el sonido producido.[6].

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

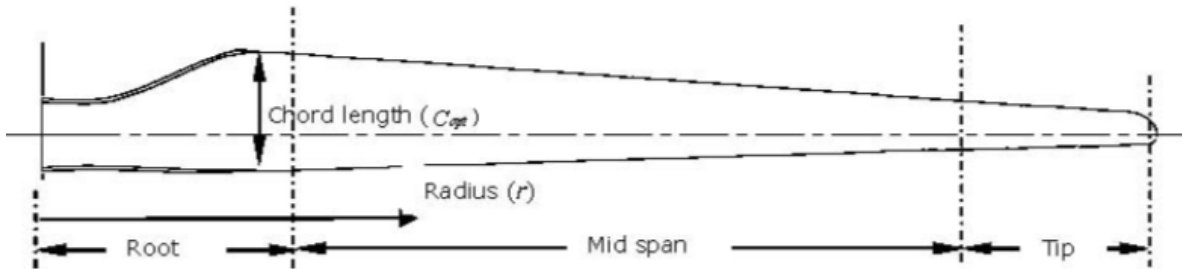


Ilustración 11: Secciones de una pala
Fuente: Wind Turbine Blade Design [6]

La longitud de cuerda (Chord length) es el ancho del perfil alar, este se reduce según la distancia del centro del rotor, según la teoría B.E.M. y el método de optimización utilizado, teóricamente se utiliza el método Beltz o Schmitz.

2.2.5.1 Teoría B.E.M.

La geometría de la pala del rotor se basa en la teoría B.E.M. (Blade Element Momentum theory), una metodología para estimar la energía extraída del viento que consiste en:

- Considera una independencia radial de cada anillo de rotación dr
- No considera la expansión de la estela

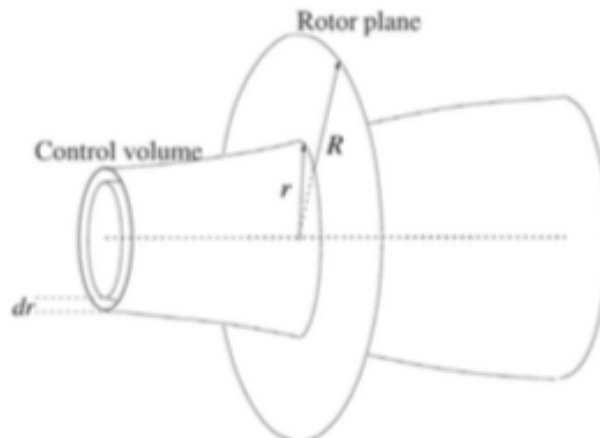


Ilustración 12: Visualización del volumen de control para el modelo BEM
Fuente: Cap. 6, The classical blade element momentum method [9]

Donde la fuerza de empuje que siente el aerogenerador se calcula mediante

$$dF_e = N \frac{1}{2} \rho * V_{rel}^2 (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) c(r) dr \quad (30)$$

Y la fuerza de Torque generada

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

$$dF_t = N \frac{1}{2} \rho * V_{rel}^2 (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) c(r) r dr \quad (31)$$

En donde N es el número de palas del aerogenerador que se está idealizando. En este método, el triángulo de velocidades respecto a cada perfil eólico de las palas se vuelve más complejo, ya que considera la reducción de velocidad por continuidad, la rotación de las palas y la reacción del viento a la rotación de las palas.

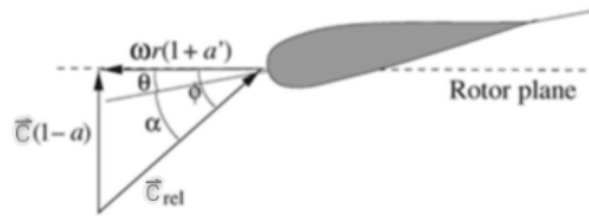


Ilustración 13: Triángulo de velocidad considerando rotación de la pala, modificado para utilizar terminología propia

Fuente: Cap. 6, The classical blade element momentum method [9]

En donde a es el factor de inducción axial a' es el factor de velocidad angular inducida en el viento por el giro de la pala. De este triángulo de velocidades, se encuentra la relación para el ángulo de sección "pitch" θ

$$\theta = \phi - \alpha \quad (32)$$

En donde α es el ángulo de ataque del perfil alar usado y ϕ es el ángulo formado por el triángulo de velocidades. El ángulo de "sección pitch" es la suma del ángulo de torsión y el ángulo de pitch

$$\theta = \theta_0 - \theta_t \quad (32.1)$$

Como la velocidad resultante está en un ángulo, la fuerza de sustentación y arrastre calculadas estarán en un ángulo recto respecto la velocidad del viento, no el plano rotor, por lo que se debe hacer una corrección [9].

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

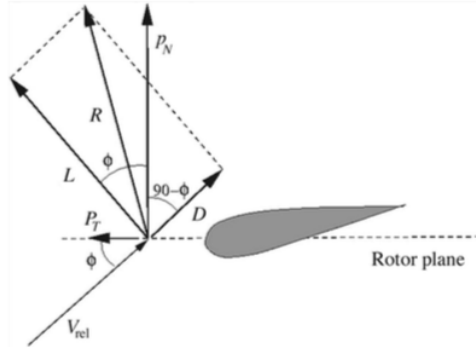


Ilustración 14: Triángulo de fuerzas en el perfil alar
Fuente: Cap. 6, The classical blade element momentum method [9]

En donde la constante normal y tangencial al plano de rotación, C_n y C_t son:

$$C_n = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \quad (33)$$

$$C_t = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi \quad (34)$$

Además, se define una variable llamada “solidity” σ_r [9]

$$\sigma_r = \frac{c(r)N}{2\pi r} \quad (35)$$

En donde $c(r)$ el largo de cuerda local. La solidez, o “solidity” es una relación entre el área barrida por la pala y el área ocupada por las palas dentro de esta. Con esta relación se calcula el valor de inducción axial a mediante:

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{C_n} + 1} \quad (36)$$

Además, se tiene que la inducción de velocidad angular a' depende de a , mediante la ecuación:

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi}{\sigma_r C_t} - 1} \quad (37)$$

De esta manera, se crea una función cíclica para calcular los ángulos, a y a' [9]:

1. Se estima un valor de a y a' .
2. Se calcula el ángulo de torsión θ y ángulo del triángulo de velocidades ϕ .
3. Se calcula C_n y C_t
4. Se recalcula a y a' con los valores anteriores.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

5. Si a y a' son lo suficientemente cercanos a los valores originales, se termina el ciclo. En caso contrario, se debe volver al punto (2).

Este cálculo nos da una respuesta idealizada que no considera los efectos aerodinámicos generados por la rotación de la pala en la punta, por lo que se deben hacer dos correcciones.

El factor de pérdida "Prandtl's tip loss factor" que corrige el haber asumido un número infinito de palas, este factor multiplica el torque y empuje.

$$F_{tip} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left(- \left\{ \frac{(N/2)(1 - \frac{r}{R})}{\frac{r}{R} \sin \phi} \right\} \right) \right] \quad (38)$$

La corrección de Glauert, que es una corrección empírica del factor a mayores que 0.4 [9].

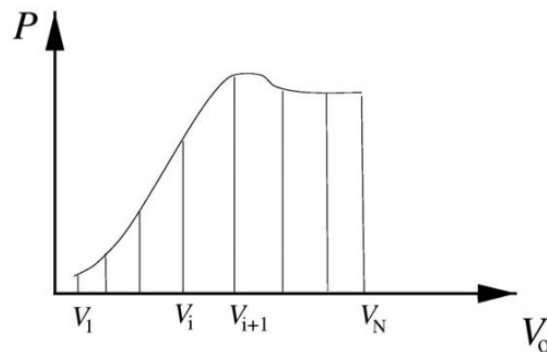
$$a = \left(\frac{1}{F_{tip}} \right) [0.143 + \sqrt{0.0203 - 0.6427(0.889 - C_t)}] \quad (39)$$

Con estas correcciones, se puede calcular el coeficiente de poder que es la relación entre el poder aprovechado por las palas del aerogenerador y el poder del viento en el área circular correspondiente al radio de giro.

$$C_p = \frac{\int_{r_0}^R \omega F_{tip} dF_t}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 \bar{C}_{viento}^3} \quad (40)$$

El poder generado con respecto al viento en la práctica tiene la siguiente forma

Gráfico 6: Potencia en función de la velocidad del viento de una turbina eólica
Fuente: Cap. 6, The Classical Blade Element Momentum Theory [9]



COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Esta curva de poder tiene un tope máximo llamado potencia nominal, que corresponde a la velocidad nominal a la cual se diseña un aerogenerador. En la práctica, para las velocidades de viento mayores a esta velocidad, se limita el giro del rotor para no sobrecargar el generador y evitar posibles daños mecánicos y estructurales. La forma en que consiguen esto es variando la velocidad de giro según rangos de velocidades de vientos, cambiando el ángulo de ataque mediante el pitch de la pala θ_0 , y/o frenando directamente el rotor.

2.2.5.2 Métodos para el cálculo del largo de cuerda

En la teoría BEM, no se utiliza una expresión para calcular el largo de la cuerda de cada perfil alar, para ellos se puede utilizar uno de los siguientes métodos, que son los utilizados por el programa Qblade.

Método de Betz: este método considera largos de cuerda para obtener la máxima eficiencia teórica, y no considera los efectos de la rotación de los alabes en su cálculo [10][11].

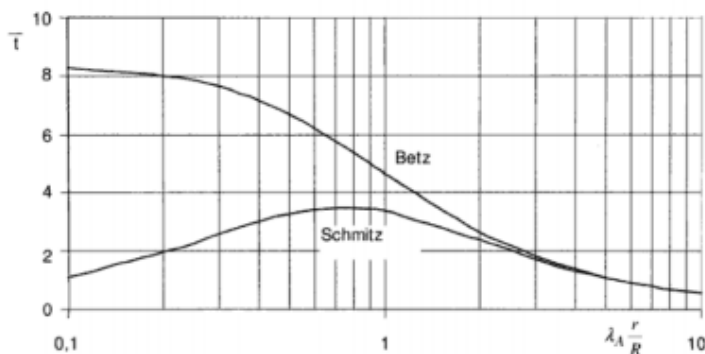
$$c(r) = \frac{16}{9} \frac{\pi R}{N C_L \lambda} \frac{1}{\sqrt{\left(\lambda_0 \frac{r}{R}\right)^2 + \frac{4}{9}}} \quad (41)$$

En donde λ es la velocidad de punta a la cual se quiere optimizar y R es el largo deseado de la pala.

Método de Schmitz: Este método considera los efectos de rotación y es considerado más sofisticado que el anterior [11].

$$c(r) = \frac{16\pi r}{N C_L} \sin^2 \left(\frac{1}{3} \tan^{-1} \left(\frac{R}{\lambda_0 r} \right) \right) \quad (42)$$

Gráfico 7: relación entre largo de cuerda a lo largo de la pala según método.
Fuente: Cap. 6, Blade Optimization [10]



COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Se debe tener en consideración que valores bajos de velocidades de punta λ resultaran en un mayor largo de cuerda general.

2.2.5.3 Efecto “Stall”

El efecto de “stall”, pérdida de sustentación, ocurre cuando el flujo del aire sobre la superficie del perfil alar pasa de ser predominantemente laminar a turbulento, lo que perturba la disminución de presión disminuyendo o hasta anulando el efecto de sustentación. Normalmente, ocurre cuando el ángulo de ataque del perfil alar excede cierto rango, o cuando existen imperfecciones en la superficie que significan un cambio brusco en el camino usual del aire.

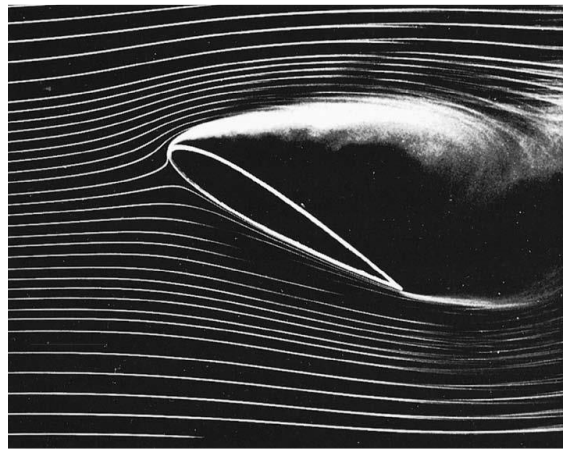


Ilustración 15: Efecto “Stall” sobre un perfil alar
Fuente: cap. 7 Flow past immersed bodies [4]

2.3 Dinámica de Fluidos Computacional CFD

La dinámica de fluidos computacional fue creada para poder simular las interacciones energéticas de un fluido dentro de sistemas, de forma computacional, para verificar y estimar los comportamientos de estos. Según el libro “*Introduction to CFD*”, “*corresponde al análisis de sistemas que involucran flujos de fluidos, transferencias de calor y fenómenos asociados, como reacciones químicas por medio de simulaciones computacionales*” [3].

El trabajo de CFD consta de tres elementos principales: Preprocesador, “Solver” y Post-procesador.

Preprocesador: es la definición del problema o fenómeno físico que se quiere modelar, el cual se resume en los siguientes pasos:

- Definición de la geometría de interés
- Generación de subdominios o malla
- Selección y Modelamiento del fenómeno físico y/o químico.
- Definición de las propiedades del fluido
- Condiciones de frontera

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

“Solver”: Es la forma en que se resuelve el problema. Algunos de los métodos de discretización espacial son: diferencias finitas, elementos finitos, volúmenes finitos o método espectral. En este documento se centrará en el de volúmenes finitos, el cual es utilizado en el programa OpenFOAM y la mayoría de software CFD. Este método se basa en la conservación de una propiedad del fluido φ dentro de un volumen de control finito y como este se ve afectado por los procesos que tienden a aumentar y disminuirlo en su interacción con el entorno. Basado en el teorema de transporte:

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \text{div}(\rho \varphi \vec{C}) = \text{div}(\Gamma \text{grad } \varphi) + S_{\varphi} \quad (43)$$

En donde Γ es un termino difusivo y S_{φ} un termino fuente. Parecido a la ecuación (1), el aumento de la propiedad φ en el fluido mas la salida de flujo neto de φ por las paredes del volumen es igual al aumento de φ por difusión mas el aumento de φ por fuentes. Esta teoría es la utilizada en la dinámica de fluidos, ecuación (2.2), de la misma forma, utilizando el teorema de Gauss, se obtiene la forma integral:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\iiint_{CV} \rho \varphi \partial V \right) + \iint_{CS} \vec{n} \cdot \rho \varphi \vec{C} \partial S = \iint_{CS} \vec{n} \cdot (\Gamma \text{grad } \varphi) \partial S + \iiint_{CV} S_{\varphi} \partial V \quad (44)$$

Tomando en cuenta posibles simplificaciones y correcciones, se siguen los siguientes pasos:

- Integración de las ecuaciones gobernantes del fluido sobre todo el volumen del dominio
- Conversión de las ecuaciones integrales a un sistema de ecuaciones algebraicas
- Solución de las ecuaciones algebraicas por un método iterativo

Pos procesador: Es la visualización de los resultados por medio de:

- Gráficos de los resultados
- Trazado de vectores en 2D y 3D
- Visualización de la geometría y malla
- Visualización de vectores trazados alrededor de la geometría

Entre otras más opciones, que pueden variar según los programas utilizados.

2.3.1 Modelos Turbulentos

La modelación de flujos turbulentos utilizados en este trabajo se basa en las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes (RANS). En esta, se encuentran ecuaciones llamadas “estrés de Reynolds”, cuyo comportamiento se puede predecir por medio de modelos turbulentos [3]. Los modelos existentes se basan en la simplificación de Boussinesq y se clasifican según la cantidad de ecuaciones de transporte agregadas para predecir el comportamiento turbulento. Dentro de estas, existen cuatro cuyo principal uso es para aplicaciones

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

aeroespaciales: El modelo de una ecuación Spalart-Allmaras y los modelos de tres ecuaciones: $k - \epsilon$ de Launder y Spalding (1974), $k - \omega$ de Wilcox y el modelo de transporte de estrés cortante (SST) $k - \omega$.

2.3.1.1 Modelo Spalart-Allmaras

Este modelo solo involucra una ecuación de transporte adicional sobre la viscosidad turbulenta cinemática, y la especificación de una escala de longitud mediante una formula algebraica [3]. En este método, cerca de la pared en donde se considera el largo de mezcla, se debe tener especial cuidado al calibrar el cálculo de la distancia mínima entre el punto considerado y la superficie de la geometría, dado que utilizar métodos que dependen del mallado utilizado pueden afectar los resultados obtenidos [14].

Dentro los modelos, es el menos intensivo en recursos computacionales, encontrando soluciones aceptables para simulaciones aerodinámicas, teniendo problemas cuando se genera una separación de la capa limite. Este modelo no se recomienda para geometrías complejas.

2.3.1.2 Modelo $k - \epsilon$

El modelo $k - \epsilon$ de turbulencia, que consiste en una escala de velocidad basada en k , energía cinética turbulenta, y una escala de longitud basada en ϵ , la disipación de energía cinética turbulenta. Este modelo trata la viscosidad turbulenta como isotrópica.

La viscosidad turbulenta relaciona las variables k y ϵ

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (45)$$

En donde C_μ es una constante del modelo para la viscosidad turbulenta. La ecuación de disipación para k y ϵ son:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + P_k - \rho \epsilon \quad (46)$$

En donde D_k es la difusividad efectiva de k y P_k es la producción de energía cinética turbulenta.

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho D_\epsilon \nabla \epsilon) + \frac{C_1 \epsilon}{k} \left(P_k + C_3 \frac{2}{3} k \nabla \cdot u \right) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (47)$$

En donde D_ϵ es la difusividad efectiva de ϵ y C_1, C_2, C_3 son constantes del modelo. Además de esta relación, se tiene que definir condiciones iniciales para estos parámetros. Para la energía cinética turbulenta

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

$$k = \frac{2}{3} (I |\vec{C}_{ref}|)^2 \quad (48)$$

En donde I es la intensidad turbulenta y \vec{C}_{ref} la velocidad de referencia del flujo. Para la disipación de turbulencia

$$\epsilon = 0.09^{0.75} \frac{k^{1.5}}{L} \quad (49)$$

Si el mallado cerca de la pared contiene valores de $y+ < 5$, se deben aplicar funciones de amortiguación para simular los fenómenos de la subcapa turbulenta.

Estas ecuaciones implementadas en el código de OpenFOAM se puede revisar en el anexo en las ecuaciones (63) (64) con los valores de las constantes en la tabla (12).

Se debe tener en cuenta que este modelo sobre predice la energía cinética turbulenta en puntos de estancamiento y presenta dificultades con simulaciones con separación de flujo y flujos supersónicos. Y cuando se requiere resultados en donde se tiene un mallado $y+ < 5$, llamada zona de bajo Reynolds, es preferible utilizar otros modelos.

2.3.1.2 Modelo $k - \omega$

El modelo $k - \omega$ se basa en el modelo $k - \epsilon$ de turbulencia. El modelo de Wilcox utiliza la frecuencia de turbulencia ω , la tasa de disipación turbulenta específica, como segunda variable en vez de ϵ .

$$\vartheta = \sqrt{k} \quad (50)$$

$$\omega = \epsilon/k \quad (51)$$

$$\ell = \sqrt{k}/\omega \quad (52)$$

En donde ϑ es la escala de velocidad, ω la disipación de energía cinética turbulenta específica y ℓ una escala de longitud. La viscosidad turbulenta se relaciona con estas escalas mediante

$$\mu_t = \rho k/\omega \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (53)$$

En este método, la energía turbulenta cinética k en la muralla equivale a 0, pero la frecuencia ω tiende a infinito en la muralla, por lo que se aplica una variación hiperbólica cercano a la pared [3].

$$\omega_p = \frac{40000(v_{muralla})}{k_s} \quad (54)$$

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

En donde se elige un valor de k_s , suficientemente pequeño para que $(\overline{C_T} k_s / \nu) < 5$. La versión más reciente según "Wilcox2006" agrega las siguientes consideraciones [15]

$$\hat{\omega} = \max \left[\omega, C_{lim} \sqrt{\frac{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}{\beta_2}} \right] \quad (55)$$

$$\bar{S}_{ij} = S_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial(\bar{C}_k)}{\partial x_k} \quad (55.1)$$

Para la entrada, se debe asignar un valor de k y ω distinto de 0, ya que la viscosidad turbulenta se indetermina. Esto tiende a que los resultados de un flujo libre dependan de ω , lo cual dificulta su uso en aerodinámica externa [3].

2.3.1.3 Modelo SST $k - \omega$

El modelo $k - \omega$ SST (Transporte de esfuerzo cortante) es una mezcla de el método $k - \varepsilon$ y $k - \omega$. En la zona turbulenta, se utiliza el primer método, k-épsilon y al acercarse a la muralla, se traspasa al segundo, k-omega.[3]

El modelo utilizado en el programa OpenFOAM es una variante del modelo 2003 [13], la cual define la viscosidad turbulenta como

$$\nu_t = a_1 \frac{k}{\max(a_1 \omega, b_1 F_{23} S)} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (56)$$

En donde a_1, b_1 son valores específicos y S, F_{23} son funciones que se detallan en la tabla 13 en el anexo.

Este método es más independiente de los valores iniciales de k y ω , es capaz de simular separación de flujo [13] y de mejor rendimiento para un gradiente de presión cero y gradiente de presión adverso

2.3.2 Discretización

Las ecuaciones que se deben *discretizar* tienen partes *transiente*, *difusivas* y *convectivas*. Mas en específico, la discretización se centra en la parte difusiva y convectiva. En un proceso difusivo la distribución de la propiedad es en todas las direcciones, por otro lado, un proceso convectivo solo afecta el gradiente en sentido del flujo. Esto se traduce en limitaciones en el mallado para que la discretización utilizada converja.

Lo que requiere del método de discretización es [3]

- Que sea Conservativo: Que la cantidad de propiedad que sale de una cara del volumen de control sea igual a la entrante por la misma cara de el volumen de control adyacente.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

- “*Boundedness*”: Que los valores de los resultados estén dentro del intervalo razonable y posible. Esto se logra si los coeficientes de la matriz resultante son diagonalmente dominantes.
- *Transportabilidad*: Al tomar en cuenta los términos *convectivos* y difusivos, se encuentra el número de Peclet

$$Pe = \frac{\rho \vec{C}_{x,y,z}}{(\Gamma/\delta(x,y,z))} \quad (57)$$

Si este número es cercano a 0, significa que predomina la difusividad, pero si tiende a infinito, domina la convección, por lo que se debe tener en cuenta este efecto. El término que se puede controlar es $\delta(x,y,z)$, que es el tamaño de la celda de la malla.

De los métodos conocidos de discretización, algunos de los utilizados en OpenFOAM son:

- *Linear*
- *Upwind*
- *Linear Upwind*
- *Limited Linear*

2.3.3 Algoritmos de solución para velocidad y presión en flujos continuos

Con el fin de evitar problemas de interpretación, OpenFOAM separa las propiedades del volumen de control en dos. En el centro de este, se guardan las propiedades del flujo como presión o temperatura y en las caras del volumen de control se guardan las velocidades, guardando en cada cara, según su normal la velocidad ortogonal a esta, con el fin de ubicarlas exactamente dónde deben estar para la interpolación escalar [3]. Esta diferencia crea una malla escalonada, de la cual se basan el algoritmo para encontrar valores del campo de velocidad y presión de forma cíclica y correctiva.

En estos casos se debe tener en cuenta el término de “*under-relaxation*” α_c :

$$\vec{C}^{nuevo} = \alpha_c \vec{C} + (1 - \alpha_c) \vec{C}^{n-1} \quad (58)$$

Que es un número que se le asigna un valor menor a 1, para reducir oscilaciones de los algoritmos. Mientras más pequeño el número, más se demorará en converger la solución. Un valor de 1 en α_c significa que no tiene “*under-relaxation*”. De la misma manera que para la velocidad, existen términos de relajación para la presión.

2.3.3.1 Algoritmo SIMPLE

El método “*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*” se basa en predecir el valor de la presión p^* con la cual se entra al ciclo:

- Paso 1: Resolver las ecuaciones de momento y encontrar $u^{n+1}, v^{n+1}, w^{n+1}$

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

- Paso 2: Resolver la ecuación de presión correctiva despejando p'
- Paso 3: Corregir velocidades y presión con la presión correctiva $u^{n+1}, v^{n+1}, w^{n+1}, p^{n+1}$
- Paso 4: Resolver todas las demás ecuaciones de transporte discretizadas ϕ^{n+1}
- Paso 5: Verificar convergencia. Si converge, terminar el ciclo, si no, evaluar

$$\begin{aligned}p^{n+1} &= p \\ \phi^{n+1} &= \phi \\ \vec{C}^{n+1} &= \vec{C}\end{aligned}$$

y volver al paso 1.

Este algoritmo es usualmente usado para flujos estacionarios.

2.3.3.2 Algoritmo PISO

El método “*Pressure Implicit with Splitting of Operators*” fue creado para casos de flujos no estacionarios compresibles [3]. Este algoritmo se ha adaptado hacia una solución iterativa de flujos estacionario y es parecido al algoritmo SIMPLE, solo que agrega un paso corrector más. Tomando en cuenta el mismo inicio, se predice el valor de presión p^* con la cual se entra al ciclo:

- Paso 1: Resolver las ecuaciones de momento y encontrar u^*, v^*, w^*
- Paso 2: Resolver la ecuación de presión correctiva despejando p'
- Paso 3: Corregir velocidades y presión con la presión correctiva
- Paso 4: Resolver la segunda ecuación presión correctiva p''
- Paso 5: Segunda corrección de velocidades y presiones con p''
- Paso 6: Dejar los valores de velocidades y presión como

$$\begin{aligned}p &= p^{n+1} \\ \vec{C} &= \vec{C}^{n+1}\end{aligned}$$

- Paso 7: Resolver todas las demás ecuaciones de transporte discretizadas ϕ^*
- Paso 8: Verificar convergencia. Si converge, terminar el ciclo, si no, evaluar

$$\begin{aligned}p^* &= p \\ \phi^* &= \phi \\ \vec{C}^* &= \vec{C}\end{aligned}$$

y volver al Paso 1.

Este algoritmo es usado para flujos no estacionarios.

2.3.3.3 Algoritmo PIMPLE

Este método es una mezcla de ambos métodos anteriores, en donde en cada iteración de tiempo, se utiliza el método SIMPLE para llegar a un resultado convergente, con el cual se procede al próximo paso de tiempo mediante PISO. Este método es más estable que el método PISO bajo las condiciones correctas.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

2.3.4 Law of the Wall in CFD

La ley de la pared asume que la turbulencia cercana a una pared no depende de las condiciones de flujo lejos de la pared, sino que de las condiciones de flujo cercana a la pared mediante un análisis dimensional del valor de y^+ .

- Si $30 \leq y^+ \leq 300$ se deben utilizar funciones de pared llamadas Wall-functions
- Si $1 \leq y^+ \leq 300$ se pueden utilizar funciones de pared escalables, que cambian según el valor de y^+ .
- Si $y^+ \leq 6$ se puede resolver el espesor turbulento sin funciones de pared (teniendo en cuenta que el mallado es el adecuado)

2.3.5 Numero de Courant

El número de Courant es un numero adimensional que a grandes rasgos relaciona el movimiento de una propiedad por el espacio con el barrido espacial de la malla y los saltos temporales utilizados.

$$Co = \frac{\vec{C}\Delta t}{\Delta x} \quad (59)$$

Esto quiere decir que si se tiene un numero de Courant mayor que uno, se están barriendo el mallado más rápido que la propagación las propiedades físicas, lo cual puede traducirse en inestabilidad computacional y errores, especialmente en metodologías de solución explícita.

CAPÍTULO 3: ESTADO DE LA ENERGIA EÓLICA EN CHILE

En Chile la mayoría de los parques eólicos tienen turbinas que producen energía en el orden de los mega watts, aerogeneradores de alrededor de 80 metros de altura con radios de pala de 50 metros. Estos componen la mayoría, si es que no es la totalidad, de los megaproyectos de aerogeneradores para la generación de energía eléctrica para la red central de electricidad.

El uso de aerogeneradores industriales de más baja producción en Chile no es muy común, aun cuando su potencial energético puede perfectamente suplir energía para hogares e industrias, según el recurso eólico disponible, en diversas áreas de nuestro país. Su utilización en forma autónoma o en conjunto de baterías y paneles solares ya está en implementación comercialmente y se está usando para la generación eléctrica de torres de celulares, pero esta no está siendo promovida activamente como una alternativa para generación eléctrica intermedia entre el de producción pequeña y los megaproyectos.

El recurso eólico disponible depende del lugar geográfico específico, el mes del año, y la altura considerada, normalmente mientras más altura se tiene, mayor será el recurso eólico disponible. Existe una herramienta de libre acceso llamado el “Explorador Eólico” desarrollado por el “Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile”. Con el podemos extraer un mapa del recurso eólico disponible.

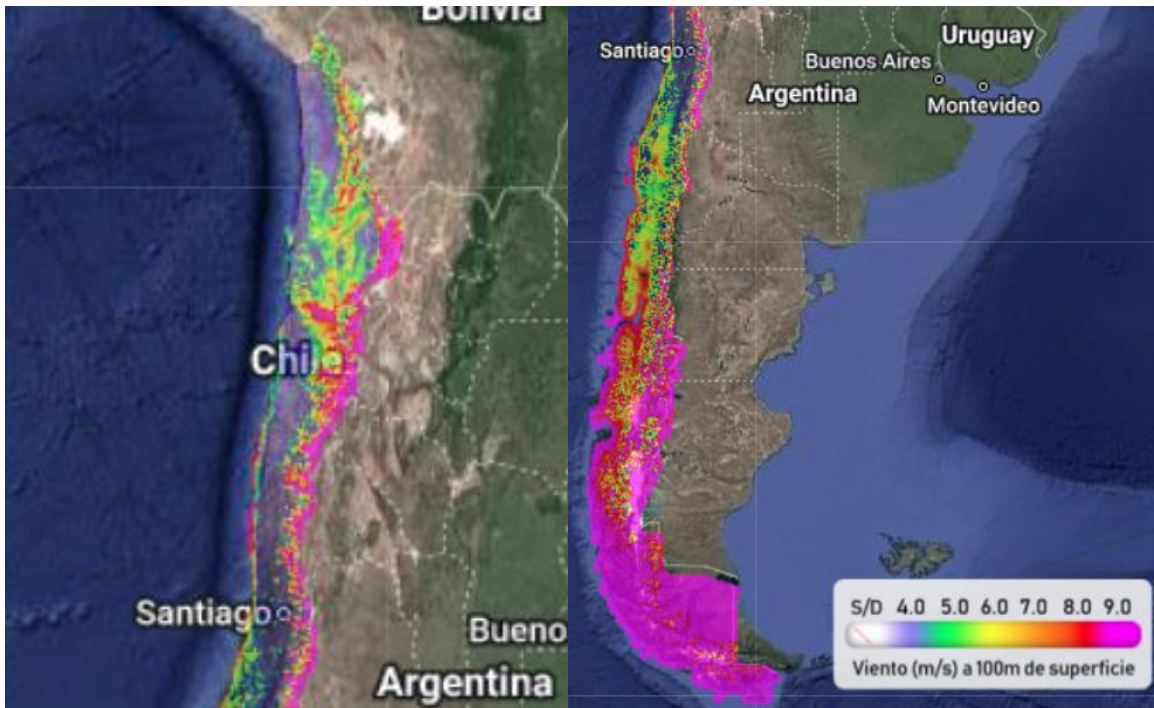


Ilustración 16: Mapa del recurso eólico de Chile del explorador eólico
Fuente: Explorador Eólico

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

El recurso eólico de Chile, excluyendo el territorio marítimo, se concentra en el centro y sur del país, teniendo en sectores específicos del norte y centro un buen potencial para la generación de energía eléctrica. Los aerogeneradores industriales pequeños, que son el enfoque del presente documento, se instalan usualmente en alturas de 10 a 30 metros, pero la velocidad del viento presentes en la ilustración 17 corresponden a 100 metros de altura sobre la superficie, por lo cual se debe considerar que el área azul presente en la mayoría del mapa, a alturas de 10 a 30 metros, corresponden a velocidades más bajas en las cuales la viabilidad de instalar aerogeneradores es problemática y debe evaluarse caso a caso.

Ya se han realizado estudios para la selección de los lugares apropiados para la instalación de aerogeneradores, por lo que se basarán en los parques eólicos instalados y en construcción para la selección de las condiciones de viento a las cuales se someterán las palas a evaluar. Como se pretende simular palas de aerogeneradores industriales dentro de los 5 a 30 [kW] de potencia, se recolectará las condiciones de viento a 30 metros de altura.

3.1 Parques Eólicos a Considerar

Los parques eólicos que se consideraran para las condiciones de viento corresponden a un parque de la zona norte, centro y sur de Chile, pero sus condiciones “eólicas” son bastante parecidas a los demás parques eólicos presentes en el país. Estos parques son Taltal, Talinay II y Vientos del Pacifico.

3.1.1 Parque Eólico Taltal

El parque eólico Taltal está ubicado en la región de Antofagasta, en la comuna Taltal. Esta instalación está compuesta por 33 turbinas Vestas V112/3000 de potencia nominal 3000[kW]. En su total, se tiene un poder nominal de 99000[kW] [18].

En la siguiente tabla se especifican aspectos generales de estas turbinas [17]

Tabla 1: Especificaciones Generales del aerogenerador Vespa v122/3000

Fuente: Elaboración Propia

Diámetro Total	112 [m]
Radio Rotor	1.35[m]
Largo Pala	54.65 [m]
Velocidad de entrada nominal	15.5 [m/s]
Mínima velocidad de Viento	3,5 [m/s]
Velocidad Rotor	12.8 [RPM]
Velocidad Variable Rotor	6.2-17.7 [RPM]
Número de palas	3
Clase Viento	IEC IIA
Poder Optimizado Hasta	3.3 [MW]
Eficiencia Generador	98%

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

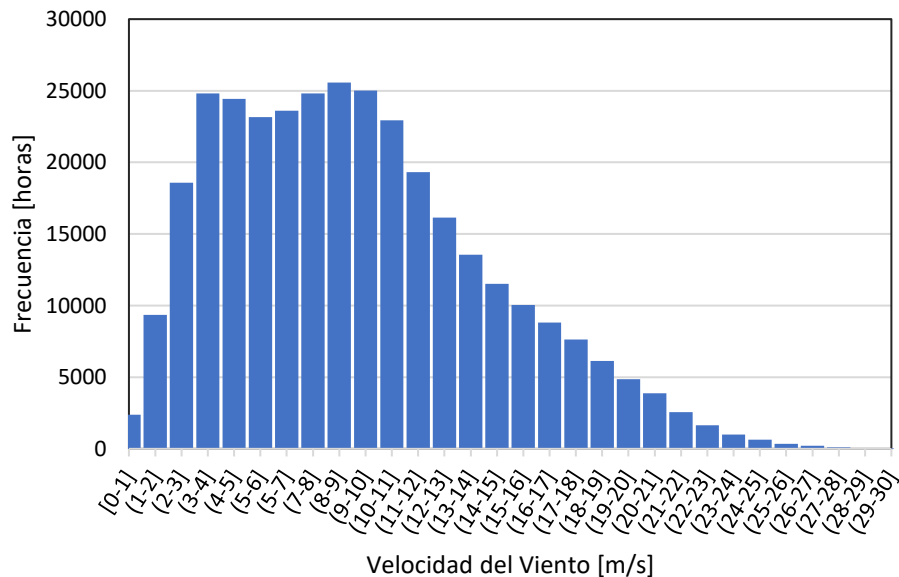
La Clase de viento correspondiente a **IEC IIA** [22] corresponde a una velocidad promedio, a la altura de la torre, de $8.5 [m/s]$ y una intensidad turbulenta de 0.16 . Con la ayuda de una herramienta de análisis del recurso eólico, basado en el modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*), el Explorador Eólico, se encuentra el comportamiento del aire en la ubicación correspondiente a una de las torres instaladas.

Latitud	25.07 S
Longitud	69.84 O
Elevación del terreno (modelo WRF)	2181 metros
Densidad del aire	$0.95 (kg/m^3)$

Cuadro 1: Características a 30 metros de altura. Densidad del aire refiere a la densidad media simulada por el modelo WRF. La altura es de un modelo suavizado comparado con la topografía real. Informe producido por explorado eólico.

Para los años de 1980 a 2017, las frecuencias de las velocidades presentes a 30 metros de altura sobre la superficie terrestre son:

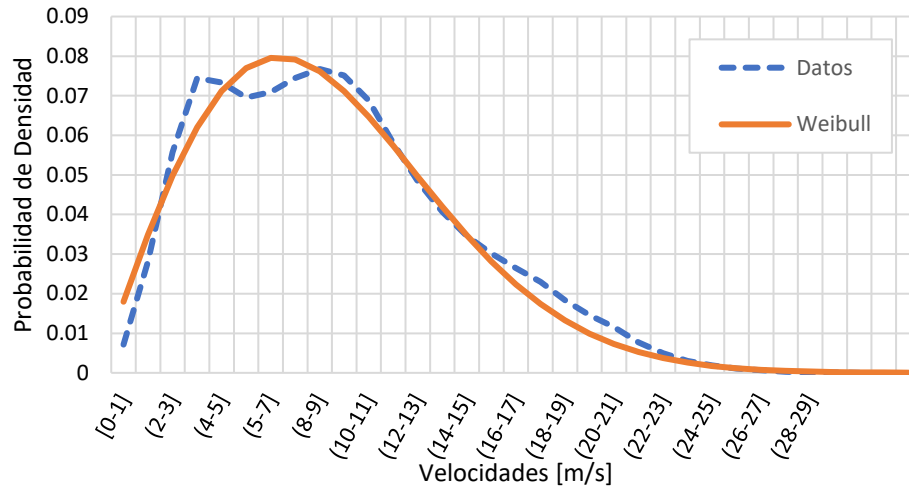
Gráfico 8: Histograma de las velocidades del viento a 30[m] desde 1980 a 2017, Fuente: Explorador Eólico para Taltal, elaboración propia



Del histograma anterior, se puede apreciar una asimetría positiva, sugiriendo en promedio, la velocidad está cerca de los $10 [m/s]$, un poco más alta que la clase de viento del aerogenerador. Para poder visualizar mejor, se transforma a una función de probabilidad de densidad

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

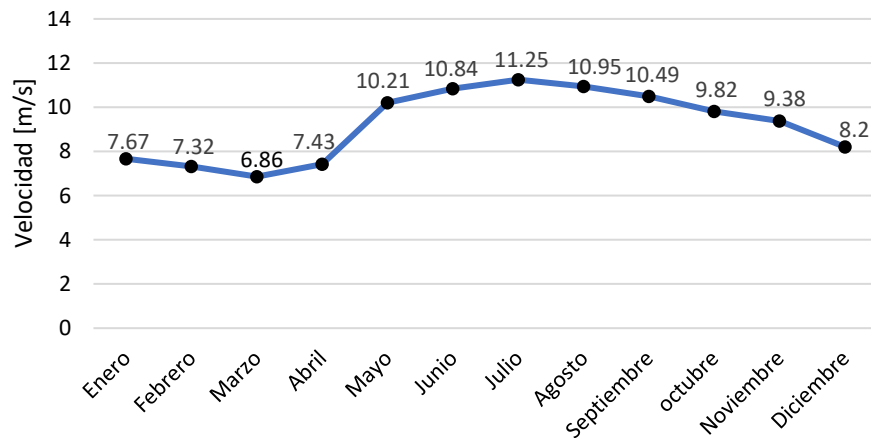
Gráfico 9: Función de densidad de Probabilidad de la velocidad del viento en Taltal
Fuente: Elaboración Propia



Del gráfico 9, al encontrar la probabilidad de tener una velocidad desde la velocidad de arranque 3,5 [m/s], hasta la velocidad óptima diseñada 15 [m/s], corresponden al 76% de probabilidad acumulada.

El explorador eólico nos entrega una visualización de las velocidades de un año típico.

Gráfico 10: Velocidades Promedio de un año típico en Taltal
Fuente: Explorador Eólico



Del gráfico anterior se puede apreciar que la velocidad es generalmente mas baja en los meses de verano y principio de otoño, pero mas importante es que, en promedio esta cercano, aunque mas alto, al valor de la clase de viento **IEC IIA**. En promedio, la velocidad del aire desde el año 1980 hasta el 2017 es 9.22 [m/s] con una desviación estandar de 5.06 [m/s].

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

3.1.2 Parque Eólico Talinay II (Poniente)

El parque eólico Talinay corresponde a cuatro instalaciones eólicas correspondiente a la región de coquimbo, en la ciudad de Ovalle. Las cuatro instalaciones separadas en oriente y poniente constan de aerogeneradores de 1.8 a 2 MW que inyectan 90 [MW] y 66.6 [MW] a la red eléctrica, respectivamente. Talinay II (Poniente) se separa en dos partes. La que se analizará será la parte 1, compuesta por 17 turbinas Vestas V100/2000 de potencia nominal 2000[kW] que en su total tiene un poder nominal de 34000 [kW] [21]. En la siguiente tabla se especifican aspectos generales de estas turbinas [17]

Tabla 2: Especificaciones Generales del aerogenerador Vespa v100/2000

Fuente: Elaboración Propia

Diámetro Total	100 [m]
Radio Rotor	1.0[m]
Largo Pala	49 [m]
Largo Cuerda Máximo	3,9 [m]
Velocidad de entrada nominal	12 [m/s]
Mínima velocidad de Viento	3 [m/s]
Velocidad Rotor	14.9 [RPM]
Velocidad Variable Rotor	9.3-16.6 [RPM]
Numero de palas	3
Modelo “offshore”	no
Clase Viento	IEC IIB
Poder Optimizado hasta	2.2 [MW]

La Clase de viento correspondiente a IEC IIB [22] corresponde a una velocidad promedio, a la altura de la torre, de 8.5 [m/s] y una intensidad turbulenta de 0.14. Con la ayuda del explorador eólico, se encuentra el comportamiento del aire en la ubicación correspondiente al sector del proyecto Talinay II.

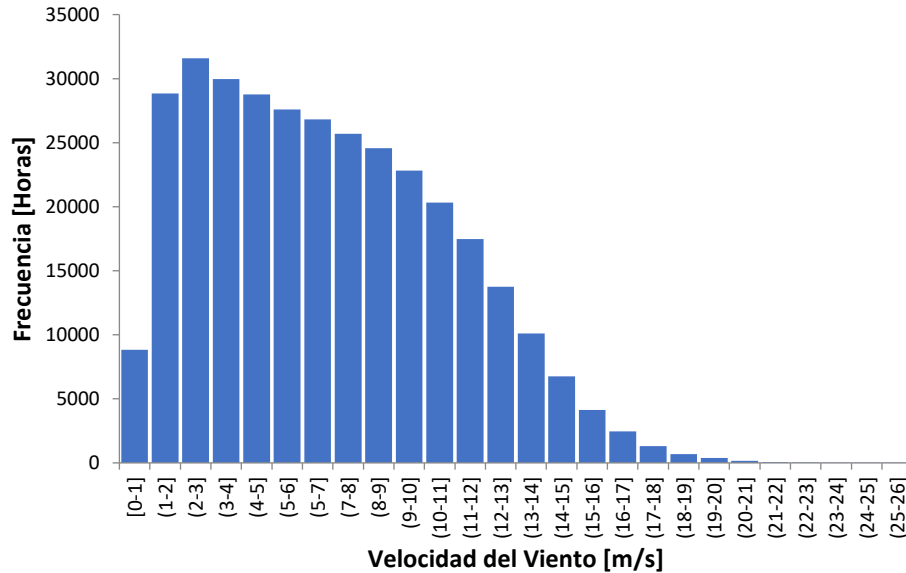
Latitud	30.81 S
Longitud	71.59 O
Elevación del terreno (modelo WRF)	342 metros
Densidad del aire	1.19 (kg/m ³)

Cuadro 2: Características a 30 metros de altura. Densidad del aire refiere a la densidad media simulada por el modelo WRF. La altura es de un modelo suavizado comparado con la topografía real. Informe producido por explorado eólico.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

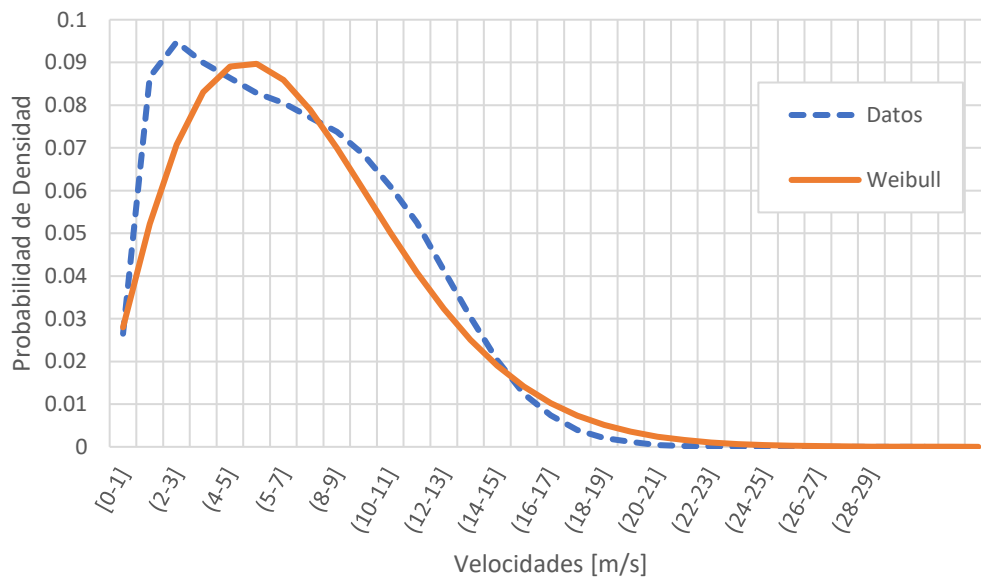
La frecuencia de las velocidades presentes a 30 metros de altura sobre la superficie terrestre es:

Gráfico 11: Histograma de las velocidades del viento a 30[m] desde 1980 a 2017
Fuente: Explorador Eólico para Talinay II, elaboración propia



Del histograma anterior, se puede apreciar asimetría positiva, pero no se puede apreciar el centro de este a simple vista. Para poder visualizarlo mejor, se transforma a una función de probabilidad de densidad

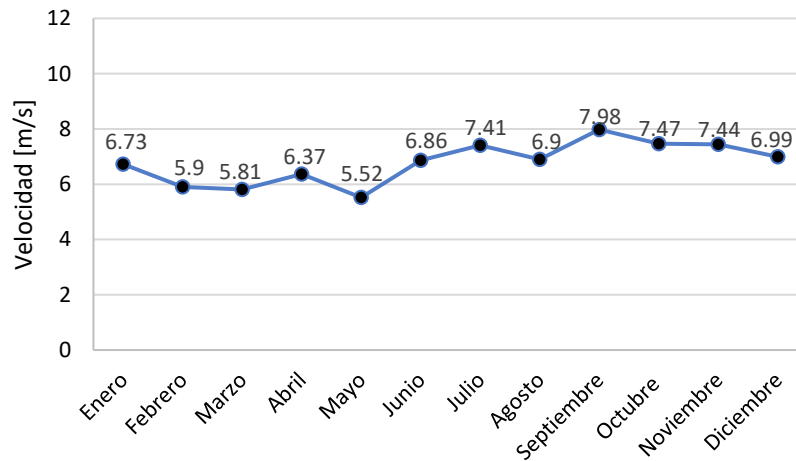
Gráfico 12: Función densidad de Probabilidad de la velocidad del viento en Talinay II
Fuente: Elaboración Propia



COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Del gráfico 12, al encontrar la probabilidad de tener una velocidad desde la velocidad de arranque, 3,5 [m/s], hasta la velocidad optima diseñada, 12 [m/s], corresponden al 71% de probabilidad acumulada. Tomando un año típico, según el explorador eólico, se puede apreciar que la velocidad no tiene una gran diferencia entre invierno y verano.

Gráfico 13: Velocidades Promedio de un año típico en Talinay II
Fuente: Explorador Eólico



Se puede apreciar que las maximas velocidades se alcanzan en la epoca de primavera-verano. Los valores de este año promedio esta por debajo del valor de clase de viento IEC IIB, por lo que se esperaria que se produjera menos potencia que la esperada, sea este un valor menor despreciable o no es algo que se tiene que analizar con mas detalle.

En promedio, la velocidad del aire desde el año 1980 hasta el 2017 es 6.84 [m/s] con una desviacion estandar de 4.01 [m/s], cercano pero de igual manera mas bajo que la clase de viento IEC IIB.

3.1.3 Parque Eólico Vientos del Pacifico

El parque Vientos del Pacifico es un proyecto de parque eólico actualmente con su “Estudio de Impacto Ambiental” en calificación. El proyecto está ubicado en la región del Biobío, en las comunas de Arauco-Curanilahue [23].

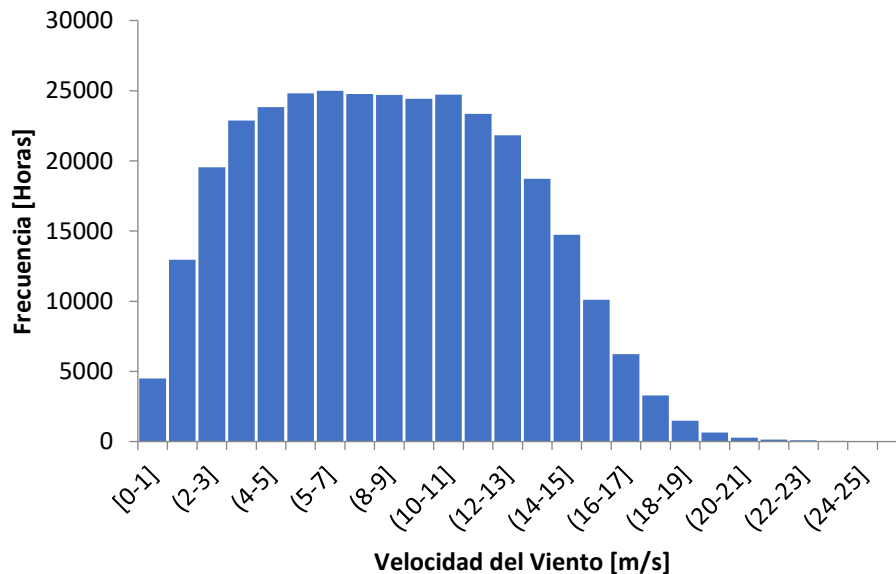
Latitud	37.29 S
Longitud	73.55 O
Elevación del terreno (modelo WRF)	285 metros
Densidad del aire	1.21 (kg/m ³)

Cuadro 3: Características a 30 metros de altura. Densidad del aire refiere a la densidad media simulada por el modelo WRF. La altura es de un modelo suavizado comparado con la topografía real. Informe producido por explorado eólico.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

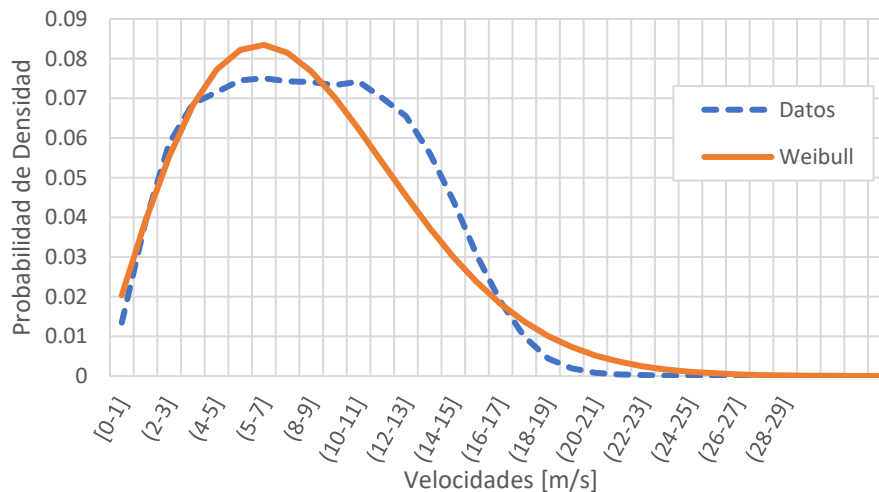
Las turbinas eólicas que se planean usar en este proyecto son mayores a 3000 [kW], para tener una potencia instalada de 215 [MW] en conjunto entre 43 aerogeneradores. Lo que sugiere que cada aerogenerador deberá ser de 5000[kW] como mínimo para llegar a esta capacidad. Utilizando el explorador eólico, se arma el histograma:

Gráfico 14: Histograma de las velocidades del viento a 30[m] desde 1980 a 2017
Fuente: Explorador Eólico para Vientos del Pacifico, elaboración propia



Esta distribución de velocidades parece tener una curtosis negativa, agrupando la mayoría de sus valores dentro de los rangos de operación de las turbinas eólicas de los casos anteriores. Para visualizar mejor, se transforma a una función de probabilidad de densidad

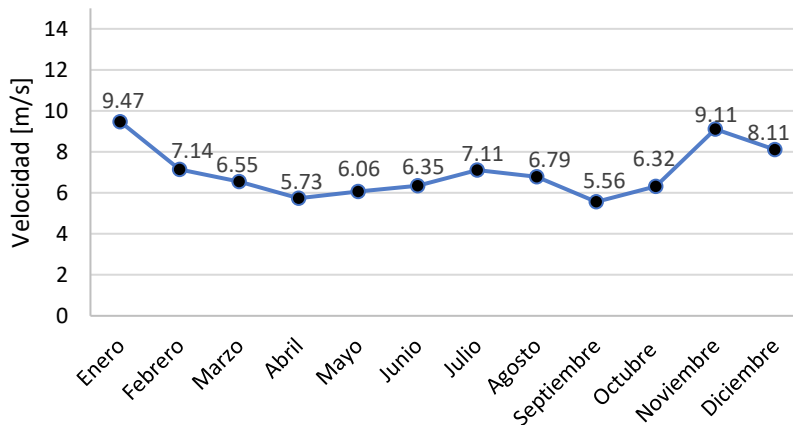
Gráfico 15: Función de densidad de Probabilidad de la velocidad del viento en Vientos del Pacifico
Fuente: Elaboración Propia



COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Del gráfico 15, al encontrar la probabilidad de tener una velocidad desde la velocidad de arranque, 3,5 [m/s], hasta la velocidad optima diseñada, 15 [m/s], corresponden al 82% de probabilidad acumulada, tomando en cuenta el modelo de turbina eólica de Tatal. Por el otro lado, al considerar el modelo de turbina usado en Talinay II, con su velocidad optima de diseño de 12 [m/s], esta probabilidad acumulada corresponde a 71%. Tomando un año típico, igual que en los casos anteriores, según el explorador eólico:

Gráfico 16: Velocidades Promedio de un año típico en Vientos del Pacifico
Fuente: Explorador Eólico



En promedio, la velocidad del aire desde el año 1980 hasta el 2017 es 6.38 [m/s] con una desviación estándar de 3.13 [m/s].

3.2 Condiciones Eólicas a Considerar

Las condiciones eólicas de los parques eólicos Vientos del Pacifico y Talinay II son parecidos, ambos están instalados a alturas similares por lo que se considerará que el máximo valor del promedio puede considerarse como un buen punto de velocidad de diseño. Al tomar en consideración el parque eólico Taltal, este valor aumenta considerablemente, pero considerando su altura, 2181 metros sobre el nivel del mar, este se podría considerar como un outlier de las condiciones eólicas del país, en general. Con el fin de realizar simulaciones en tres dimensiones de palas sometidas a condiciones de viento representativas de distintos sectores geográficos de Chile, tomando en cuenta que se quiere diseñar una pala que aproveche la mayor cantidad de energía, se evaluarán las palas a una velocidad de 10 [m/s], un valor cercano al máximo de los parques eólicos vientos del Pacifico y Talinay II, a 30 metros de altura, y el promedio del parque Taltal. La velocidad óptima a la cual se diseñará la pala se verá según la velocidad de punta.

CAPÍTULO 4: MODELAMIENTO DE LAS PALAS

El proceso de diseño de una pala de turbina eólica horizontal es bastante complejo, están las consideraciones aerodinámicas, estructurales y monetarias a considerar al momento de diseñar y posteriormente construir una pala. Para el fin de esta investigación, se utilizará una base estructural simplificada, se utilizará un solo perfil alar a lo largo de la pala con perfiles alares circulares en la raíz para simular el soporte estructural. Las palas se separarán en 21 secciones para su diseño, usualmente se separa en 10 a 20 elementos [25], tomando como referencia una pala diseñada usando el programa “Q-Blade” [24].

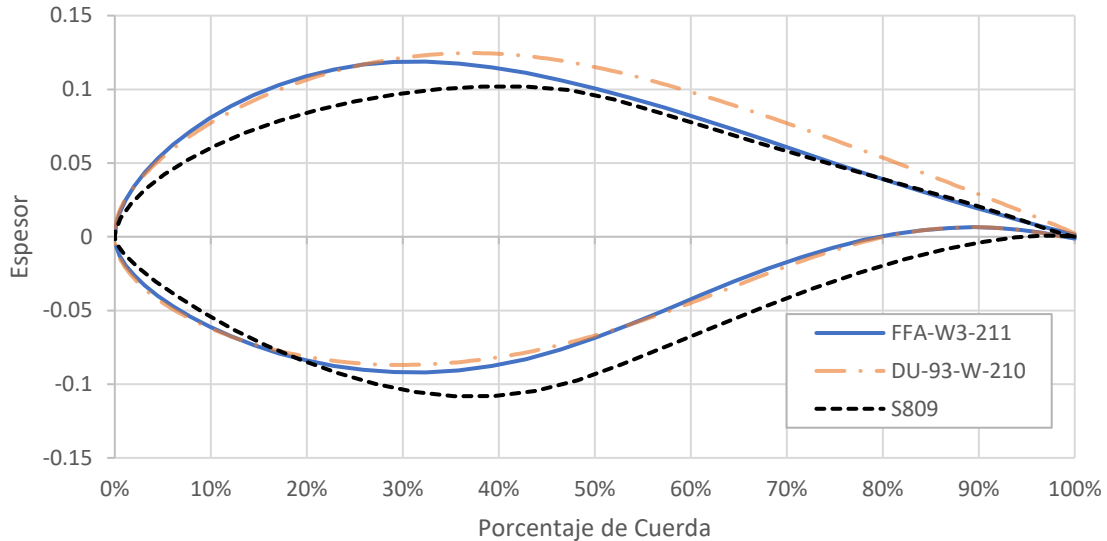
Para el diseño de la pala, se suele seguir los siguientes pasos. Primero se decide el poder nominal que se quiere aprovechar a una velocidad de viento, elegida del diagrama de Weibull para aprovechar la máxima cantidad de energía eólica, el número de palas que tendrá el aerogenerador y que velocidad de punta λ tendrá, tomando en cuenta el largo de la pala y la velocidad del viento. Una pala se optimiza para una velocidad de punta, y la velocidad nominal es el indicador de la velocidad de giro nominal mediante esta relación, por lo que un diseño de pala tiene distintas velocidades de viento nominales, dependiendo de la velocidad de giro. Las eficiencias máximas de estos generadores se alcanzan para valores de velocidad de punta cercanos y mayores a 7. Aerogeneradores diseñados para generación eléctrica tiene una velocidad de punta entre 4-8, siendo el aumento de eficiencia relativamente insignificante con valores sobre 8.

Para el diseño de estas palas, los perfiles alares utilizados son

- FFA-W3-211: este perfil posee una relación entre el máximo espesor y el largo total de la cuerda de 21.1% ubicado en el 32.4% de la cuerda, este perfil es el utilizado en las turbinas Vesta. Por la disponibilidad de su curva de coeficiente de sustentación y arrastre a cierto número de Reynolds, se utilizará para validar la optimización del programa “Qblade”.
- DU-93-W-210: Es el perfil más eficiente para las condiciones ambientales de los parques considerados [32]. Posee una relación entre el máximo espesor y largo total de cuerda de 21%, ubicado alrededor del 30% de la cuerda.
- S809: Es el perfil alar utilizado para la simulación de validación, basada en los experimentos de NREL “Phase VI”.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Gráfico 17: Perfiles alares seleccionados para las palas modeladas y el caso de validación.



4.1 Modelamiento Palas Aerogenerador usados en Chile

El modelamiento de la pala se realizará mediante el programa "QBlade", el cual es un programa que utiliza "X-Foil", un programa que estima las curvas C_l/C_d de perfiles alares, para la creación de aerogeneradores mediante optimización automatizada. Con el fin de validar esta optimización para su uso en las palas, se realizará el diseño preliminar de una primera pala con el perfil alar FFA-W3-211, después se realizará una optimización de este primer modelo ideal y este se comparará con la pala que genera "QBlade". Si los valores son similares, se utilizará "QBlade" directamente en los demás diseños directamente.

4.1.1 Modelamiento Pala preliminar del aerogenerador

Para el diseño preliminar de la pala se asumen los siguientes parámetros:

- Un numero de Reynolds del orden de $10E6$
- El radio se asumirá de 5.6 [m]
- Velocidad de punta, $\lambda = 7$
- Numero de palas, $N = 3$

Con estos parámetros definidos, se comienza a diseñar la pala, separada en 20 secciones según el perfil alar. Para simplificar el diseño de la pala, el cual necesita información específica de la curva de sustentación y arrastre a varios ángulos de ataque del perfil alar utilizado, se utilizará un perfil cuya curva es conocida para el rango de Reynolds que se utilizara, el perfil alar FFA-W3-211. Para definir la forma de la pala optima, se utiliza una aproximación del ángulo ϕ de viento relativo φ , según la velocidad de punto local λ_r [25]

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

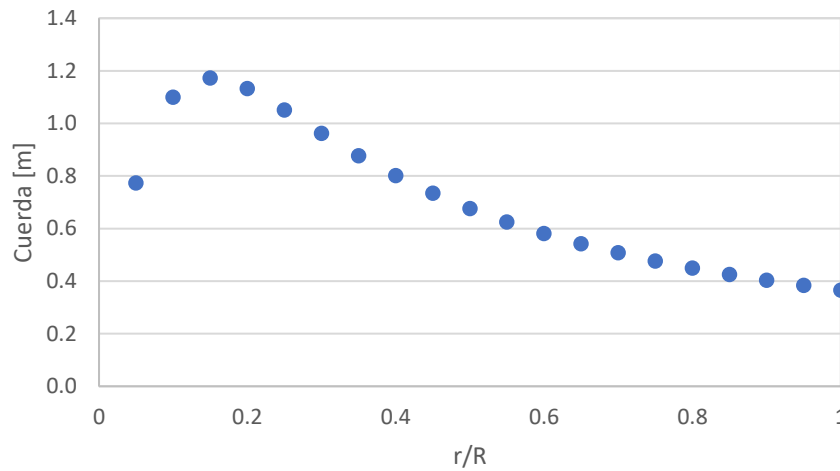
$$\phi = \frac{2}{3} \tan(1/\lambda_r) \quad (60)$$

Y largo de la cuerda según simplificado [25]

$$c = \frac{8 \pi r}{N C_l} (1 - \cos(\phi)) \quad (61)$$

Que al considerar el ángulo de ataque más eficiente del perfil alar y los valores de C_l en ese punto, tenemos que la pala optima preliminar tiene la forma de

Gráfico 18: Dimensión de la cuerda a lo largo de la pala



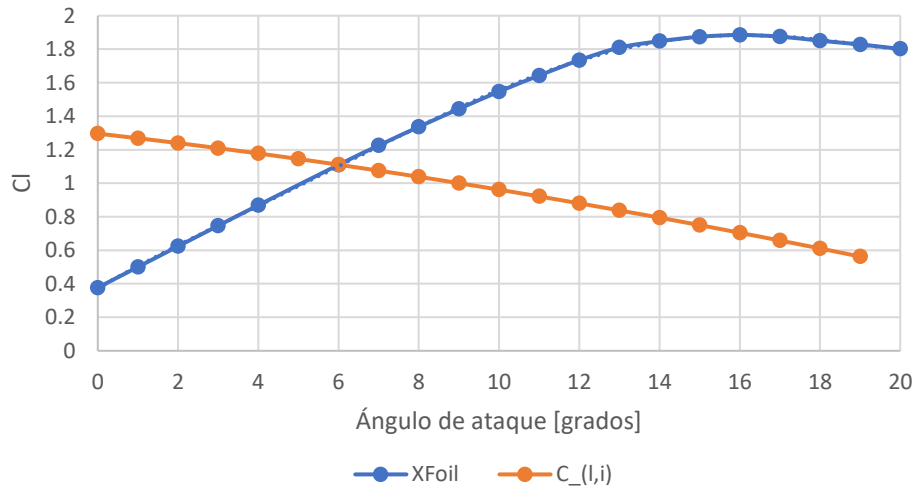
Los valores específicos de cada sección se presentan en la tabla (14) del anexo, con los valores esta tabla se realiza una comparación en cada sección r_i/R , comparando diferentes valores de ángulos de ataque para obtener el factor de pérdida de punta y $C_{l,i}$

$$C_{l,i} = 4F_{tip} \sin(\phi_i) \frac{(\cos(\phi_i) - \lambda_{r,i} \sin(\phi_i))}{\sigma_r (\sin(\phi_i) - \lambda_{r,i} \cos(\phi_i))} \quad (62)$$

Con cada función $C_{l,i}$ para cada sección, se compara con la función de C_l , para encontrar el punto de intersección y obtener el ángulo de ataque adecuado. En el gráfico 19 se puede apreciar esta comparación, utilizada en el 15% del radio de la pala

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

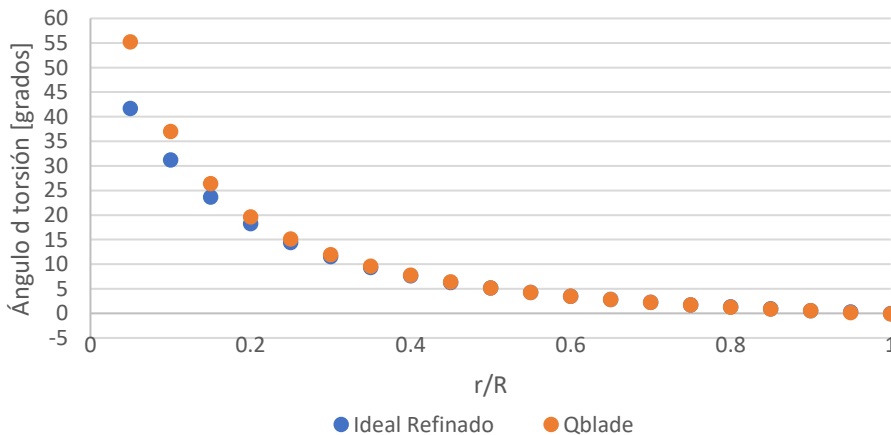
Gráfico 19: Coeficiente de sustentación y ecuación auxiliar en función al ángulo de ataque para el diseño de la pala
Fuente: Elaboración Propia



Con este nuevo ángulo de ataque se vuelve a encontrar el factor de pérdida de punta de la sección, y si este valor es lo suficientemente cercano al anterior, las medidas están aceptables. Si el valor es distinto, se vuelve a calcular un nuevo $C_{l,i}$ con este nuevo factor de pérdida y ángulo de ataque, comparando nuevamente con el gráfico de C_l . Repitiendo estos pasos hasta que la diferencia entre los factores de pérdida, y por lo tanto el coeficiente de sustentación, sea aceptable.

Después de los cálculos, se debe revisar que los valores de α no superen 0.4, para realizar una corrección de Glauret. Como este no es el caso, se procede a modelar la pala mediante el programa "Qblade", el cual nos entregara una pala optimizada que se comparara con estos resultados para verificar que estén dentro de los valores esperados.

Gráfico 20: Comparación ángulo de torsión a lo largo de la pala prueba

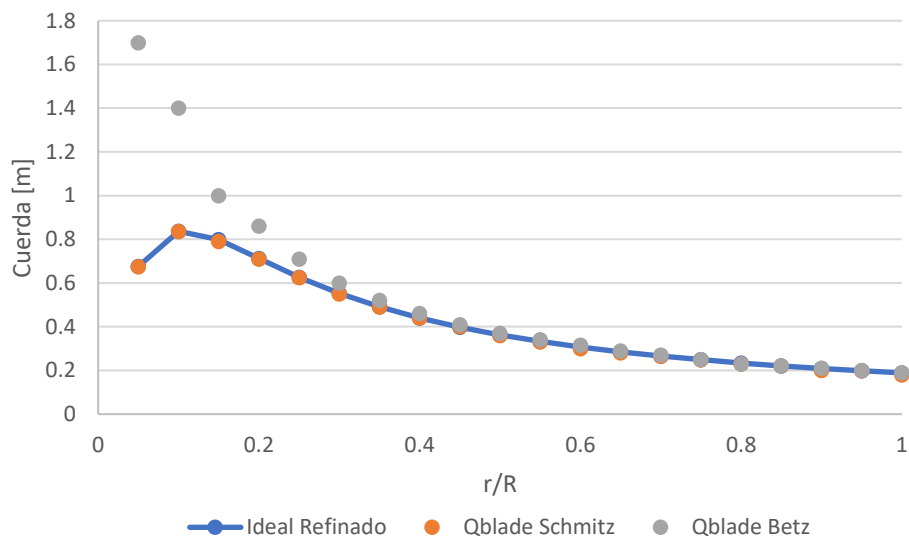


COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Como se puede apreciar, los valores de los ángulos de torsión son lo suficientemente parecidos como para poder utilizar el programa, teniendo una diferencia alta en la zona de la raíz, lo cual es esperable dado que, en la optimización, los valores de inducción de velocidad a son los mas bajos e inestables en el modelo, y como la raíz es considerada más como sustento estructural de la pala, no se refino la optimización en este sector en la metodología utilizada.

En cuanto a los largos de cuerda, ambos métodos obtienen resultados similares, en especial el método de Schmitz con el simplificado utilizado.

Gráfico 21: Comparación del Largo de cuerda a lo largo de la pala prueba



4.1.2 Modelamiento Palas del aerogenerador

Con la similitud de los resultados del diseño, las palas teóricas se modelarán mediante el programa Qblade. Una pala con el perfil alar DU-93-W-210 y otra con el perfil FFA-W3-211. Los parámetros de diseño a considerar son, el largo de la pala, la velocidad de punta y el número de Reynolds.

El largo de la pala aumenta la cantidad de energía eólica que se generara, dado que se está aumentando el área barrida en función al cuadrado del radio en la ecuación de potencia (40), pero aumentar el largo genera más complejidad en la simulación dado a los recursos requeridos para mallar esta geometría, es por esto que se modelara un largo de pala de 5.6 [m], que es un largo promedio de una pala de aerogenerador industrial en el mercado actual y cercano a la pala de validación Nrel VI.

La velocidad de punta es un tema más complejo, dado que al diseñar para una velocidad de punta específica, hay que tener en cuenta que esto no limita la velocidad de entrada, sino que la velocidad de giro según la velocidad de entrada.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Tabla 3: Cambio de velocidad de punta según la velocidad del viento

Velocidad de giro [rad/s]	Velocidad Viento [m/s]	Velocidad de punta λ
8.92	10	5.00
	8	6.25
	6	8.33
7.52	10	3.76
	8	4.70
	6	6.27
7.14	10	4.00
	8	5.00
	6	6.66

La velocidad de punta es inversamente proporcional a la velocidad del viento. Esta es una de las razones por la que se tienen aerogeneradores con velocidad de giro variables, para mantenerse en un rango de velocidad de giro optima con el aumento y disminución considerable de velocidades de viento.

Un alto valor de velocidad de punta hace que las dimensiones de la pala varíen considerablemente entre la raíz y la punta, volviendo difícil el mallado computacional. Tomando como ejemplo la pala del caso de validación, se utilizará una velocidad de punta que genere unas dimensiones parecidas, que mantenga las velocidades de punta sobre 4 a la velocidad considerada para la simulación. Esta velocidad de punta es 5 a una velocidad de viento de 8 [m/s] dado a que tiene geometría parecida y esta dentro del rango superior del promedio de velocidades, asegurando que a las velocidades promedio de la mayoría de los parques considerados, se está dentro de un rango de velocidad de punta más optimo, como se ve en la tabla 3.

El programa “Qblade” pide como entrada el número de Reynolds en el cual se estará evaluando el perfil alar, este número será el más representativo para el rango de números de Reynolds a lo largo de la pala según las velocidades relativas. tomando en cuenta el largo de la pala y la velocidad de giro en la velocidad de viento 8 [m/s], se tiene que el número de Reynolds de las palas debe estar alrededor de $9.0 \cdot 10^5$, a lo largo de esta. Con este numero se puede generar una estimación de las curvas de c_l/c_d mediante el programa “xfoil” dentro de “Qblade” y con ellas se obtiene el diseño y comportamiento ideal de la pala.

Con estos valores se procede a generar las palas simplificadas, esto quiere decir palas optimizadas que posteriormente se linealiza el cambio de la cuerda desde la primera a la quinta y desde la quinta hasta la última división, para simplificar la geometría, dado que una geometría muy compleja dificulta el mallado de la simulación. La cuerda más grande corresponde a la quinta sección y las más pequeña la última.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

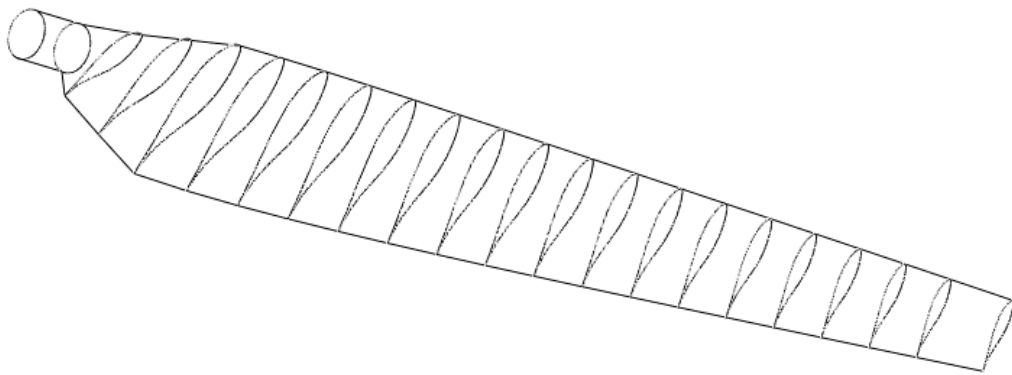


Ilustración 17: Pala formada con los perfiles alares FFA-W3-211

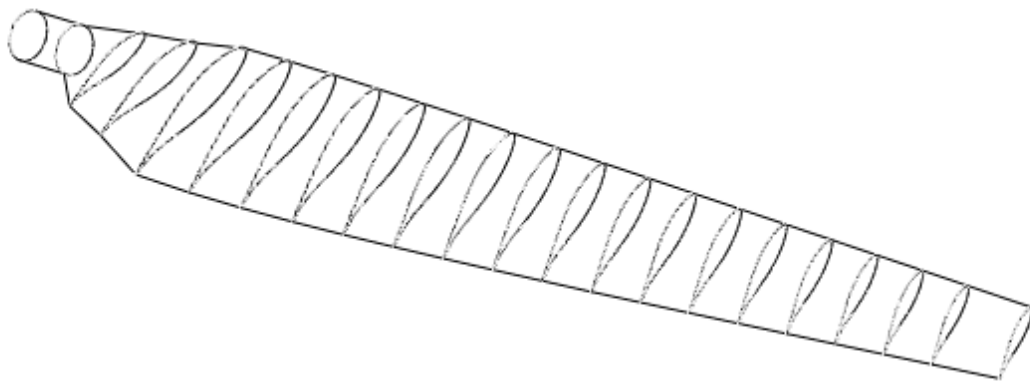


Ilustración 18: Pala formada con los perfiles alares DU-93-W-210

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

La diferencia específica entre estas dos palas simplificadas, aparte del perfil alar utilizado, son la torsión a lo largo de esta, modelados al ángulo de ataque óptimo según su perfil alar. En el anexo se adjuntan tablas con las cuerdas y ángulos de torsión de estas palas.

4.2 Modelamiento Pala Nrel Fase VI

La pala que se utilizara para la validación del código CFD es la pala del experimento de aerodinámica fase VI, un experimento que consiste en analizar un aerogenerador de eje horizontal en un túnel de viento y a la intemperie a distintas velocidades de viento, direcciones de viento y ángulo de “*pitch*”. La estructura de la pala, las configuraciones del experimento, y resultados de presión, velocidad y coeficiente de presión están catalogados en informes de libre acceso, uno público que contiene la información general [28] y otro a pedido que contiene los resultados numéricos.



Ilustración 19: Pala formada con los perfiles S809, del experimento Nrel fase VI

Se simulará la configuración básica aguas abajo, con un pitch de 0 [28].

- La velocidad del viento será de 10[m/s]
- La potencia que se genera a esta velocidad es de 9.7 [kW]
- El radio es de 5.029 [m]
- Numero de palas, N= 2
- Velocidad de giro 72.1 [RPM]

Esta configuración se eligió por su cercanía a los valores de simulación del viento y porque presenta dos comportamientos de interés para la evaluación de la simulación. Para esta velocidad, los perfiles alares de la base inciden con el viento relativo a un ángulo de ataque mayor al óptimo, por lo que ocurre un leve desprendimiento de la capa límite en esta sección. Los perfiles alares de la sección de la punta coinciden de manera más óptima debido a la predominancia de la velocidad de giro, en este rango no ocurre mayor desprendimiento de la capa límite. Con estos dos comportamientos, se podrá comparar en las simulaciones posteriores las secciones con desprendimiento y las sin desprendimiento según los resultados de la validación.

CAPÍTULO 5: VALIDACION Y SISTEMA COMPUTACIONAL

5.1 OPENFOAM

Las simulaciones realizadas en este estudio se realizan en el software de código abierto OpenFOAM, Open Field Operation And Manipulation, versión 7. Una herramienta gratuita de recursos abiertos que permite realizar las simulaciones CFD con resultados competitivos respecto a las alternativas del mercado. OpenFOAM es una librería C++ que crea aplicaciones, su código abierto permite que cualquier usuario pueda entrar a modificar el programa para que este se adapte a sus necesidades específicas [13].

La herramienta OpenFOAM incluye los tres elementos principales de un programa de CFD

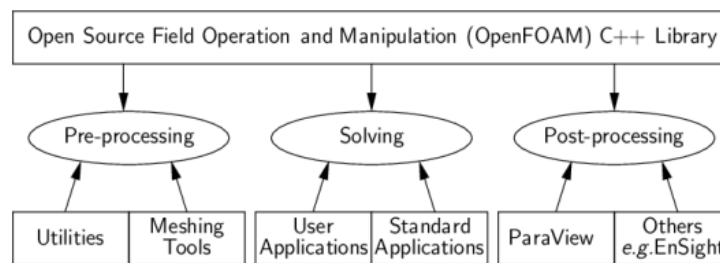


Ilustración 20: Información General del sistema OpenFOAM [13]

Un caso genérico de OpenFOAM contiene tres carpetas que detallan la simulación.

- Sistema (system)
- Constantes (constant)
- Condiciones iniciales (0)

Las condiciones iniciales son parte del directorio de tiempo, que es básicamente donde se leen y guardan las condiciones del mallado general y las condiciones de borde para un tiempo particular, siendo **0** las condiciones en el sistema en el tiempo 0 (en el caso estacionario, es la iteración 0).

Constantes es donde se guardan los archivos de constantes como: la viscosidad cinemática, la turbulencia a modelar y los cuerpos utilizados en el mallado.

En **Sistema** están las especificaciones de cómo se correrá la simulación, los archivos más importantes son “**controlDict**”, “**fvSchemes**” y “**fvSolutions**”. Estos serán detallados más adelante.

5.1.1: Sistema de Mallado

Comenzando con la generación de la malla, OpenFOAM tiene un archivo de texto llamado “**blockMeshDict**” con el cual se especifica como se quiere realizar un mallado general del

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

dominio computacional, en este se pueden generar estructuras geométricas simples y/o complejas, de mallado hexagonal. En este proceso se definen las dimensiones generales del mallado.

Con el dominio general establecido, se puede utilizar la herramienta de mallado para cuerpos tridimensionales de OpenFOAM, “**snappyHexMeshDict**”. Esta aplicación se ubica dentro de la carpeta sistema y necesita de entrada un dominio de mallado previo como uno generado con “**blockMesh**”. Además, se puede utilizar una geometría en formato “**stl**” o “**obj**” tratada con el archivo “**surfaceFeaturesDict**” para realizar un mallado alrededor o dentro de esta geometría.

SnappyHexMesh realiza 3 funciones generales:

- “**castellatedMeshControl**” es donde se definen los parámetros de el/los objeto(s) al dominio computacional.

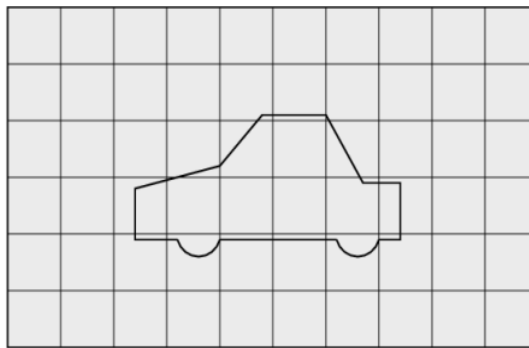


Ilustración 21: Mallado y objeto
Fuente: OpenFOAM User Guide [13]

Después, refina el mallado utilizando las intersecciones de las geometrías de entrada con el mallado según las especificaciones del usuario. En esta misma sección se pueden generar áreas de refinamiento en donde se refina el mallado dentro de un objeto ya definido.

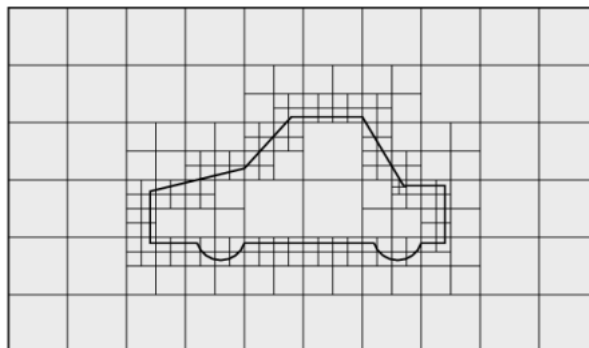


Ilustración 22: Malla refinada en los bordes del objeto
Fuente: OpenFOAM User Guide [13]

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Finalmente, se seleccionan coordenadas dentro del mallado que definen, según las intersecciones de los objetos refinados, cuales secciones de la malla deben ser eliminados dado que representan volumen no deseado dentro del mallado.

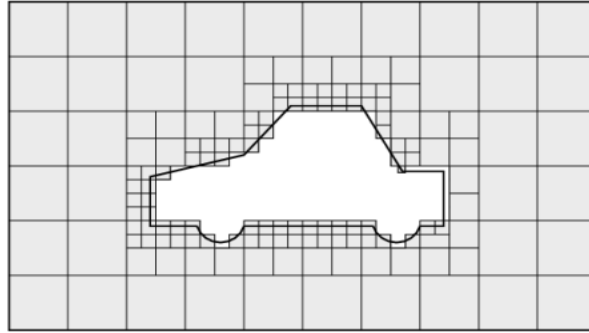


Ilustración 23: Mallado con el volumen extraído
Fuente: OpenFOAM User Guide [13]

- “**snapControl**” Amolda los contornos del mallado a la(s) superficie(s) de el/los objeto(s) agregados según las especificaciones del usuario.

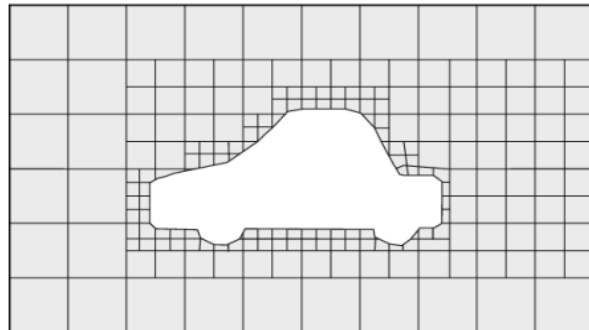


Ilustración 24: Mallado moldeado al objeto
Fuente: OpenFOAM User Guide [13]

- “**addLayerControl**” Modifica el mallado ya refinado cercano a la superficie de el/los objeto(s) seleccionados en subcapas según especificaciones del usuario

La manera en que “**snappyHexMesh**” refina el mallado es separando el mallado original en partes iguales.

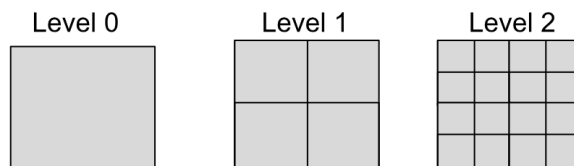


Ilustración 25: Niveles de refinamiento
Fuente: OpenFOAM User Guide [13]

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

De esta manera un nivel de refinado 0 es el mallado original, en el caso tridimensional nivel 1 divide la celda en 8 partes iguales (2^3) cuyas dimensiones son la mitad del mallado original, nivel 2 serían 2^6 celdas, de esta manera la cantidad de celdas incrementa 2^{3*N} del nivel original, siendo N el nivel de refinamiento.

Para importar la geometría de la pala modelada en Qblade, se debe crear una carpeta en constantes llamada "trisurface" y guardar en ella la geometría. Después exportarla con la aplicación "**surfaceFeatureExtract**" para guardar la geometría como un "emesh", que es el formato que es compatible en "**snappyHexMesh**".

5.2 Configuración a utilizar

El mallado fueron trabajadas en un computador personal de 4 "cores" y 8 gigabytes de memoria "RAM". Las simulaciones son realizadas en una computadora de 32 "cores" cuyo uso se dividía entre proyectos de memoria y magister.

Para realizar la simulación, se debe escoger una metodología de modelamiento para abordar el problema, una base en la cual armar el caso a simular. Las palas de aerogeneradores son geometrías bastante complejas, y como se desea comparar las palas individuales, puede sonar tentativo una simulación estática con solo una pala. Pero como la pala está diseñada para que la velocidad a la cual se enfrenta depende del radio de esta, sumando la velocidad del giro con la velocidad del viento (al estar en su punto de operación óptima), implementar un sistema que varía la velocidad de entrada se vuelve una complejidad mayor dado que no existen casos similares.

Una segunda configuración considerada fue la de utilizar un volumen cilíndrico, separándolo en n , subdominios en donde n es la cantidad de palas del aerogenerador y utilizar una referencia giratoria (Single Reference Frame) para simular el giro de la pala, simplificando el ingreso de condiciones iniciales a la velocidad del viento y la velocidad con la que gira el aerogenerador. Al simular solo uno de esos n dominios, utilizando fronteras cíclicas, se ahorrarían recursos computacionales. Usando de base el caso Rotor2D y Mixer.

Lamentablemente OpenFOAM el mallado "SnappyHexMesh" tiene problemas al refinar una malla cuadrada a una semicilíndrica con las dimensiones utilizadas, después de varios intentos, a continuación, se presenta uno de los mejores resultados obtenidos.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

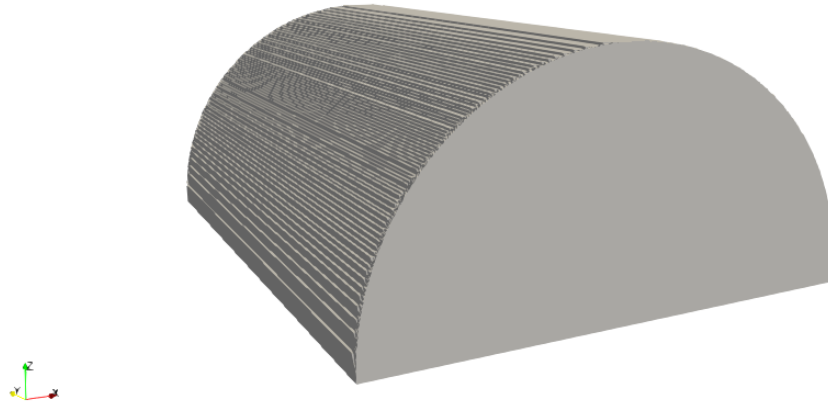


Ilustración 26: SnappyHexMesh de un volumen semi cilíndrico

Como se complicó realizar este tipo de mallados, se separó el dominio en 4, un sector central en el cual el mallado sería normal y tres dominios que se deformarían según la curva deseada

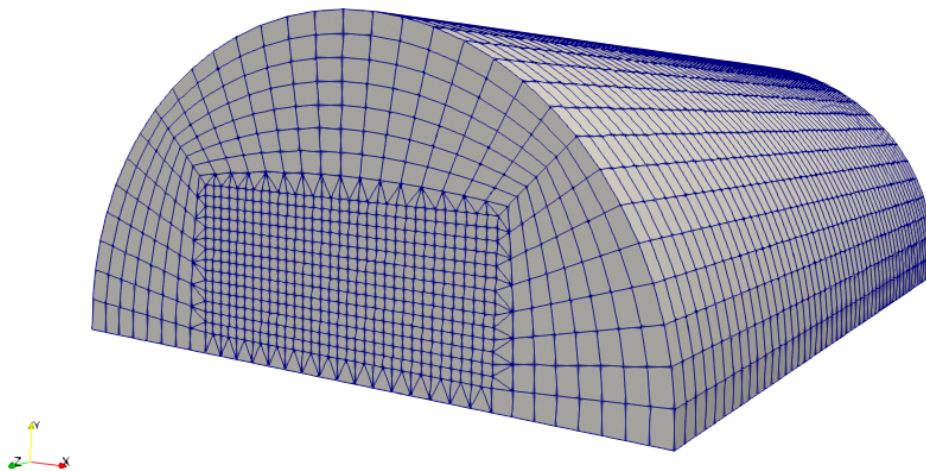
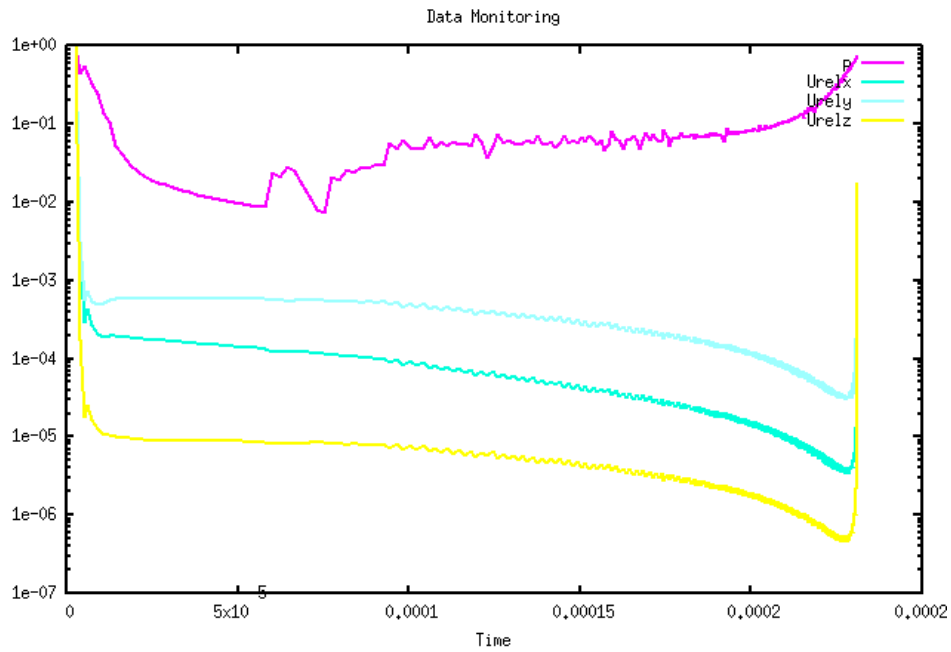


Ilustración 27: Mallado utilizando 4 regiones en “blockmesh”.

Al realizar simulaciones prueba se encuentra que los valores de presión divergían pasado cierto tiempo de simulación.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Gráfico 22: Residuales de la simulación, Valores residuales vs Tiempo



Se cree que el problema podría ser el mallado, en especial porque no se logra afinar el mallado con “*addlayers*” para estar dentro del rango de y^+ alrededor de 10. Como alternativa se realiza un mallado con *ANSYS Fluent*, que genera un mallado piramidal con las mismas dimensiones generales.

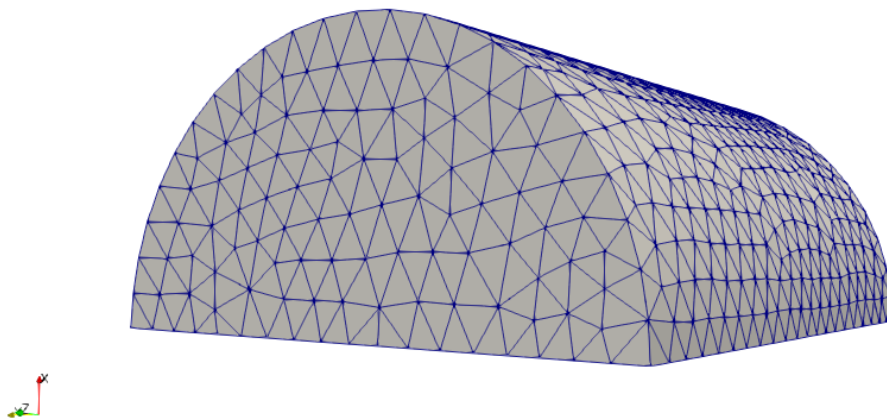


Ilustración 28: Mallado sin estructura “unstructured” del semicilindro

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Este mallado también presenta problemas en la creación del mallado alrededor de la pala, los recursos computacionales no eran los suficientes para crear las capas de inflación necesarias. Para simplificar el mallado, se realiza una capa de inflación pequeña para probar la simulación, pero también surgen problemas de estabilidad.

Se busco casos de simulación con problemas similares en el foro "*CFD-online.com*" en donde se encontró con que casos similares presentan errores de estabilidad, problemas con los valores de presión resultantes y dificultades con importación de mallados de otros programas. Sugerencias de usuarios atribuían esta inestabilidad a la condición de borde cíclico "*cyclic*" y "*cyclicAMI*", en especial cuando se importaba el mallado debido a como OpenFOAM organiza la numeración de elementos del mallado. Al realizar un análisis del mallado "*unstructured*" de ANSYS, se encontró que un número importante de elementos cercano a la pala tenían valores de oblicuidad "*skewness*" no aceptables y calidad ortogonal "*orthogonal-Quality*" problemáticos, los cuales son propensos a originar problemas en la simulación. Como el programa ANSYS utilizaba el sistema operativo Windows y OpenFOAM corre de manera estable en Ubuntu, el modificar el mallado e importarlo se vuelve un proceso muy complejo y tedioso, por lo que se decide mantener el caso a los recursos de OpenFOAM en Ubuntu, dado que es en este sistema en el cual se realizan las simulaciones.

Cabe mencionar que existe un recurso para facilitar el mallado de aerogeneradores para su simulación en OpenFOAM llamado "*BladeBlockmesher*" y "*WindTurbineMesher*" de Fraunhofer IWES [27] las cuales utilizaban un algoritmo avanzado para realizar el mallado complejo con los valores de perfiles alares a lo largo de la pala, pero su utilización no es publica o de libre acceso.

Debido a las dificultades de implementación de este segundo modelo, se decidió tratar la simulación con una tercera configuración basada en el tutorial "*Impeller*" y "*Propeller*" complementado con casos tutoriales proporcionados públicamente el 3 de marzo de 2020 por Eduardo M. Fírvida [26] de turbinas eólicas que incluyen el caso NREL VI (el cual presenta la pala al revés del flujo del viento, el mallado esta poco optimizado y debe corregirse su viscosidad cinemática).

Esta última configuración resulto en un mallado que simula un túnel de viento donde las palas del aerogenerador y el eje central se encuentran rotando, a continuación se presentan las dimensiones generales de la malla utilizada en la simulación

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

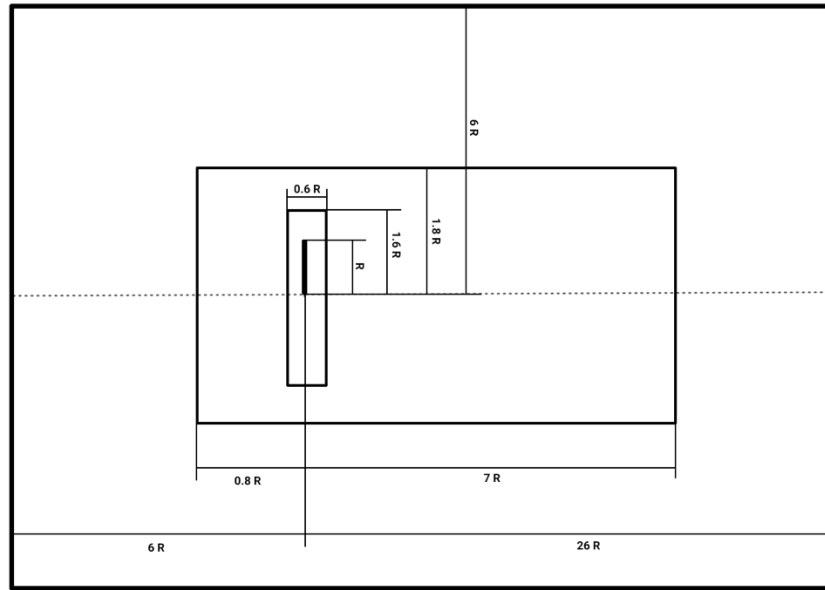


Ilustración 29: Dimensiones generales del dominio computacional
Fuente: Elaboración Propia

Esta malla consiste de un bloque rectangular que representa el túnel de viento, una sección rectangular media de refinamiento de mallado y un disco dentro de este que representa el dominio giratorio de la malla y en donde se ubican las palas.

La cara de la izquierda del mallado principal corresponde al “inlet” y su cara opuesta al “outlet”, por donde ingresa y sale el flujo de aire, respectivamente. Las demás caras de rectángulo principal corresponden a murallas.

Para asegurarse de captar las condiciones aerodinámicas de un flujo desarrollado sin que le afecte las murallas del dominio computacional, se toma el radio de la pala como referencia y se sitúa el “inlet” a 6 radios de distancia, junto con las paredes y el “outlet” a 26 radios de distancia. Estos valores son los utilizados por el caso tutorial base [26].

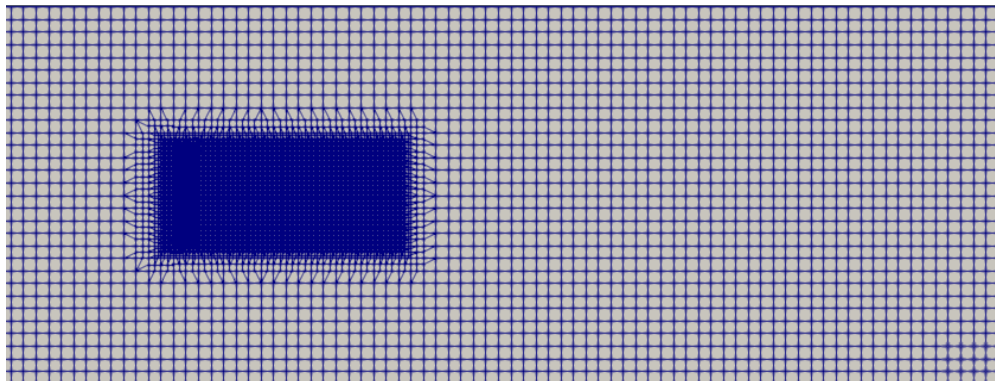


Ilustración 30: Corte lateral del mallado del dominio computacional
Fuente: Caso Nrel VI [26]

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

En “SnappyHexMesh”, se realizó un refinamiento de la malla antes y después de la pala, envolviendo el volumen giratorio, con el fin de suavizar la transición de volúmenes grandes a pequeñas dentro del dominio computacional.

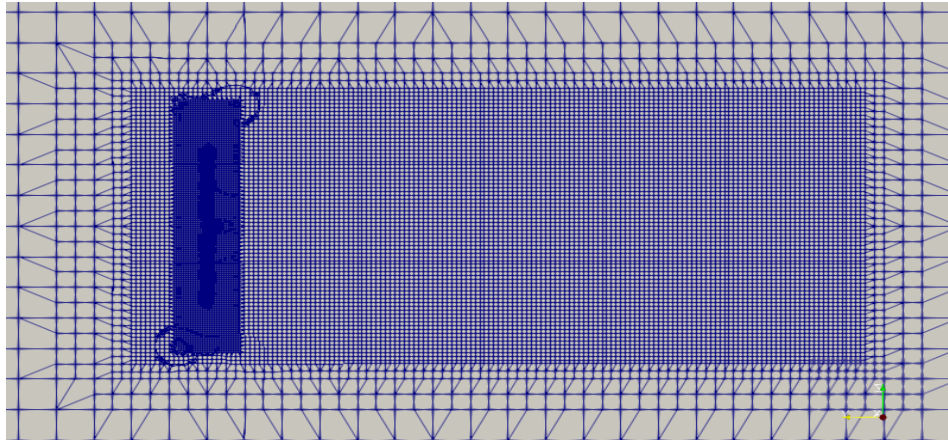


Ilustración 31: Ampliación del volumen refinado, vista lateral
Fuente: Caso Nrel VI [26]

Dentro de este mado esta el área de mado cilíndrica que simula el movimiento giratorio de las palas, teniendo una zona del mado estática y una en movimiento.

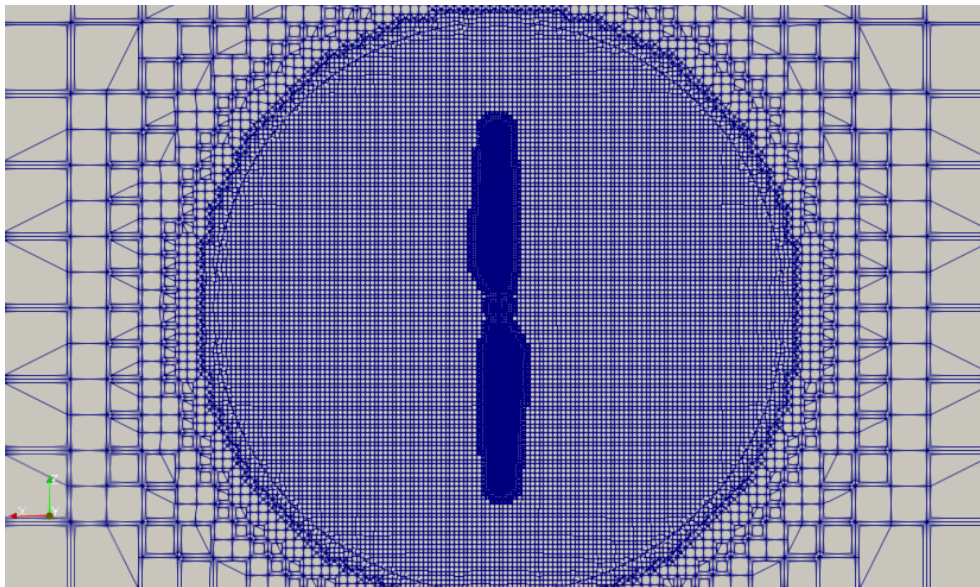


Ilustración 32: Imagen del interfaz de mado arbitraria, vista frontal
Fuente: Caso Nrel VI [26]

El interior del borde circular es un interfaz de mado arbitraria (*Arbitrary Mesh Interface*) utilizado para simulaciones que contienen dominios de malla desconectados pero adyacentes. Para este caso particular se utiliza una condición de frontera cíclica “**cyclicAMI**” en donde se define los bordes estáticos y deben especificarse la cara principal (*master*) y la

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

dependiente (*slave*). Las caras se comunican entre si mediante interpolación. Las caras “*interfasadas*” usan contribuciones de las caras vecinas llamadas pesos (weights), que son fracciones del área intersectada. La suma de todos estos pesos debe sumar 1 para evitar errores de continuidad, aunque es sugerido que valores cercanos a 1 resultan en errores muy pequeños.

El archivo encargado de asignarle las propiedades rotativas y el tratamiento de las celdas entre las zonas rotativas y estáticas se encuentra en constantes, llamado “**dynamicMotionSolverFvMesh**” este movimiento se calcula basándose en las presiones de las caras borde entre las zonas, modificando las condiciones de frontera de velocidad dentro de estas para asignare el deseado movimiento, en este caso, rotatorio.

5.3 Condiciones de Borde

Las condiciones de borde se asignan en cada valor en la carpeta 0. En cada iteración, OpenFOAM creara una nueva carpeta, asignándole el tiempo o iteración, que tomara como base estas condiciones para los bordes del dominio computacional. A continuación, se presentan las condiciones de borde utilizadas:

Tabla 4: Condiciones de Borde Generales

Superficie	Propiedad	Condición	Valor
Inlet	U	Dirichlet	10 [m/s]
	p	Neumann	-[m ² /s ²]
	Nut	Calculado	0 [m ² /s]
	K	Dirichlet	0.375 [m ² /s ²]
	Epsilon	Dirichlet	1 [m ² /s ³]
Outlet	U	Inicial	0 [m/s]
	p	Dirichlet	0[m ² /s ²]
	Nut	Calculado	0 [m ² /s]
	K	Inlet/Outlet	0.4 [m ² /s ²]
	Epsilon	Inlet/Outlet	1 [m ² /s ³]
Murallas	U	(*)	0 [m/s]
	p	Neumann	-[m ² /s ²]
	Nut	nutWallFunction	- [m ² /s]
	K	kWallFunction	- [m ² /s ²]
	Epsilon	eWallFunction	- [m ² /s ³]

(*)La Velocidad U de las murallas tiene 2 condiciones de borde:

- ◇ El eje y las palas tienen una condición de borde de muralla en movimiento, especificando los valores de velocidad en 0, dejando una condición de no deslizamiento (no slip).
- ◇ Las murallas correspondientes al túnel de viento tienen una condición de deslizamiento llamada slip, que toma un valor de velocidad 0 en la dirección normal y gradiente cero en la dirección tangencial.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Las condiciones utilizadas son:

- Dirichlet: Se le especifica un valor fijo constante como solución de una ecuación ubicada en alguna frontera
- Neumann: Se le asigna un valor fijo a la derivada de una propiedad normal a la frontera, en esta simulación este valor fijo es gradiente cero para todas las condiciones de Neumann

$$\frac{d\phi}{d\vec{n}} = 0$$

- WallFunction: Son funciones de pared que, según el valor de y^+ , modelan el comportamiento de las regiones de la capa límite turbulenta, según variable.
- Inlet/Outlet: es una condición de borde que cambia entre Neumann y Dirichlet según le vector de velocidad y la normal del dominio.
- Calculado: Esta condición define que su valor depende de las demás condiciones de borde.

Los valores de k y ϵ a utilizar se calculan mediante las ecuaciones 48 y 49 y estimando el largo característico con la ecuación 24 o 24.1.

5.4 Esquemas de Discretización

Los esquemas de discretización utilizados en el programa OpenFOAM están ubicados en la carpeta sistema, bajo “fvSchemes”. Los esquemas de discretización utilizados al comienzo son:

Tabla 5: Esquemas de discretización utilizados

Termino	Esquema Utilizado
Temporal	$\frac{d}{dt}(\phi)$ Euler Implicit
Gradiente	$\nabla \bar{C}$ cellLimited Gauss linear
	∇p Gauss Linear
	∇v_t Gauss Linear
Divergente	$\nabla \cdot U$ Gauss linearUpwind grad(U)
	$\nabla \cdot v_t$ Gauss linear
	$\nabla \cdot (k, \epsilon)$ Gauss upwind
Laplaciano	∇^2 Gauss linear limited corrected
Interpolación	(*) Linear

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Gradiente Normal a Superficie	$n \cdot$	Limited corrected
-------------------------------	-----------	-------------------

(*) La interpolación relaciona el valor del centro de una celda con las caras de esta.

Los esquemas utilizados en el programa OpenFOAM tienen las siguientes condiciones:

- Euler Implicit: Esquema de primer orden implícito y condicionalmente estable
- Gauss Linear: Esquema de diferencia centradas, de segundo orden.
- cellLimited Gauss Linear: Esquema que Gauss linear que limita el valor del gradiente para que el valor de la superficie de la celda este dentro de los valores máximos y mínimos de las celdas con las que se relaciona.
- Gauss Upwind: Esquema aguas arriba, esquema de primer orden
- Gauss Linear Upwind grad(U): Esquema Gauss Upwind con una corrección explícita basada el en gradiente local.
- Gauss Linear Limited Corrected: Esquema de Gauss linear que realiza una corrección de celdas no-ortogonales cuando esta es inferior a la mitad de la parte ortogonal.
- Linear: Interpola los valores del centro de una celda con la cara de forma lineal.

5.5 “Solvers” de OpenFOAM

OpenFOAM no tiene un solo código genérico para resolver las ecuaciones gobernantes de toda situación, sino que separa los casos según las condiciones del problema que se quiere resolver y de esta manera, utiliza un código específico para resolver el problema. En particular, el código que se utiliza es “PimpleFoam”, que contiene el algoritmo de acoplamiento presión-velocidad PIMPLE, ya que el caso evaluado es un flujo newtoniano turbulento, *transiente* e incompresible en una malla que se mueve.

Por otro lado, en la carpeta sistema, se tiene el archivo de texto “fvSolutions” en el cual se encuentran los métodos que tratan las ecuaciones *discretizadas* para resolver el conjunto de ecuaciones lineales, que es abreviado a “*solver*”, que no se debe confundir con la aplicación Solver, que se vio anteriormente, aunque en este archivo se debe especificar que aplicación Solver se utilizara. Los “*Lineal Solvers*” utilizados en este archivo son:

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Tabla 6: Configuración del documento “fvSolvers”

Solver Utilizado	Variables	Especificación
PCG Preconditioned (bi)- Conjugate gradient	Presión (p)	Precondicionador DIC
	Campo se flujo Superficial (Phi)	
SmoothSolver	Velocidad (U)	Suavizador symGaussSeidel
	Energía cinética turbulenta (k)	
	Épsilon (ϵ)	

5.6 Control General de la Simulación

En la carpeta sistema, hay un archivo de texto llamado “*controlDict*” en donde se establece a grandes rasgos:

- Con que aplicación se resolverá el problema (PimpleFoam)
- Cuanto tiempo o iteraciones simular,
- El paso temporal
- Cada cuanto guardar la información de la simulación y en que formato
- Máximo número de Courant deseado, limitando el paso temporal
- Funciones extra que se desean agregar al código para el pos-procesamiento

5.7 Validación Mallado

Para validar la independencia de malla, que los valores no se vean influenciados por el mallado, dentro de lo factible, se realiza un estudio de independencia de malla comparando resultados experimentales del experimento de el aerogenerador Nrel VI con los de la simulación y a diferentes mallados y tiempos de simulación para validar la simulación.

Las condiciones de la simulación a considerar son, una velocidad de rotación de 72 [RPM], una densidad de 1.246 [kg/m^3] y una viscosidad de $1.769E - 5$ [$kg \cdot m/s$], Utilizando el modelo k-epsilon, y en caso de llegar a un nivel de y^+ general menor a 30 se considera cambiar al modelo SST k-omega.

Al tomar como base los casos de OpenFOAM mencionados, se realiza primero una comparación de los resultados a lo largo de la pala a diferentes números de Courant, dado que el caso base tutorial tiene un número muy alto de 9. En casos específicos, el modelo “PimpleFoam” utilizado ha podido llegar a soluciones validas utilizando un paso temporal más alto, un numero de Courant mayor a uno, pero para ello se debe utilizar una cantidad de correctores alto en las iteraciones PISO y PIMPLE junto con un factor de relajación en la parte SIMPLE del algoritmo, y esto no asegura a que numero de Courant mayor que uno las soluciones se vuelven estables o validas [31].

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

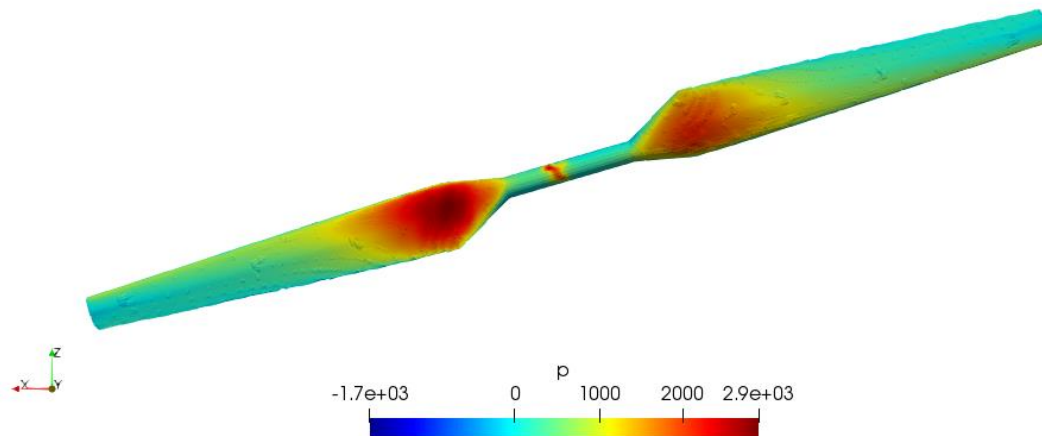


Ilustración 33: Presión en las palas Nrel VI, simulación de Courant 9, 15 segundos simulados

En este caso, después de 15 segundos simulados, existe una concentración de presión en una de las palas y el eje central, cuando teórica y experimentalmente la mayor presión se debe presentar en los bordes de ataque, a lo largo de la pala. Estos problemas no se presentan al realizar una simulación con Courant menor a 1.

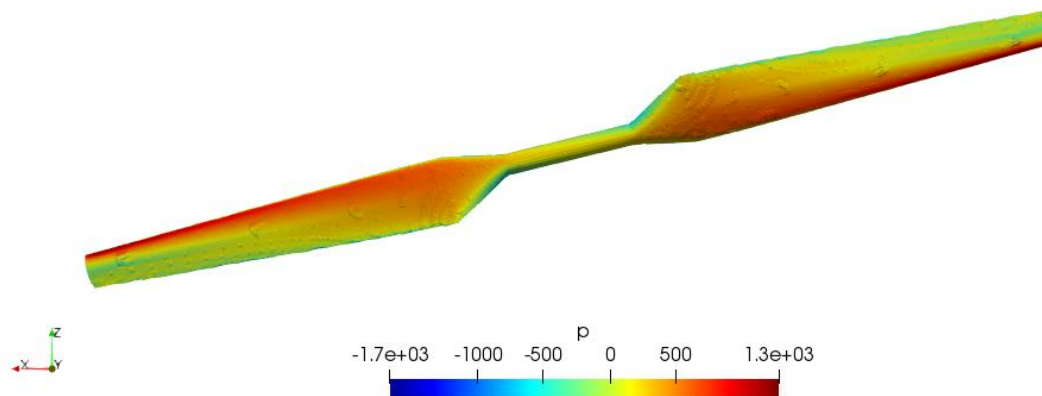


Ilustración 34: Presión de las palas Nrel VI, simulación Courant 0.9, 15 segundos simulados

Si se reduce el número de Courant aún más se pueden esperar mejores resultados, pero el tiempo de simulación aumenta considerablemente, por lo que, teniendo en cuenta que “PimpleFoam” permite utilizar número más grandes de Courant, se usara el resultado de 0.9 para las siguientes pruebas.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Las palas malladas con las condiciones base [26] tienen imperfecciones en la superficie por la configuración utilizada de “SnappyHexMesh”. Esta configuración se modificó para reducir el número de iteraciones de corrección y se optimizó para que barrieran la pala de forma más suave, siendo más riguroso en la calidad del mallado, resultando en una pala con mínimas imperfecciones en el borde de fuga y la punta de la pala, cuyos resultados de simulación son más cercanos al comportamiento esperado.

Gráfico 23: Presión a lo largo del perfil alar al 30% de la pala

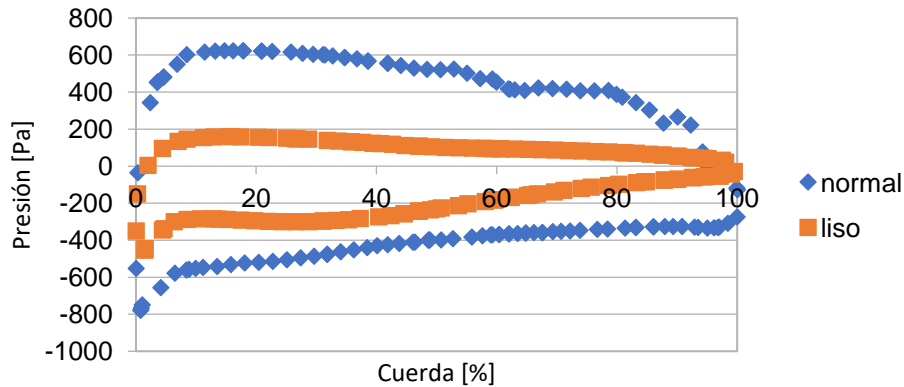
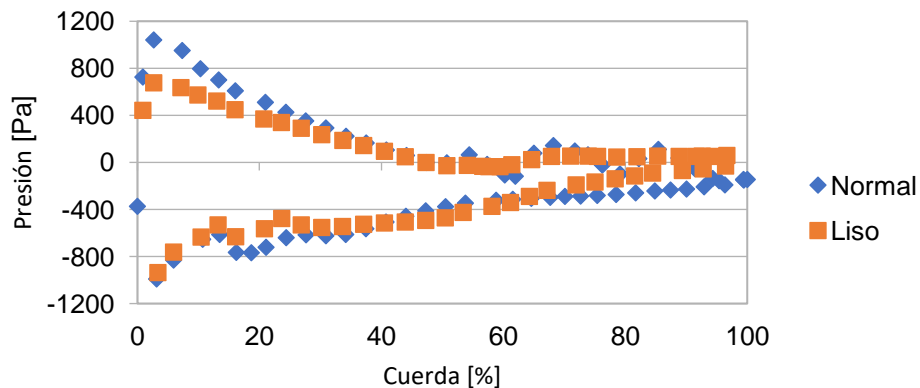


Gráfico 24: Presión a lo largo del perfil alar al 80% de la pala



Con el mallado de la superficie y el número de Courant fijados, se realiza un estudio de tiempo de simulación, para encontrar cuanto tiempo se debe simular para tener resultados estables. Primero se revisa las simulaciones anteriores para revisar en que tiempos se estabilizaron los valores residuales de la simulación, que ocurre pasado los 1.5 segundos. Tomando este como el tiempo base, se compara los resultados de presión pasado un 10% mínimo sobre este tiempo para tener un margen de estabilidad. Los tiempos que se evaluaron serán los más cercanos a 2, 4 y 8 segundos.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Gráfico 25: Valores de presión a lo largo de la cuerda a 30% de la pala

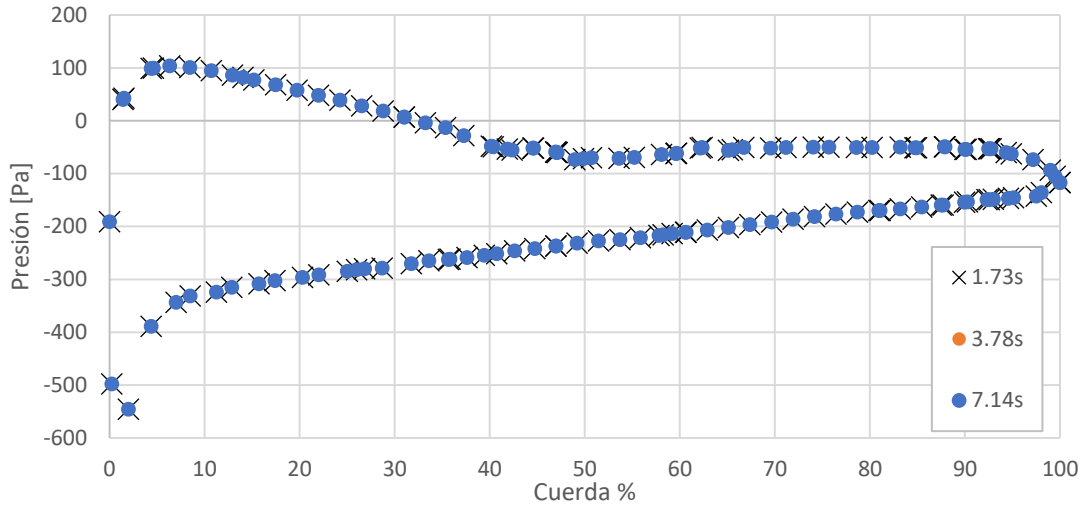
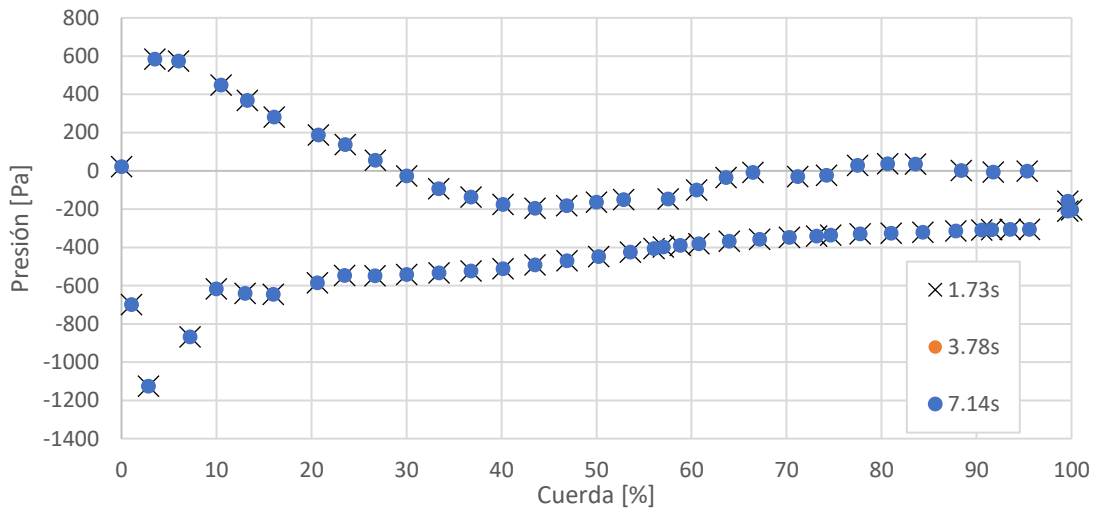


Gráfico 26: Valores de presión a lo largo de la cuerda a 80% de la pala



Como se aprecia en el gráfico 25 y 26, los valores de presión a lo largo de la pala se estabilizan y no cambian significativamente cercano a los dos segundos simulados. En las próximas simulaciones solo se simula hasta llegar a los dos segundos de simulación.

Las simulaciones hasta ahora han sido computacionalmente pesadas, por lo que se simula y refina solo una pala girando para poder reducir los elementos de la malla lo más posible. Se realizó una simulación prueba para verificar que el simular solo una pala no afectara los resultados y se encontró que los resultados eran idénticos a los gráficos 25 y 26.

Con el estudio de tiempo a simular completado, se entra al estudio del refinamiento del mallado, se realizan simulaciones con mallados más finos para tratar de llegar a resultados óptimos.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Tabla 7: Tiempos de simulación utilizando 10 cores.

	Nivel de refinamiento	Tiempo de simulación
Simulación Base	7	9 días
Simulación Fina	8	30 días

El mallado nivel 8 es el máximo que se puede afinar con los recursos computacionales disponibles, pero para llegar a valores óptimos de y^+ , se debe refinar aún más la sección alrededor de la pala, entrando ahora a agregar capas alrededor de esta mediante “addlayers” de “SnappyHexMesh”. A este nivel de refinamiento la generación de capas no barre de la misma forma la superficie, dejando cambios bruscos en el mallado que pueden generar problemas en la estabilidad de la simulación y resultados.

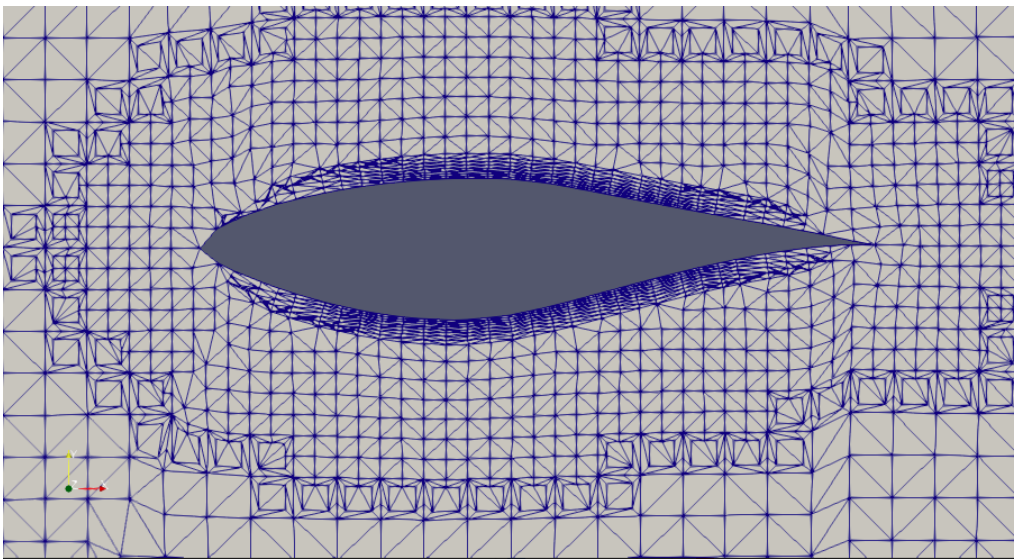


Ilustración 35: Mallado de una sección correspondiente 60% de la pala con capas agregadas, refinamiento 7, expansión de capas 1.2.

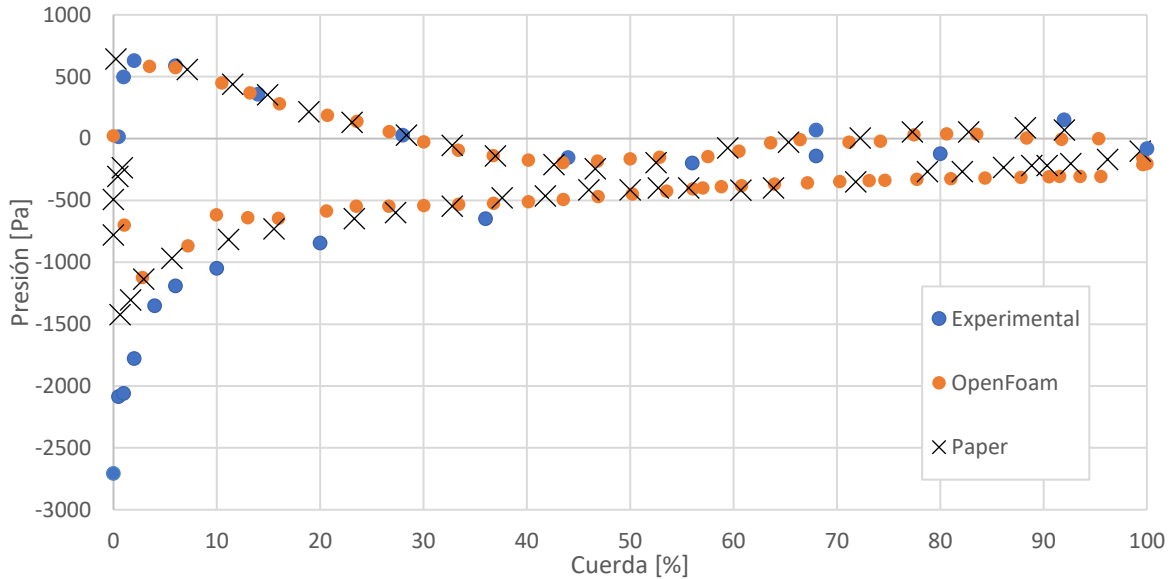
Este problema ocurre en al menos un 5% de la pala, en el caso de refinamiento 8 y un 10% en el refinamiento 7. Las condiciones en que la pala llega a un 95% de capas agregadas es muy sensible a cambios y no es confiable para cuando se introduzcan las geometrías de las palas que se quiere simular.

Para verificar si se presentan problemas en este tipo de mallados se corre una simulación con 5 capas a una inflación de 1.2, en un mallado de refinamiento 8 pero, esta simulación no termino de correr ya que tomo 3 semanas en llegar a 0.7[s] de tiempo simulado con resultados no concluyentes. Debido a esto, se descarta la posibilidad de utilizar los modelos k-omega y se realiza una sola capa de inflación para amoldar el mallado a la forma de la pala en su cercanía para realizar una simulación del comportamiento cualitativo. Dejando el mallado en 7 para los resultados cuantitativos dado que el nivel 8 toma demasiados recursos simular.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Debido al requerimiento computacional de la simulación hasta al momento, sumado al recurso temporal disponible, se compara la simulación propia con una simulación realizada en la universidad de Massachusetts, en un paper llamado “*Simulación CFD del Flujo Alrededor de la Turbina Eólica Nrel Fase VI*” [29] para cuantificar la diferencia entre los resultados obtenidos con los de una simulación en condiciones similares, pero más refinada.

Gráfico 27: Valores de presión a lo largo de la cuerda de la pala al 80%



La simulación propia en OpenFOAM contiene 3.3 millones de celdas, sin capas y funciones de pared, mientras que la del paper con el que se compara en el gráfico 27 tiene 4 millones de celdas con un $y+$ menor a 5 sin funciones de pared. Comparando estos resultados con los experimentales, notamos que se comportan de manera similar, siendo casi los mismos los valores del paper con los de la simulación OpenFOAM. En el paper [29] se realiza una simulación más robusta de 6.3 millones de celdas que se acercan aún más a los resultados, con los cuales se calcula el torque de las palas para esta velocidad, 10[m/s].

Tabla 8: Torque generado y error respecto simulación propia en OpenFOAM

	Torque [N*m]	Error [%]
OpenFOAM	1033.79	-
CFD Paper	1128.48	8.39
Experimental	1282.08	19.86

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Tabla 9: Empuje generado en las palas y error respecto simulación OpenFOAM

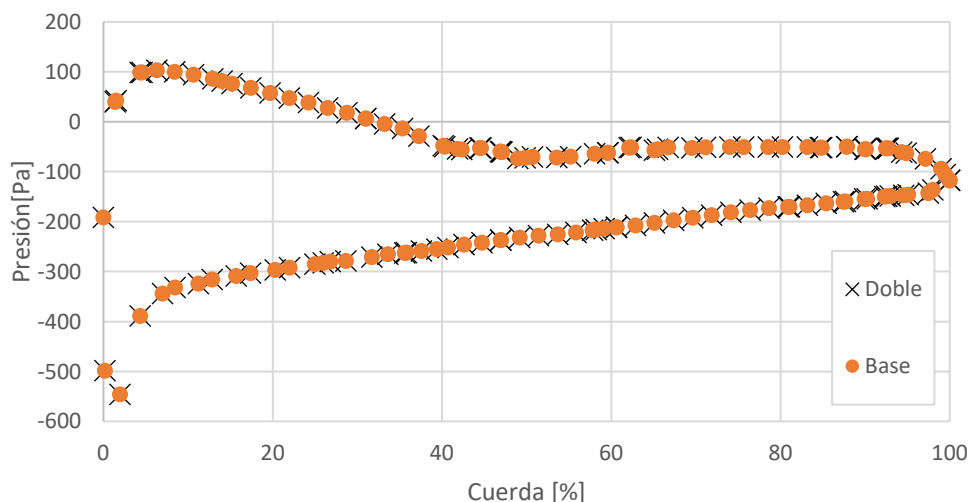
	Empuje [N]	Error [%]
OpenFOAM	1737.25	-
Experimental	1673	3.8

La simulación de OpenFOAM tiene un error de 8.39% respecto a la simulación robusta del paper, (simulada con 128 cores), lo que sugiere que la simulación más robusta, con su mayor cantidad de capas, aumenta considerablemente la precisión de las fuerzas. La misma simulación OpenFOAM tiene un error del 19.86% respecto el valor experimental. Cabe mencionar que se está utilizando el modelo k-epsilon en una simulación que presenta desprendimiento de la capa limite en sectores de la raíz de la pala hasta alrededor del 47% de esta que, sumado a las limitaciones del mallado, se estiman como la principal contribuyente a este error. El error es considerablemente grande, este es la mínima cantidad de error esperado en las demás simulaciones. Considerando los recursos computacionales utilizados y disponibles, este es el error más bajo al cual se puede llegar.

Por último, se realiza una prueba para verificar que las dimensiones generales de la simulación no afecten en los resultados. En la ilustración 29 se pueden apreciar las dimensiones generales usadas en el caso base en el cual se sustentó la simulación. R corresponde al largo de la pala, que está dentro del dominio AMI en el cual girara en torno al eje, este a su vez está dentro del rango de refinamiento auxiliar para unir el refinamiento general con el del dominio AMI.

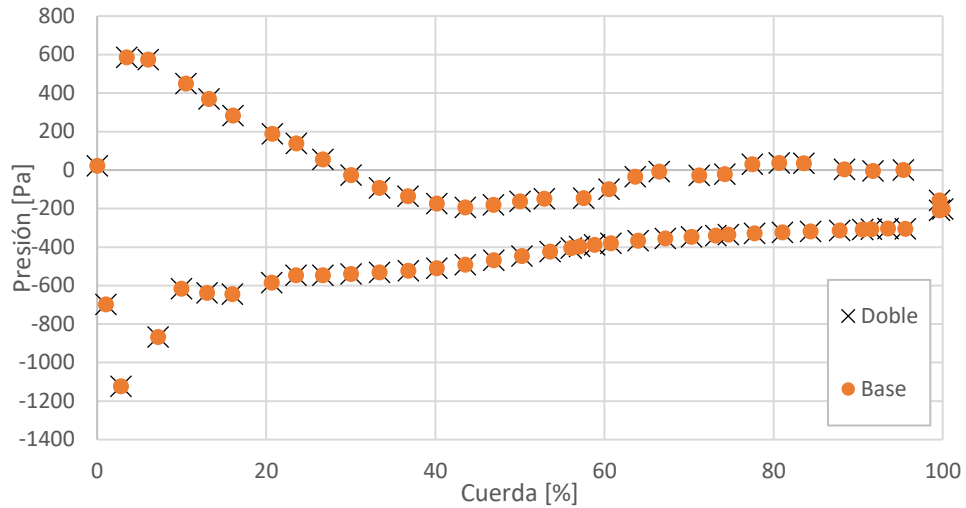
Para la prueba dimensional, se realizó una simulación amplificando los valores dependientes de R, con respecto al caso base, al doble. A continuación, se presentan resultados sobre la pala a dos segundos de simulación:

Gráfico 28: Presión a lo largo de la cuerda al 30% de la pala



COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

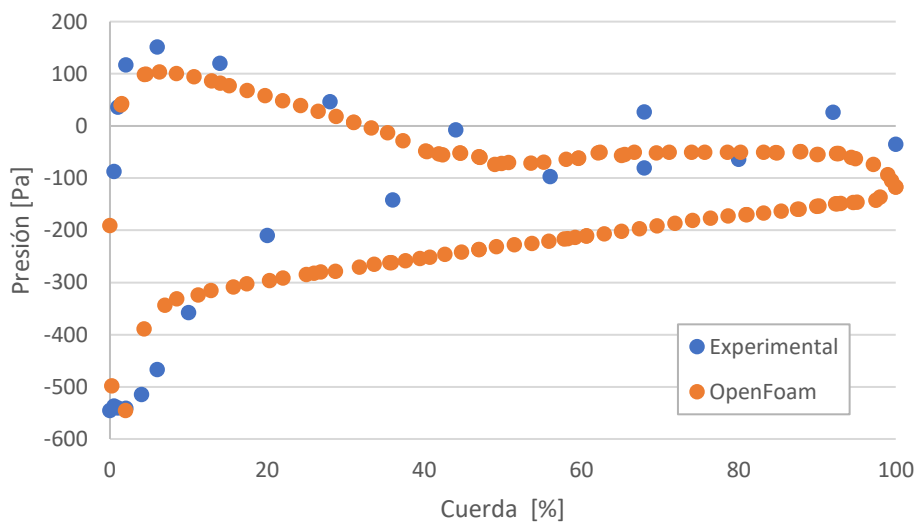
Gráfico 29: Presión a lo largo de la cuerda al 80% de la pala



Como se aprecia que no hay cambios entre los resultados de los valores de presión, lo que indica que al tamaño de malla base es suficiente para que no afecte los resultados. Aunque se puede tratar de encontrar una configuración general más pequeña que utilice menos recursos computacionales, se decidió seguir adelante con la configuración base ya que se estima que los beneficios entregados serian despreciables en comparación al tiempo requerido para obtenerlos.

A continuación, se presentan las diferencias entre los resultados de la simulación y los resultados experimentales

Gráfico 30: Presión a lo largo de la cuerda del perfil alar al 30% de la pala



COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Gráfico 31: Presión a lo largo de la cuerda del perfil alar al 47% de la pala

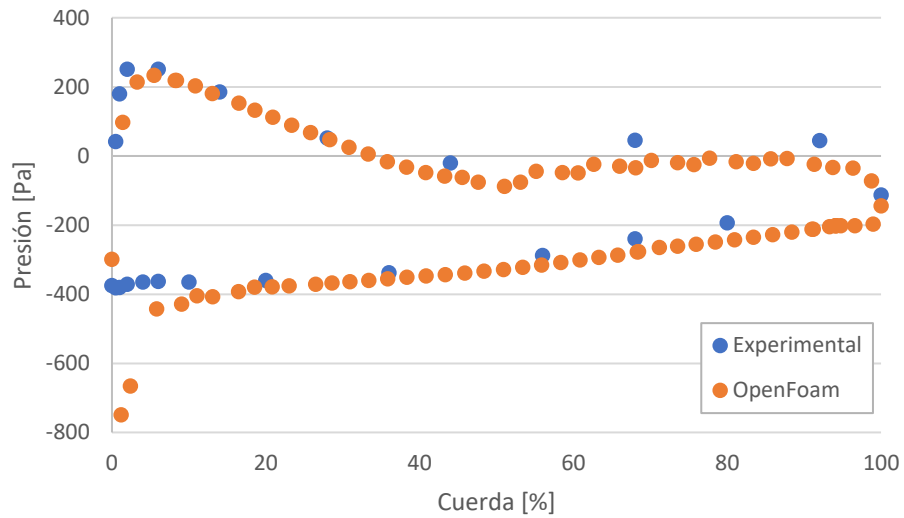
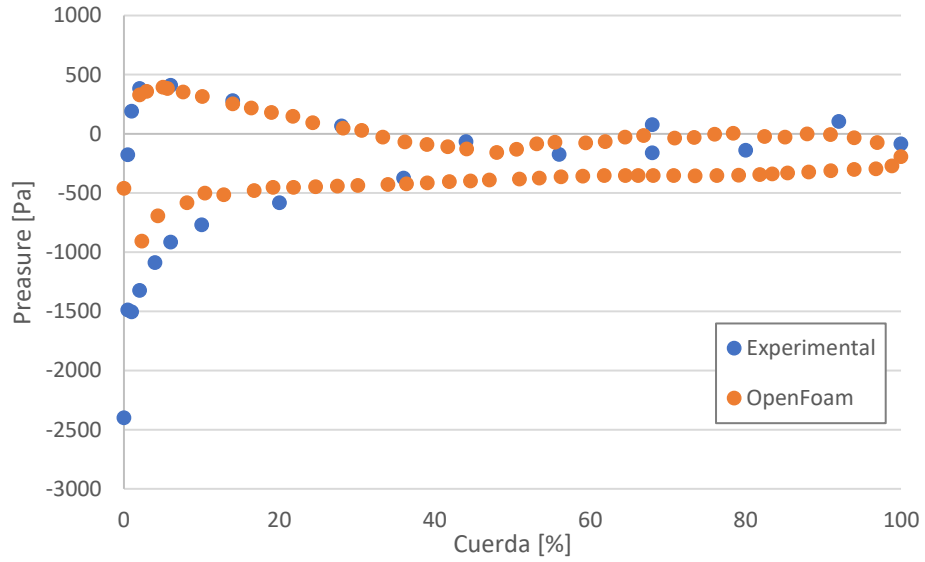
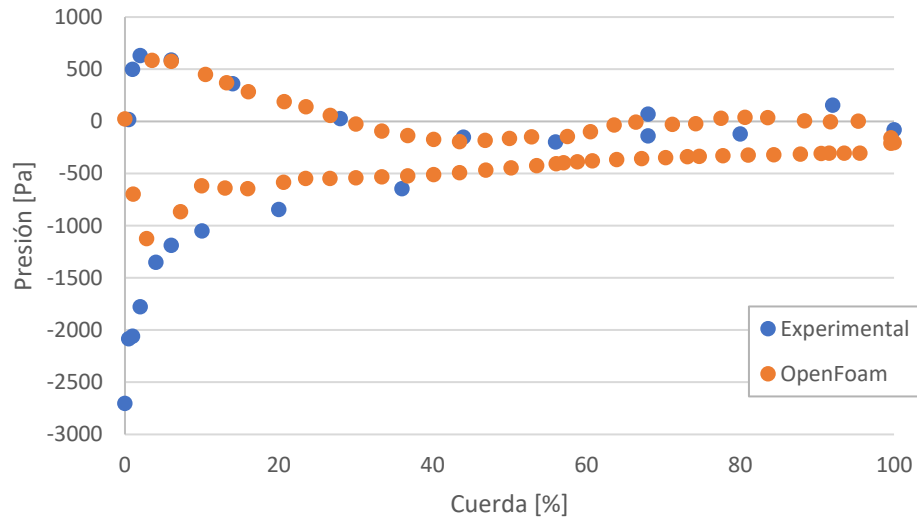


Gráfico 32: Presión a lo largo de la cuerda del perfil alar al 63% de la pala



COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Gráfico 33: Presión a lo largo de la cuerda del perfil alar al 80% de la pala



Como era esperable, el modelo k- ϵ no capta bien las presiones en el sector con desprendimiento de la capa limite presente en la sección más cercana a la raíz de la pala, que se traduce en una diferencia de presión más alta de lo normal en este sector. En la ilustración 36 se puede apreciar la sección en el extrado en la cual se está produciendo un flujo opuesto al movimiento, relativo a la velocidad de la pala. Para encontrar esta velocidad relativa, se aplica un arreglo simple para filtrar las velocidades en el eje de giro, tanto radial como angularmente que son el resultado del giro de la pala.

$$\vec{C}_{rel} = \vec{C} + (\omega * z)\hat{i} - C_z\hat{k} \quad (62)$$

Siendo ω la velocidad angular del giro de la pala. La velocidad relativa se puede filtrar una vez mas para mostrar solo el componente en una dirección. En "Paraview" se rota la geometría para que la pala se encuentre paralela al eje z y perpendicular al eje x, para analizar la velocidad relativa en esta componente.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

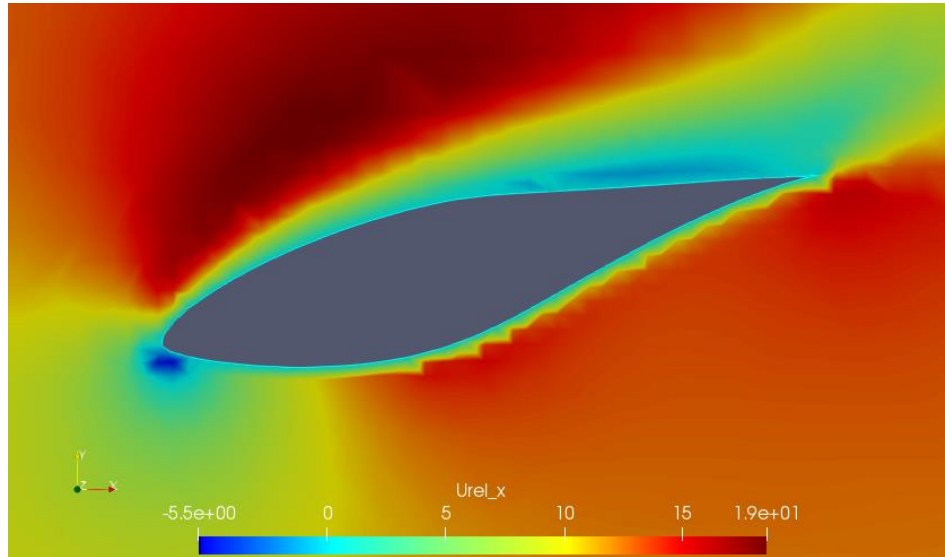


Ilustración 36: Campo de velocidad relativa en la dirección x alrededor del perfil alar al 30% de la pala

Dado el refinamiento del mallado cercano a la pala, el desprendimiento de la capa limite no se capta de manera óptima, lo que influye en los resultados obtenidos, además que el mallado no se moldeó al contorno de la pala de forma óptima como se aprecia en las ilustraciones 36 y 37.

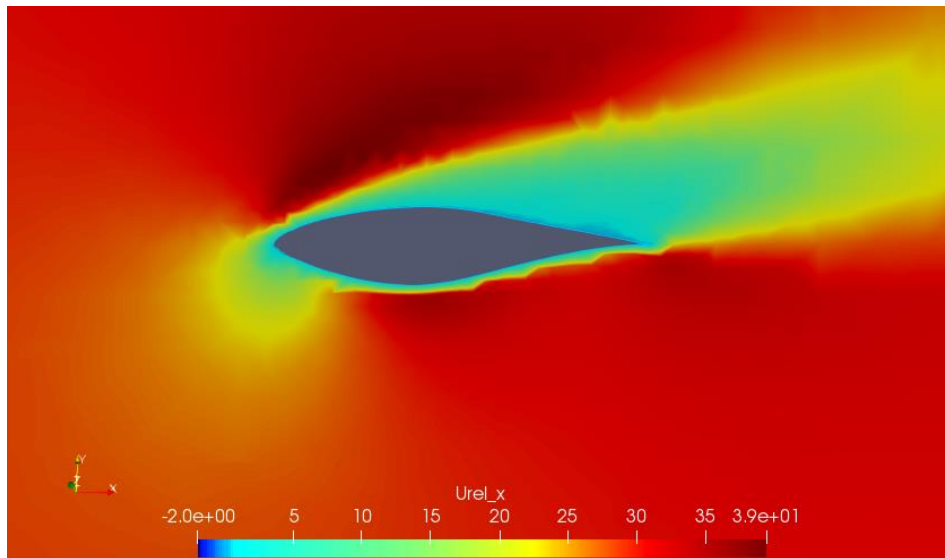


Ilustración 37: Campo de velocidad relativa en la dirección x alrededor del perfil alar al 80% de la pala

Mientras más se avanza por la pala, los resultados se acercan más a los valores experimentales, ya que la dependencia de la velocidad de giro por sobre la velocidad del viento resulta en una incidencia del flujo con el ángulo de ataque del perfil alar más cercano al óptimo. Como el nivel del mallado es el mismo para toda la pala, pero el tamaño de los

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

perfiles alares se reduce a lo largo, se ven afectados los valores de la presión en el borde de ataque del perfil alar. En la ilustración 37 se aprecia este problema de resolución.

El contorno de presión a lo largo de la pala tiene un comportamiento acorde con los resultados de otras simulaciones [33], como se aprecia en la figura, en la sección del intradós de la pala, se produce un aumento de presión en el punto en que el viento incide con la pala, y en el extrado, ocurren variaciones más bruscas de presión, resultantes del fenómeno de separación de flujo en la base.

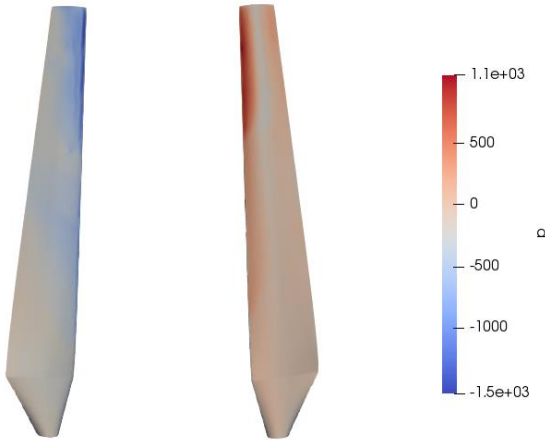


Ilustración 38: Contorno de Presión de la pala Nrel VI, a la izquierda el extradós y a la derecha el intradós del perfil alar presión dividido por densidad

CAPÍTULO 6: SIMULACIÓN DE LAS PALAS MODELADAS

6.1 Configuraciones Generales

Para las configuraciones de las simulaciones, primero se debe proponer la velocidad de viento a simular y las condiciones ambientales de este. Con el fin de simplificar los cálculos, dado la diferencia de densidades presentes en los campos eólicos tomados de referencia en el capítulo 4, se utilizará el valor de $1.20 [kg/m^3]$ que corresponde al valor más cercano a las alturas evaluadas de la mayor parte de Chile, 30 metros por sobre el nivel terrestre. Con este valor de densidad, se debe encontrar el valor de viscosidad para tener el parámetro de viscosidad cinemática que pide el programa OpenFOAM, pero no se puede utilizar valores de tabla que dependen de la temperatura dado que estos son a condiciones de una atmósfera. Para estimar este valor, se utilizará la calculadora de viscosidad utilizando la fórmula de Sutherland proporcionada por la NASA según la altura, $[30] 1.728 E - 5 [N \cdot s/m^2]$.

La velocidad de viento a evaluar será de $10 [m/s]$ que es un valor cercano al máximo del promedio más la desviación estándar de los parques a evaluar, dejando este valor como la velocidad nominal para evaluar la potencia dado que es el caso más extremo a considerar. La intensidad turbulenta se estimará parecida a la del experimento Nrel VI, que corresponde a 0.08 .

6.2 Resultados

Los resultados obtenidos son los mejores resultados a los que se puede llegar dado los recursos computacionales disponibles, por lo cual se debe tener en cuenta que no se están captando la totalidad de los efectos físicos aerodinámicos cercanos a la pala, en especial los comportamientos viscosos, debido al tamaño de la malla alrededor de las palas. El torque se calcula mediante la función de OpenFOAM "Forces" la cual realiza una integral de las fuerzas de presión y las contribuciones viscosas, entregando el momento generado por ambos y su suma.

6.2.1 FFA-W3-211

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la pala FFA-W3-211. La simulación en OpenFOAM de la pala FFA obtuvo comportamientos de presión a lo largo de la pala esperables, como el ángulo de ataque está más cerca a las condiciones de viento de diseño, la distribución de presión se comporta de manera más estable, en comparación a la pala de validación Nrel VI.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

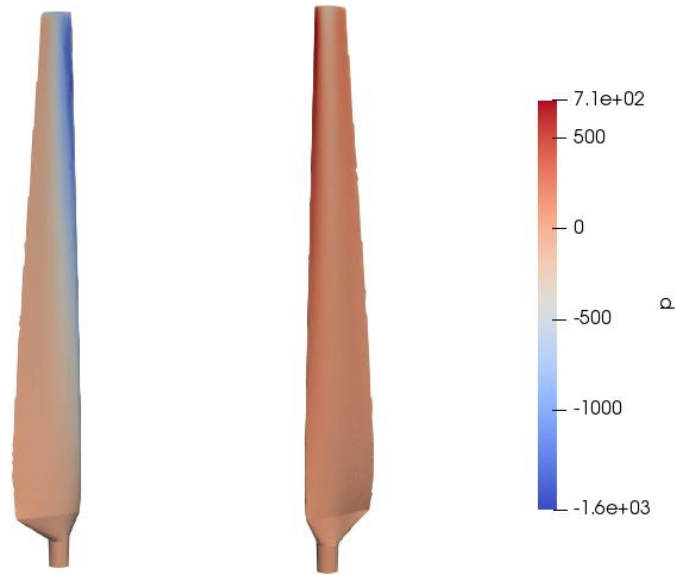


Ilustración 39: Contorno de Presión de la pala FFA, a la izquierda el extradós y a la derecha el intradós del perfil alar en presión dividido por densidad

A continuación, se presentan los resultados de las fuerzas y presión en la pala y el total resultante en el aerogenerador al multiplicar este valor por la cantidad de palas de diseño.

Tabla 10: Resultados fuerzas simulación pala FFA-W3-211

	Por Pala	Total
Torque [$N \cdot m$]	614.65	1843.95
Empuje [N]	993.53	2980.59

Igual que en el caso de validación, se presentan los perfiles de presión a lo largo del perfil alar a al 30%, 47%, 63% y 80% de la pala, junto con el campo de velocidad relativa respecto a la pala en los mismos sectores con el fin de analizar el comportamiento del aire alrededor de la sección del perfil alar y encontrar áreas de posible estancamiento o flujo de retorno, que son indicadores de posible separación de la capa limite.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Gráfico 34: Presión a lo largo de la cuerda al 30% de la pala FFA.

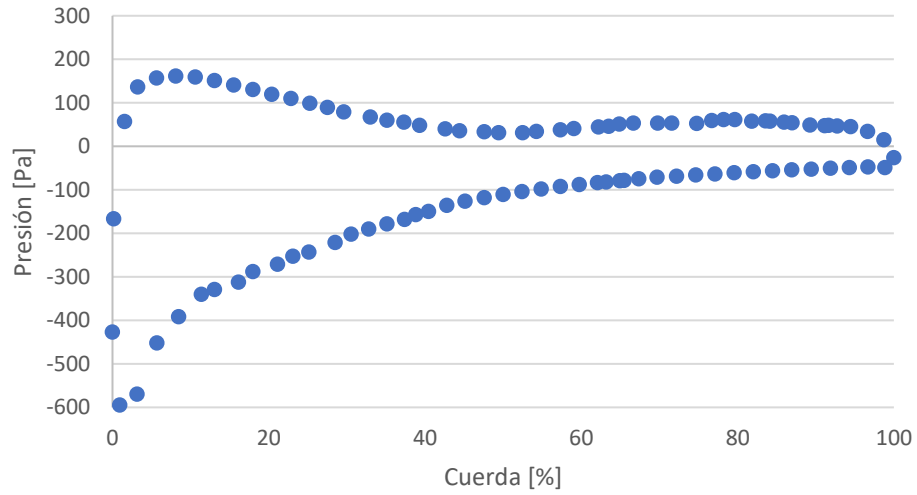
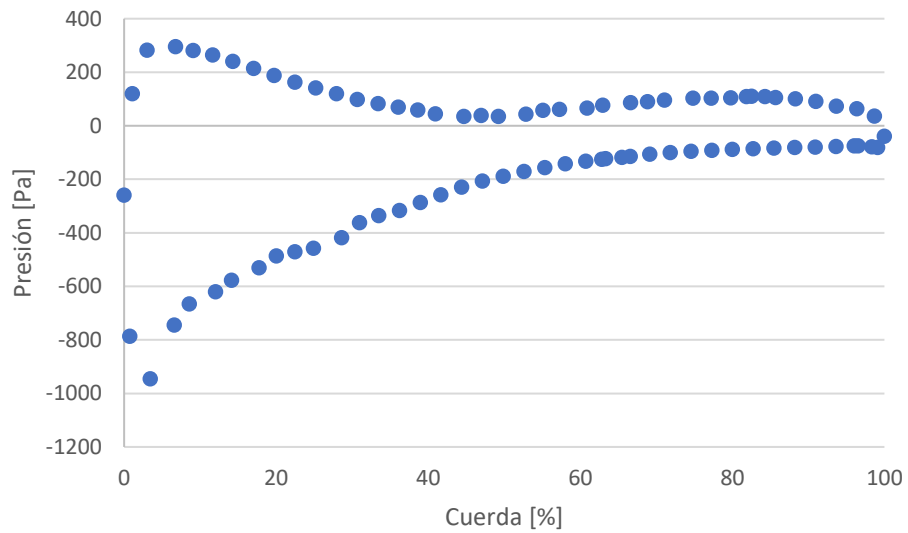


Gráfico 35: Presión a lo largo de la cuerda al 47% de la pala FFA.



COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Gráfico 36: Presión a lo largo de la cuerda al 63% de la pala FFA.

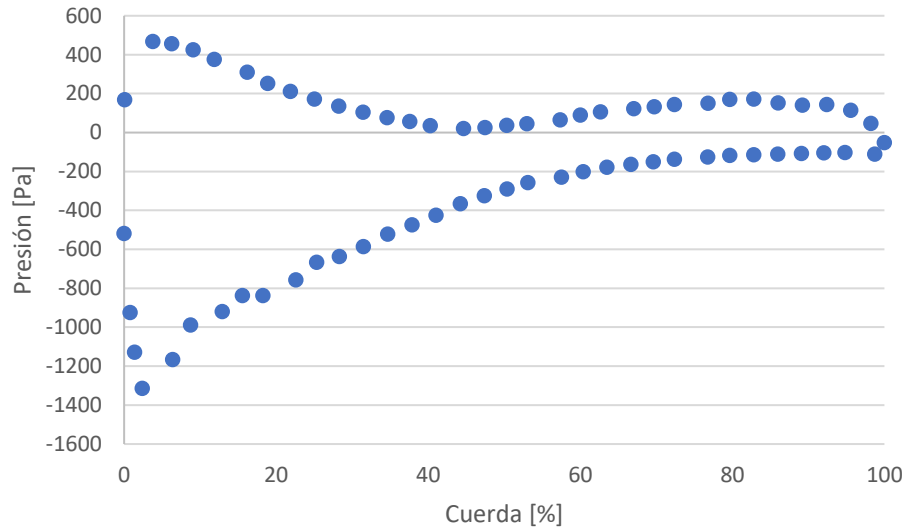
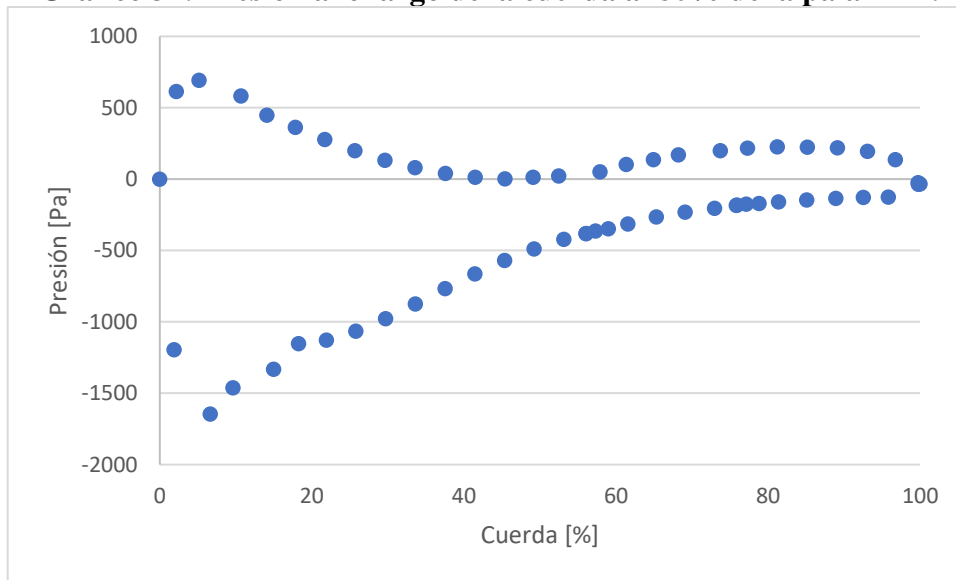


Gráfico 37: Presión a lo largo de la cuerda al 80% de la pala FFA.



En los gráficos se puede apreciar que se está cerca de la velocidad de punta óptima diseñada y no hay desprendimiento significativo de la capa límite, dado por la similitud de las curvas. Como no se tiene un mallado muy fino, la cantidad de puntos en el borde de ataque más cercanos a la punta de la pala es baja, por lo que se puede estar perdiendo resolución de fuerzas dado que es donde se produce el cambio más brusco de presión y donde se genera la mayor cantidad de sustentación.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Por otro lado, el agregado de capa al borde de la pala fue mucho más suave que en el caso de validación, entregando un perfil de velocidades más suave en su transición.

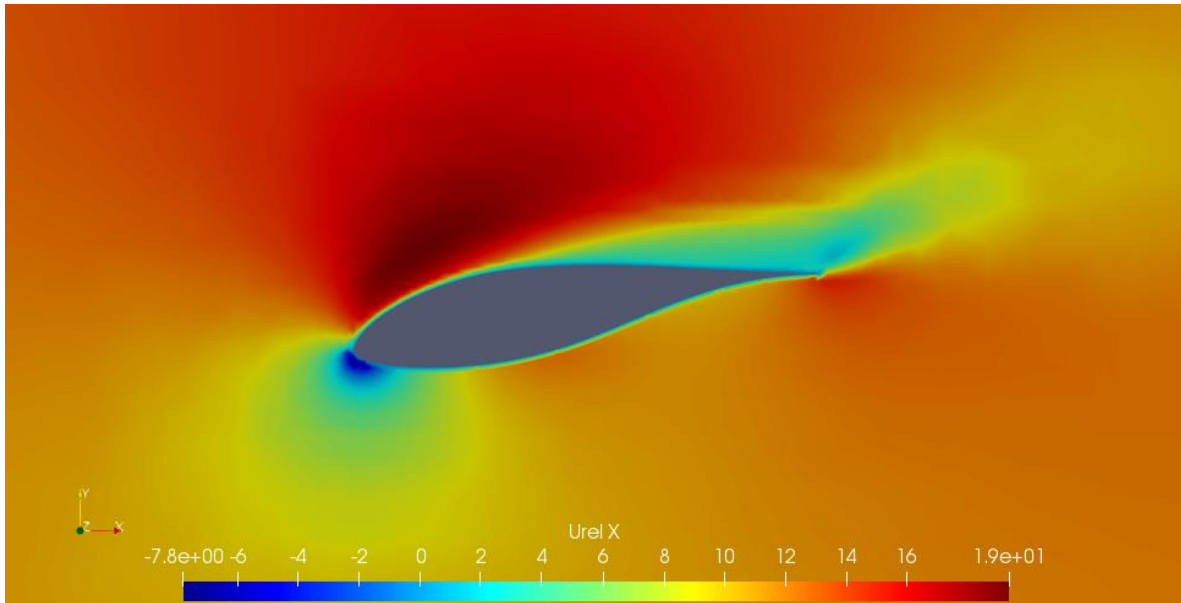


Ilustración 40: Campo de velocidad relativa en la dirección x alrededor del perfil alar al 30% de la pala FFA

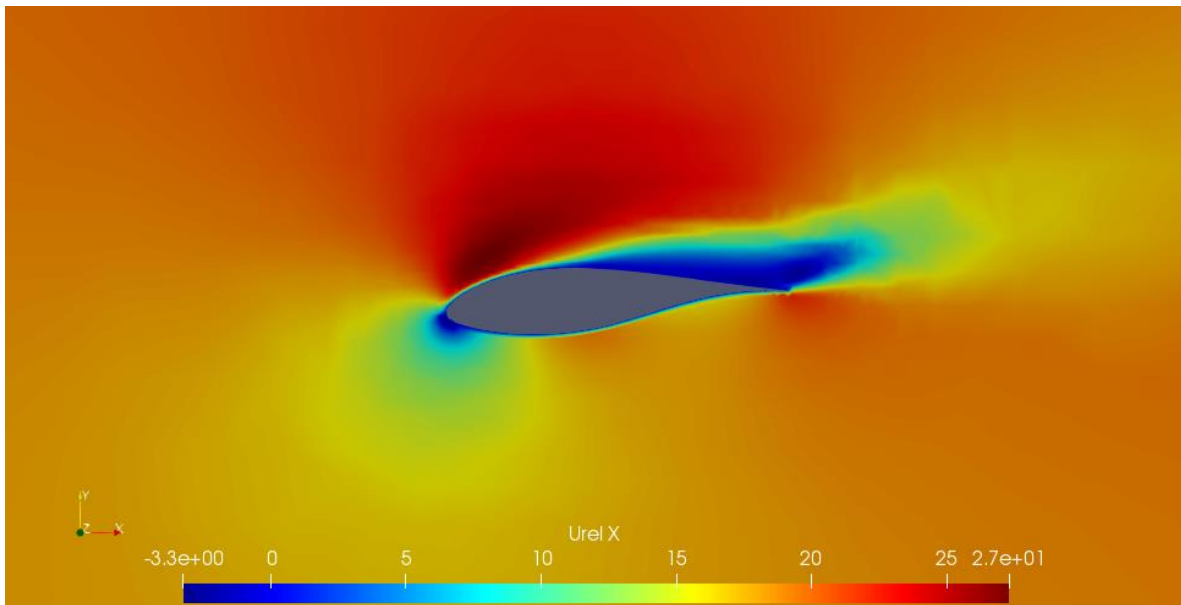


Ilustración 41: Campo de velocidad relativa en la dirección X alrededor del perfil alar al 47% de la pala FFA

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

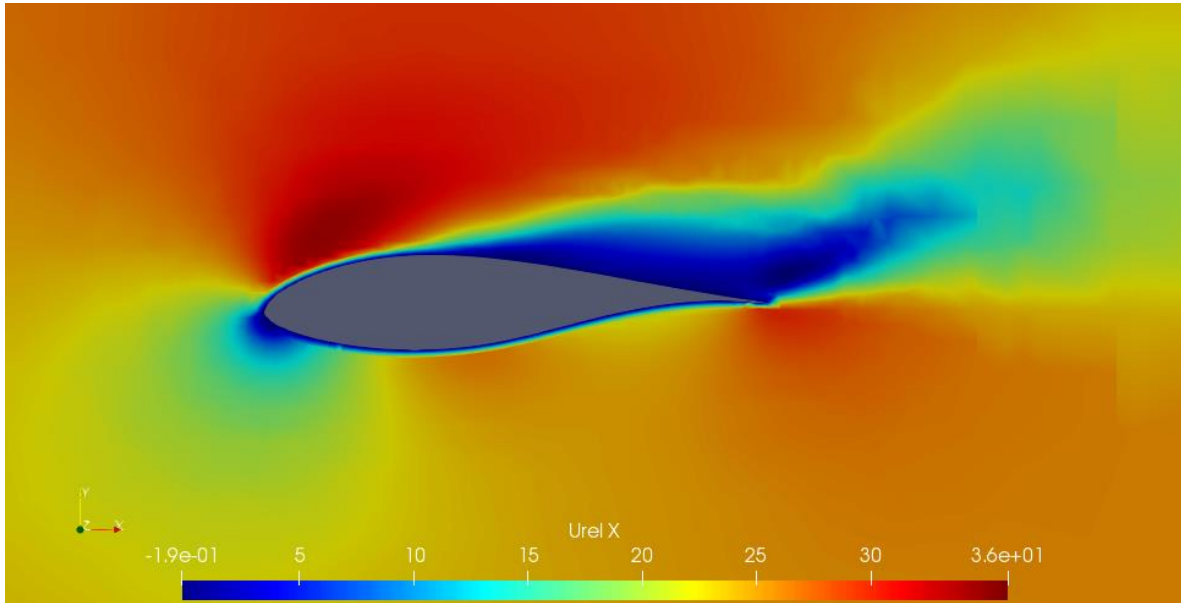


Ilustración 42: Campo de velocidad relativa en la dirección X alrededor del perfil alar al 63% de la pala FFA

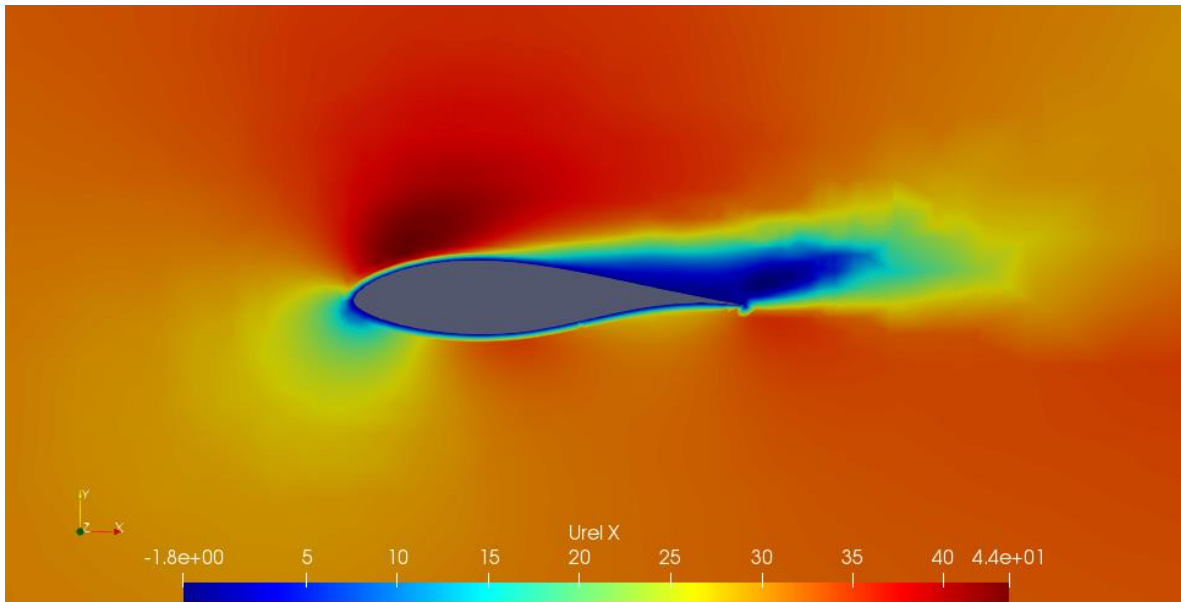


Ilustración 43: Campo de velocidad relativa en la dirección X alrededor del perfil alar al 80% de la pala FFA

Como se puede apreciar en el campo de velocidades relativas, existe un mínimo estancamiento seguido por un área de vórtice en el borde de fuga de los perfiles alares, teniendo un comportamiento similar a lo largo de la pala, con la excepción del sector más cercano a la raíz. La presencia de un retorno del flujo pasado el borde de fuga indica la presencia de un vórtice y posible desprendimiento en el borde de fuga del extrado.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

6.2.2 DU-93-W-210

A continuación, se presentan los resultados teóricos obtenidos de la pala DU-93-W-210. La simulación en OpenFOAM también obtuvo comportamientos de presión a lo largo de la pala esperables, como el ángulo de ataque esta más cerca a las condiciones de viento de diseño, la distribución de presión se comporta de manera más estable, en comparación a la pala de validación Nrel VI.

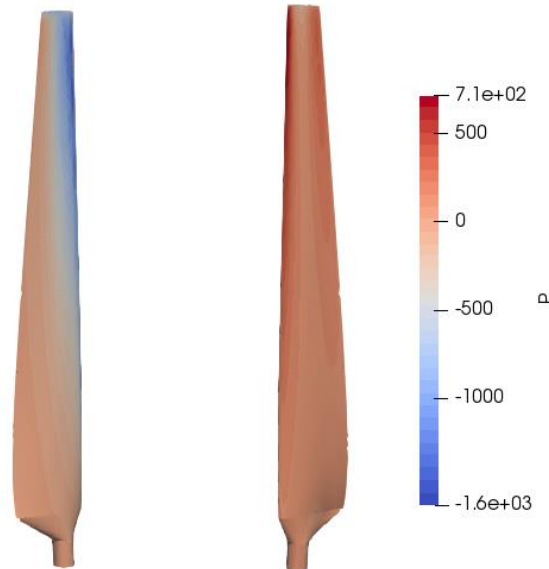


Ilustración 44: Contorno de Presión de la pala FFA, a la izquierda el extradós y a la derecha el intradós del perfil alar en presión dividido por densidad

A continuación, se presentan los resultados de las fuerzas y presión en la pala y el total resultante en el aerogenerador al multiplicar este valor por la cantidad de palas de diseño.

Tabla 11: Resultados fuerzas simulación pala DU-93-W-210

	Por Pala	Total
Torque [$N \cdot m$]	747.60	2242.80
Empuje[N]	1071.61	3214.83

Igual que en el caso anterior, se presentan los perfiles de presión a lo largo del perfil alar a al 30%, 47%, 63% y 80% de la pala, junto con la velocidad relativa respecto a la pala en los mismos sectores con el fin de analizar el comportamiento del aire alrededor de la sección del perfil alar y encontrar áreas de posible estancamiento o flujo de retorno, que son indicadores de posible separación de la capa límite.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Gráfico 38: Presión a lo largo de la cuerda al 30% de la pala DU-93.

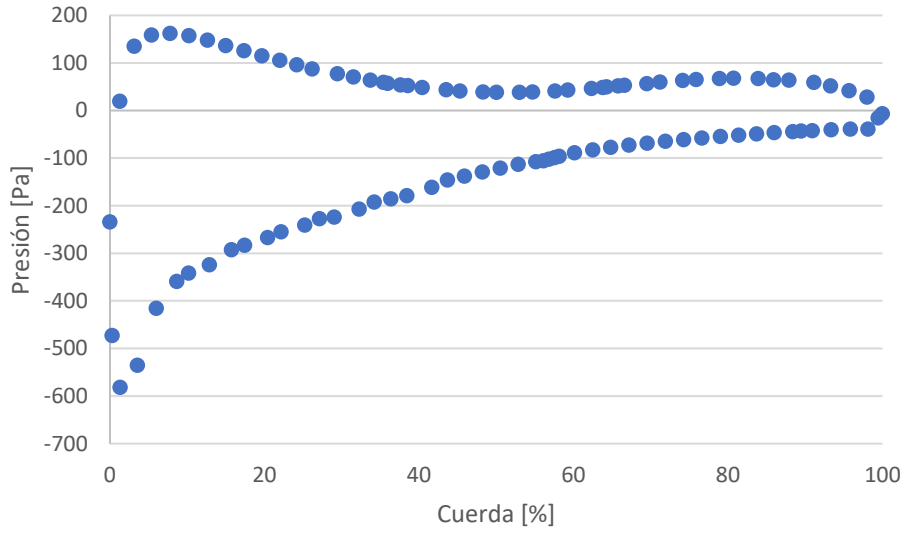
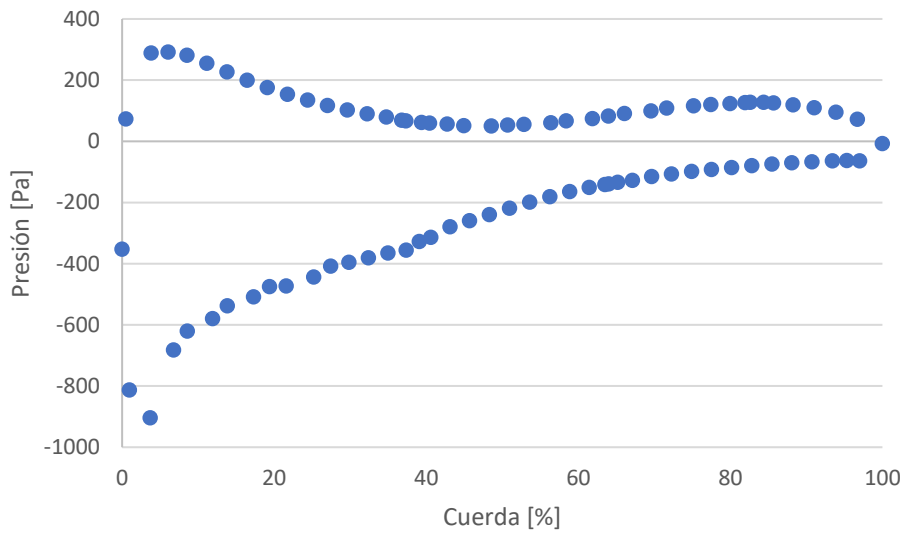


Gráfico 39: Presión a lo largo de la cuerda al 47% de la pala DU-93.



COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Gráfico 40: Presión a lo largo de la cuerda al 63% de la pala DU-93.

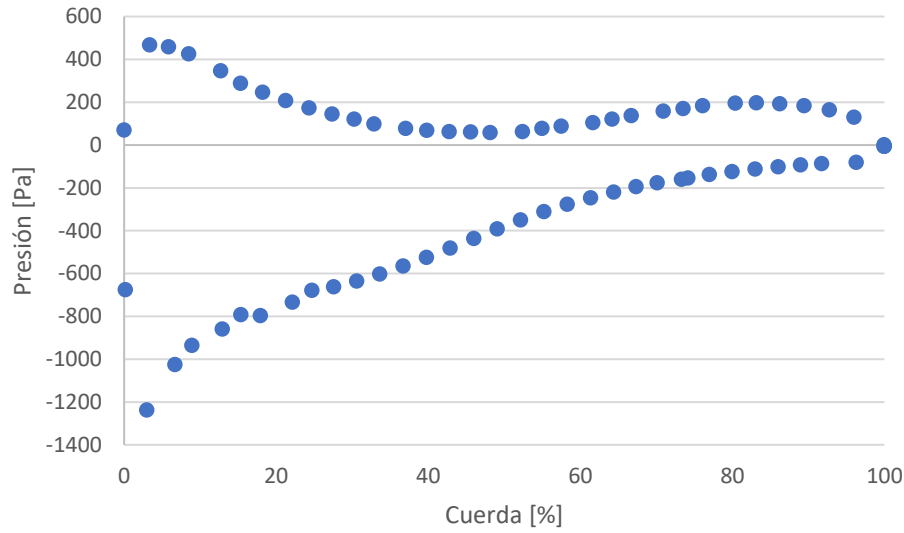
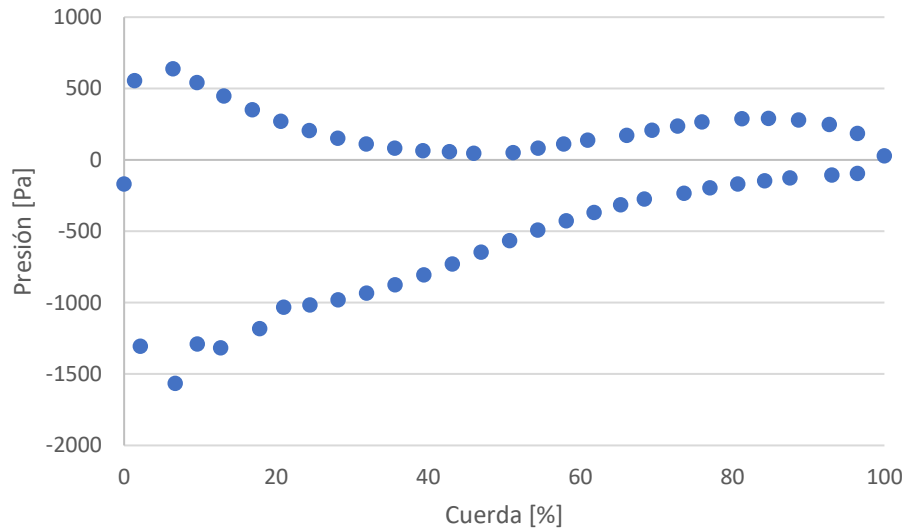


Gráfico 41: Presión a lo largo de la cuerda al 80% de la pala DU-93.



Igual que en la pala anterior, la similitud de los gráficos se debe a que la cercanía de la velocidad de punta óptima. Debido a la similitud geométrica de las palas, se tienen relativamente comportamientos similares pero sus resultantes son bastante diferentes. Esta pala genera $132.95 [N \cdot m]$ más de torque que la pala anterior y tiene un comportamiento mucho más estable en términos de velocidad, como se aprecia en los campos de velocidad relativo para su estudio cualitativo

El agregado de capa alrededor de la superficie de la pala también se comporta de manera más suave en esta geometría.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

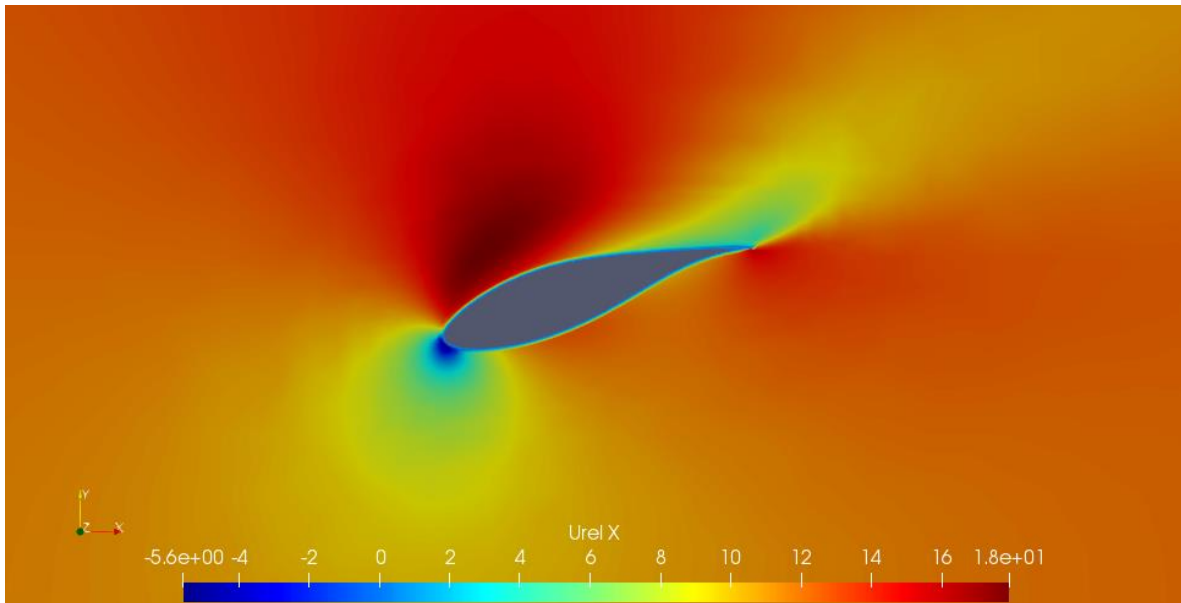


Ilustración 45: Campo de velocidad relativa en la dirección x alrededor del perfil alar al 30% de la pala DU-93

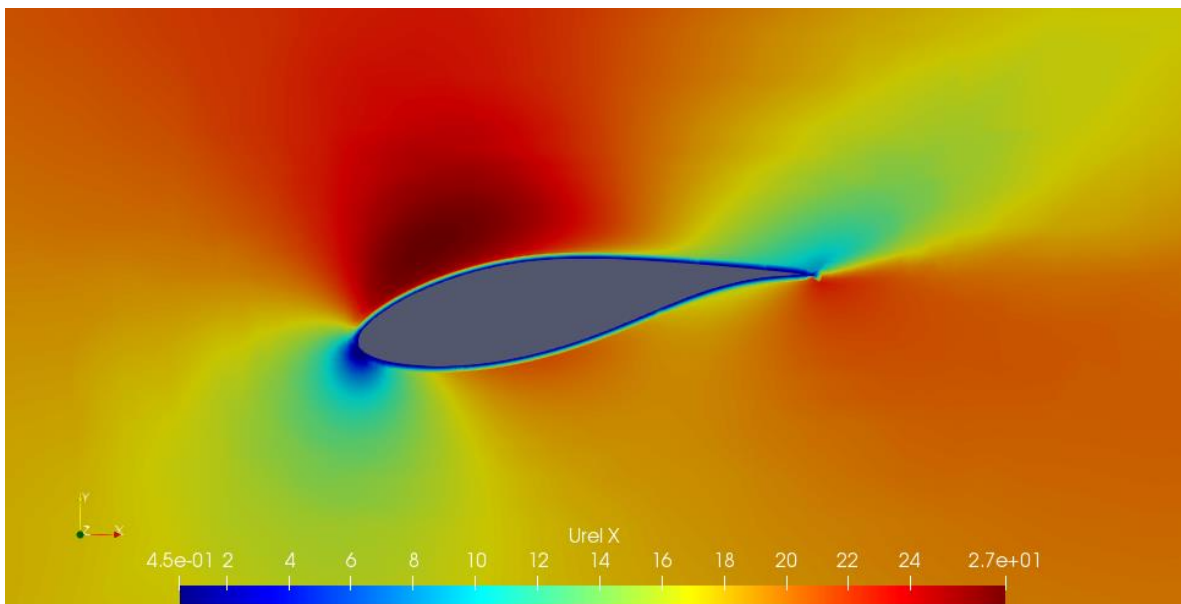


Ilustración 46: Campo de velocidad relativa en la dirección x alrededor del perfil alar al 47% de la pala DU-93

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

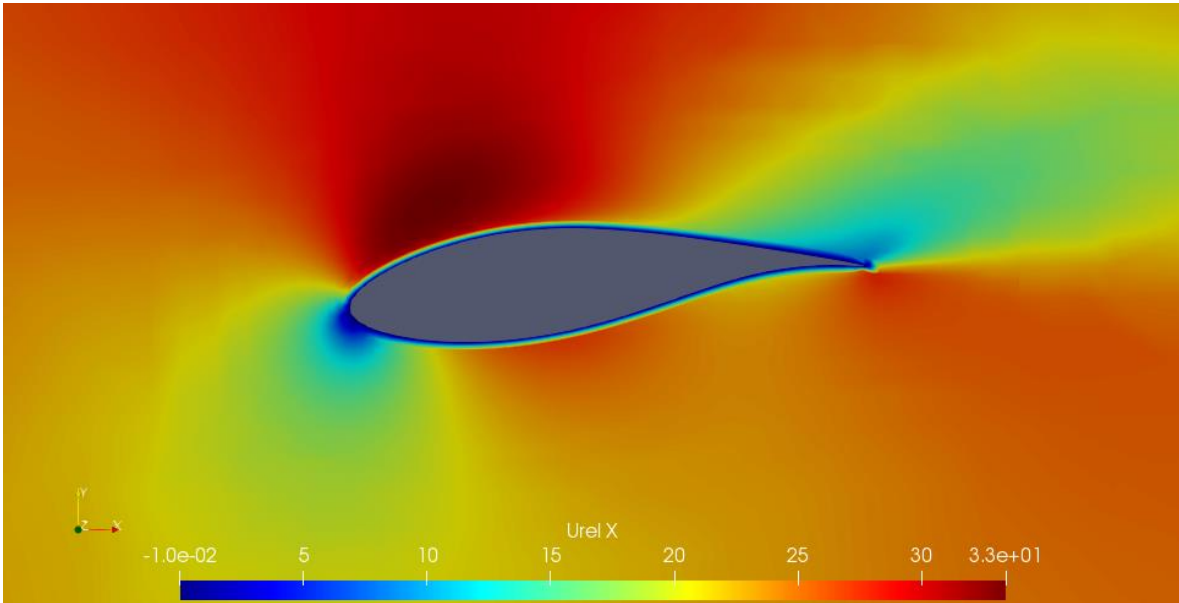


Ilustración 47: Campo de velocidad relativa en la dirección x alrededor del perfil alar al 63% de la pala DU-93

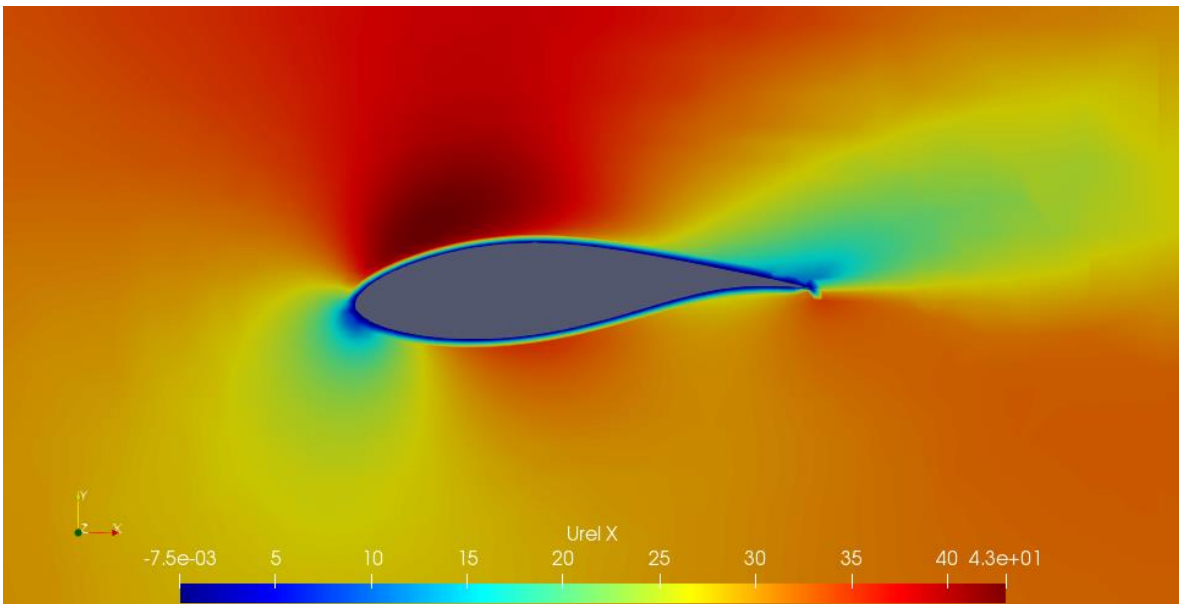


Ilustración 48: Campo de velocidad relativa en la dirección x alrededor del perfil alar al 80% de la pala DU-93

En los campos de velocidad relativa de estos perfiles alares se puede apreciar que no existe un estancamiento o flujo inverso en el borde de fuga, existe turbulencia en esta sección, pero es esperable dado que se simuló la pala en condiciones de velocidad de viento por sobre el óptimo a un número de Reynolds en donde se espera comportamiento laminar a turbulento.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

6.3 Análisis de los Resultados

De las dos palas simuladas de perfiles alares FFA-W3-211 y Du-93-W-210, la pala Du-93-W-210 tiene mejores resultados en términos de poder generado a una velocidad de viento por sobre el promedio de la mayoría de los parques considerados. En términos del empuje generado sobre la pala, el perfil FFA-W3-211 es el que obtuvo menores resultados.

Los perfiles de presión a lo largo de la cuerda de las secciones de la pala son bastante similares, teniendo mínimas diferencias en sus comportamientos. La principal diferencia entre los comportamientos se puede apreciar más en los campos de velocidad relativa, en donde se aprecia que el perfil Du-93-W-210 tiene un flujo de velocidad menos turbulento que el de la pala FFA-W3-211.

La geometría de ambas palas utilizadas es bastante similar, la principal diferencia en las palas es el ángulo de ataque al cual se optimizó, ver gráfico 42 en el anexo. Estas mínimas diferencias en la geometría se traducen en considerables cambios en los resultados, lo que refuerza la necesidad de estudiar este tipo de fenómenos para optimizar aún más la generación de energía eólica.

Aun con estos resultados, se debe considerar que el mallado utilizado no permite analizar en detalle todos los efectos aerodinámicos de la capa turbulenta, pero la simulación de estas fuerzas escapa del alcance de este trabajo por los recursos computacionales requeridos, por lo que se recomienda realizar un estudio más a fondo con más recursos computacionales.

En el caso de validación la velocidad de giro es óptima para una velocidad de viento de 5 [m/s], correspondiente a una velocidad de punta cercano a 7, y se simuló a 10 [m/s], correspondiente a una velocidad de punta cercano a 4. Las palas generadas para este análisis se optimizaron para una velocidad de punta de 5 a 8 [m/s], simuladas a 10 [m/s], correspondiente a una velocidad de punta de 4. La diferencia de velocidad de punta es de 3 para el caso de validación, mientras que para las palas simuladas es de 1. Debido a esto es que se tiene un buen comportamiento general en las palas de perfiles alares FFA-W3-211 y Du-93-W-210.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

Utilizando la base de dinámica de fluidos junto con aerodinámica de perfiles alares y turbinas eólicas se encontró los parámetros base para el posterior diseño de palas y modelos utilizados para la simulación de fluidos computacionales (CFD).

El estudio de modelos aerodinámicos en tres dimensiones establece que se debe tener especial consideración en el mallado cerca de la pala para poder captar los efectos dentro de la capa límite, considerándose un valor de y^+ bajo 300 como un buen punto de partida. Además, se puede utilizar el método RANS para realizar simulaciones de efectos aerodinámicos con un resultado aceptable a un costo computacional más bajo que una simulación directa como LES, "Large Eddy Simulation".

Con la ayuda del programa de libre acceso "QBlade" se realizó el diseño de las palas utilizadas, basado en la teoría B.E.M. y "X-Foil" para una estimación de las curvas de sustentación y arrastre de los perfiles alares utilizados.

En la realización de las simulaciones es donde más esfuerzo se dedicó, en especial en el refinamiento del mallado del dominio computacional. Se intentó realizar un mallado óptimo alrededor de la pala con los recursos entregados por la herramienta computacional "OpenFOAM" pero, los recursos computacionales requeridos para ello eran mayores a los disponibles. El mallado se refinó lo más posible pero no se logró generar una capa de inflación de y^+ bajo 300 para la totalidad de la pala, es más, gran parte de ella está sobre este valor. No obstante, el comportamiento de los resultados obtenidos está alineado con los experimentales y otros estudios similares.

El principal objetivo de esta memoria es comparar los perfiles alares en palas similares para obtener el mejor perfil alar para el uso de aerogeneradores industriales en las condiciones de viento de Chile. En tal caso, basándose en los resultados de las simulaciones CFD la pala creada con el perfil alar DU-93-W-210 es la más adecuada para su uso en Chile en aerogeneradores industriales del orden de los 10 a 30[kW], por sobre el perfil FFA-W3-211, debido a su mejor comportamiento aerodinámico y el poder generado.

En el caso de validación, los valores de presión a lo largo de la pala pueden estar cercanos a los valores reales, pero las fuerzas y torques generados tienen un error bastante grande en comparación a los resultados experimentales, alrededor de un 20% respecto al valor experimental en el mejor de los casos. Bajo estas condiciones no se puede fiar que se estén captando la totalidad de las fuerzas generadas por las interacciones de la capa turbulenta, que son los aspectos más importantes que captar en cuanto a este tipo de estudios. Lo que se puede rescatar es el comportamiento general de los contornos de presión y las fuerzas para poder llegar a una respuesta sobre cuál de los dos perfiles es el más recomendado.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

7.1 Recomendaciones

Los resultados obtenidos sugieren que el perfil alar DU-93-W-210 obtiene mejores resultados en condiciones similares para aerogeneradores industriales de menor tamaño, del orden de 10-30[kW], pero en los aerogeneradores industriales del orden de mega watts de potencia, los números de Reynolds correspondientes aumentan en una magnitud de 10 y las velocidades de giro son considerablemente menores, dado que el largo de la pala aumenta considerablemente la velocidad de punta, por lo que se requeriría realizar una investigación aparte para estas condiciones, considerando que se requerirán más recursos computacionales, debido al tamaño del mallado requerido.

Por otro lado, las palas simuladas fueron simplificadas para poder realizar la simulación, pero podría realizarse un estudio a fondo sobre la estructura de la pala, teniendo en cuenta que la raíz es el soporte estructural de la pala. Esto incluiría diseñar las palas con familias de perfiles alares para cada sección de la pala: raíz, centro y punta. Además, como las palas se deforman debido a las fuerzas de la punta puede afectar en el diseño y la salida de poder generado. En la investigación realizada para esta memoria se encontró estudios sobre la distancia mínima necesaria entre la pala y la torre para asegurar que estas no colisionen bajo las condiciones de operación. Esto implica que además se debe realizar un estudio del material utilizado para la construcción de las palas.

La principal recomendación necesaria para estudios de simulación computacional (CFD) es un computador con las capacidades computacionales correspondientes. En estas simulaciones lo más importante es el mallado del dominio computacional, y en cuanto a simulaciones de perfiles alares lo primordial es un mallado óptimo cercano a estos que permita captar las fuerzas viscosas y los fenómenos presentes dentro de la capa límite y su posterior desarrollo. OpenFOAM tiene los recursos para poder mallar y correr simulaciones de estas condiciones, pero el requerimiento computacional para el mallado de una geometría compleja como la de un aerogenerador, que cambia su ángulo y tamaño a lo largo de este, se escapó del estimado para el sistema de mallado SnappyHexMesh. Como se requiere afinar el mallado para captar la geometría de la pala, aumentando considerablemente la cantidad de elementos, del mallado para poder generar capas, que deben estar dentro del dominio de este refinamiento, se recomienda la utilización de otro programa para el mallado para disminuir la cantidad de elementos de la malla y facilitar el mallado de las capas alrededor de la pala. Se recomienda algún programa que permita agregar capas de inflación alrededor del perfil alar controlando la cantidad de elementos según el sector, para poder mallar una mayor cantidad de elementos en el borde de ataque, que es el área de mayor interés respecto las fuerzas. La implementación de "BladeBlockmesher" y "WindTurbineMesher" de Fraunhofer IWES [27] son ideales para el mallado, debido que permiten realizar las recomendaciones mencionadas y son creadas especialmente para su uso en OpenFOAM, pero, como no se tiene acceso a estos códigos y programas, de forma libre, no se puede recomendar su utilización.

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN
CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Frank, M. W. (2011). *Fluid Mechanics* (7ª ed.) New York, E.E.U.U: McGraw-Hill.
- [2] Fox and McDonald's (2011) *Introduction to Fluid Mechanics* (8ª ed.) Manhattan, E.E.U.U: John Wiley & Sons.
- [3] Henk, K.V. and Weeratunge, M. (2007) *An introduction to Computational Fluid Dynamics* (2º ed.) Essex, England: Pearson Education.
- [4] Frank, M.W. (2008) *Mecánica de Fluidos* (6ª ed.) Madrid, España: McGraw-Hill
- [5] Olivier, S. (2019) *Dinámica de Fluidos Computacional IPM 468*, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Ingeniería Mecánica.
- [6] Peter, J.S. and Richard, J.C. (2012) *Wind Turbine Blade Design*, University of Nottingham, Faculty of Engineering, Division of Materials, Mechanics and Structures.
- [7] Sam, R. (Mar 30, 2014). The First Power Generating Wind Turbine Was This 60-Foot Monster. Business Insider: Recuperado el 28 de octubre del 2020 de <https://www.businessinsider.com/first-wind-turbine-1887-2014-3>
- [8] Coordinador Electrico Nacional (2020) *Coordinador*: Recuperado el 28 de octubre del 2020, de <https://www.coordinador.cl/reportes-y-estadisticas/>
- [9] Martin, O. L. (2015) *Aerodynamics of Wind Turbines* (3ª ed.) Ney York, E.E.U.U: Routledge
- [10] David, M y Juliane W. (January 18, 2013) *QBlade Guidelines (v0.6)* Q-blade: *Recuperado el 9 de Noviembre de 2020 de http://q-blade.org/project_images/files/guidelines_v06.pdf*
- [11] Soren, G. (2009) *Wind Turbines*, University College of Aarhus, Department of Mechanical Engineering at the University College of Aarhus.
- [12] Anibal, I.C. (2000) *Aerodinámica y Actuaciones del Avión* (10ª ed.) Madrid, España: Paraninfo.
- [13] OpenFOAM (2006) *OpenFOAM User Guide v2006*: Recuperado el 13 de noviembre de 2020 de <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/index.html>
- [14] Rumsey, C (10/09/2020). *The Spalart-Allmaras Turbulence Model*. Langley Reserch Center. Recuperado el 13 de noviembre de 2020 de <https://turbmodels.larc.nasa.gov/spalart.html>
- [15] Rumsey, C (10/09/2020). *The Wilcox k-w Turbulence Model*. Langley Reserch Center. Recuperado el 13 de noviembre de 2020 de <https://turbmodels.larc.nasa.gov/wilcox.html>

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN
CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

[16] Rumsey, C (10/09/2020). *The Menter Shear Stress Transport Turbulence Model*. Langley Reserch Center. Recuperado el 13 de noviembre de 2020 de <https://turbmodels.larc.nasa.gov/sst.html>

[17] The Wind Power (2020). *V112/3000*. Recuperado el 28 de diciembre de 2020 de https://www.thewindpower.net/turbine_en_413_vestas_v112-3000.php

[18] Herrera, C. J. (24/05/2012). *Declaración de Impacto Ambiental “Parque Eólico Tal Tal”*. Recuperado el 28 de diciembre de 2020 de <https://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=6932541>

[19] Danish Wind Power Association (2003) *Power Density Function*: Recuperado el 29 de diciembre del 2020, de <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wres/powdensi.htm>

[20] Munzermayer D. (2012) *Estudio De Impacto Ambiental “Parque Eólico Talinay II”* : recuperado el 19 de enero de 2021 de <https://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=7545020>

[21] The Wind Power (2021). *Talinay Poniente*. Recuperado el 4 de Abril de 2021 de https://www.thewindpower.net/windfarm_es_26810_talinay-poniente.php

[22] Huaiquan, M. (2015). *Wind Resource Assessment and Micro-siting, Science and Engineering*. Recuperado el 6 de Abril de 2021 de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781118900116.app2>

[23] Estudio de Impacto Ambiental SEA (2021). *Parque Eólico Viento Sur*. Recuperado el 6 de abril de 2021 de <https://sig.sea.gob.cl/mapaLineasBaseEIA/>

[24] Umaid A. S., Rafiullah K., Athar M. (2017) *Analysis of Wind Energy Potential and Optimum Wind Blade Design for Jamshoro Wind Corridor*. Mehran University Research Journal of Engineering and Technology, Mehran University of Engineering and Technology, Jamshoro, Pakistan, pp.781-788.

[25] J.F. Manwell, J.G. McGowan and A.L. Rogers (2010) *Wind Energy Explained – Theory, Design and Application*. West Sussex. United Kingdom. John Wiley & Sons Ltd

[26] Eduardo M. Fírvida (2020). *GitHub*. Recuperado el 20 de noviembre de 2021 de https://github.com/efirvida/AeroGeneradores_OpenFOAM

[27] Bernard S. (2016). *OpenFoam Training Wind, Assuring Confidence Through Competence*. Recuperado el 20 de Junio de 2021 de http://www.iwes.fraunhofer.de/content/dam/windenergie/de/documents/OF_slides_website.pdf

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN
CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

- [28] M.M. Hand, D.A. Simms, L.J. Fingersh, D.W. Jager, J.R. Cotrell, S. Schreck and S.M. Larwood (2001) *Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns*. Golden, Colorado. United States. NREL, National Renewable Energy Laboratory
- [29] Y. Song, J.B Perot (2014) *CFD Simulation of the Flow around Phase VI Wind Turbine*. Masters Theses. Massachusetts. United States. University of Massachusetts Amherst.
- [30] Air Viscosity Sutherland's Formula (2022). *National Aeronautics and Space Administration*. Recuperado el 7 de junio de 2022 de <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/viscosity.html>
- [31] T. Holzmann (2016) *Mathematics, Numerics Derivations and OpenFOAM(R) fourth edition*, Holzmann CFD, Leoben. <http://www.holzmann-cfd.de>
- [32] A, Barbatos. (2021). *Simulación y Comparación de Perfiles Alares Para el Uso en Aerogeneradores de Eje Horizontal en Chile*. Tesis de pregrado. Santiago, Chile, Universidad Técnica Federico Santa María,
- [33] C, Yen-Pin. (2011). *A study of the Aerodynamic Behavior of a NREL Phase VI Wind Turbine Using CFD Methodology*, Ohio, United States, Wright State University

ANEXOS

Modelo $k - \epsilon$

Disipación de la energía cinética turbulenta, ϵ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho\epsilon) + \nabla \cdot (\alpha\rho u\epsilon) - \nabla^2 \cdot (\alpha\rho D_\epsilon\epsilon) = A_1 - A_2 + A_3 \quad (63)$$

$$A_1 = \alpha\rho G \frac{C_1\epsilon}{k} \quad (63.1)$$

$$A_2 = \left(\left(C_1 \frac{2}{3} - C_{3,RDT} \right) \alpha\rho \nabla \cdot u\epsilon \right) + \left(C_2 \alpha\rho \frac{\epsilon^2}{k} \right) \quad (63.2)$$

$$A_3 = S_e + S_{fvOptions} \quad (63.3)$$

Energía cinética turbulenta, k :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho k) + \nabla \cdot (\alpha\rho uk) - \nabla^2 \cdot (\alpha\rho D_k k) = A_1 - A_2 + A_3 \quad (64)$$

$$A_1 = \alpha\rho G \quad (64.1)$$

$$A_2 = \left(\frac{2}{3} \alpha\rho \nabla \cdot uk \right) + \left(\alpha\rho \frac{\epsilon}{k} k \right) \quad (64.2)$$

$$A_3 = S_k + S_{fvOptions} \quad (64.3)$$

Tabla 12: Valores de OpenFOAM del modelo k-épsilon

α	Fracción de fase de una fase dada
G	Producción de energía cinética turbulenta debido a la parte anisótropa de tensor de estrés de Reynolds
C_1	1.44
C_2	1.92
C_μ	0.09
$C_{3,RDT}$	Coefficiente de compresión de la teoría de rápida distorsión,

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

	0.0
S_e	Termino fuente de ϵ
S_k	Termino fuente de k
$S_{fvOptions}$	Termino fuente introducido en $fvOptions$ para ϵ o k
σ_k	1.0
σ_e	1.3

Modelo $k - \omega$ SST

Tabla 13: Valores de la ecuación 56

a_1	0.31
b_1	1.0
F_{23}	Función que suaviza la transición del método k- ϵ al k- ω
S	$\sqrt{\left \frac{1}{2} (\partial_j u_i + \partial_i u_j) \right }$

Valores Pala Optima Preliminar FFW

Tabla 14: Valores de la pala optima preliminar

r/R	c [m]	λ_r	ϕ [grados]	θ [grados]	θ_t [grados]
0.05	0.68	0.3	47.1	41.1	41.7
0.1	0.84	0.6	36.7	30.7	31.3
0.15	0.80	0.9	29.1	23.1	23.7
0.2	0.71	1.3	23.7	17.7	18.3
0.25	0.63	1.6	19.8	13.8	14.4
0.3	0.55	1.9	17.0	11.0	11.6
0.35	0.49	2.2	14.8	8.8	9.4

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

0.4	0.44	2.5	13.1	7.1	7.7
0.45	0.40	2.8	11.7	5.7	6.3
0.5	0.36	3.1	10.6	4.6	5.2
0.55	0.33	3.4	9.7	3.7	4.3
0.6	0.31	3.8	8.9	2.9	3.5
0.65	0.29	4.1	8.3	2.3	2.9
0.7	0.27	4.4	7.7	1.7	2.3
0.75	0.25	4.7	7.2	1.2	1.8
0.8	0.23	5.0	6.7	0.7	1.3
0.85	0.22	5.3	6.4	0.4	1.0
0.9	0.21	5.6	6.0	0.0	0.6
0.95	0.20	5.9	5.7	-0.3	0.3
1	0.19	6.3	5.4	-0.6	0.0

Tabla 15: Pala Simplificada DU-93-210

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Airfoil Name
2.50E-01	2.00E-01	0.00E+00	Circular Foil
5.00E-01	2.00E-01	0.00E+00	Circular Foil
7.50E-01	4.50E-01	2.98E+01	DU-93-210
1.00E+00	5.75E-01	2.98E+01	DU-93-210
1.25E+00	7.00E-01	2.39E+01	DU-93-210
1.50E+00	6.77E-01	1.95E+01	DU-93-210
1.75E+00	6.54E-01	1.61E+01	DU-93-210
2.00E+00	6.31E-01	1.35E+01	DU-93-210
2.25E+00	6.08E-01	1.14E+01	DU-93-210
2.50E+00	5.85E-01	9.63E+00	DU-93-210
2.75E+00	5.62E-01	8.19E+00	DU-93-210
3.00E+00	5.39E-01	6.98E+00	DU-93-210
3.25E+00	5.16E-01	5.94E+00	DU-93-210
3.50E+00	4.93E-01	4.76E+00	DU-93-210
3.75E+00	4.70E-01	4.16E+00	DU-93-210
4.00E+00	4.47E-01	3.57E+00	DU-93-210
4.25E+00	4.24E-01	2.96E+00	DU-93-210
4.50E+00	4.01E-01	2.42E+00	DU-93-210
4.75E+00	3.78E-01	1.93E+00	DU-93-210
5.00E+00	3.55E-01	1.49E+00	DU-93-210
5.25E+00	3.32E-01	1.09E+00	DU-93-210
5.50E+00	3.09E-01	7.31E-01	DU-93-210

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

5.60E+00	3.00E-01	5.95E-01	DU-93-210
----------	----------	----------	-----------

Tabla 16: Pala simplificada FFA-W3-211

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Airfoil Name
2.50E-01	2.00E-01	0.00E+00	Circular Foil
5.00E-01	2.00E-01	0.00E+00	Circular Foil
7.50E-01	4.50E-01	3.59E+01	FFA-W3-211
1.00E+00	5.75E-01	2.77E+01	FFA-W3-211
1.25E+00	7.00E-01	2.19E+01	FFA-W3-211
1.50E+00	6.77E-01	1.75E+01	FFA-W3-211
1.75E+00	6.54E-01	1.41E+01	FFA-W3-211
2.00E+00	6.31E-01	1.15E+01	FFA-W3-211
2.25E+00	6.08E-01	9.36E+00	FFA-W3-211
2.50E+00	5.85E-01	7.63E+00	FFA-W3-211
2.75E+00	5.62E-01	6.19E+00	FFA-W3-211
3.00E+00	5.39E-01	4.98E+00	FFA-W3-211
3.25E+00	5.16E-01	3.94E+00	FFA-W3-211
3.50E+00	4.93E-01	3.04E+00	FFA-W3-211
3.75E+00	4.70E-01	2.26E+00	FFA-W3-211
4.00E+00	4.47E-01	1.57E+00	FFA-W3-211
4.25E+00	4.24E-01	9.64E-01	FFA-W3-211
4.50E+00	4.01E-01	4.21E-01	FFA-W3-211
4.75E+00	3.78E-01	-6.66E-02	FFA-W3-211
5.00E+00	3.55E-01	-5.07E-01	FFA-W3-211
5.25E+00	3.32E-01	-9.06E-01	FFA-W3-211
5.50E+00	3.09E-01	-1.27E+00	FFA-W3-211
5.60E+00	3.00E-01	-1.41E+00	FFA-W3-211

COMPARACIÓN DE PALAS DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL PARA SU USO EN CHILE MEDIANTE SIMULACIÓN OPENFOAM 3D

Tabla 17: Pala Nrel Fase VI, perfil alar S809

Radial Distance r (m)	Span Station ¹ (r/5.532 m)	Span Station ¹ (r/5.029 m)	Chord Length (m)	Twist ² (degrees)	Thickness (m)	Twist Axis (% chord)
0.0	0.0	0.0	Hub - center of rotation	Hub - center of rotation	Hub - center of rotation	Hub - center of rotation
0.508 ³	0.092	0.101	0.218 (root hub adapter)	0.0 (root hub adapter)	0.218	50 (root hub adapter)
0.660 ⁴	0.120	0.131	0.218	0.0	0.218	50
0.883 ⁵	0.160	0.176	0.183	0.0	0.183	50
1.008 ⁵	0.183	0.200	0.349	6.7	0.163	35.9
1.067 ⁵	0.193	0.212	0.441	9.9	0.154	33.5
1.133 ⁵	0.205	0.225	0.544	13.4	0.154	31.9
1.257 ⁵	0.227	0.250	0.737	20.040	0.154	30
1.343	0.243	0.267	0.728	18.074	20.95% chord	30
1.510	0.273	0.300	0.711	14.292	20.95% chord	30
1.648	0.298	0.328	0.697	11.909	20.95% chord	30
1.952	0.353	0.388	0.666	7.979	20.95% chord	30
2.257	0.408	0.449	0.636	5.308	20.95% chord	30
2.343	0.424	0.466	0.627	4.715	20.95% chord	30
2.562	0.463	0.509	0.605	3.425	20.95% chord	30
2.867	0.518	0.570	0.574	2.083	20.95% chord	30
3.172	0.573	0.631	0.543	1.150	20.95% chord	30
3.185	0.576	0.633	0.542	1.115	20.95% chord	30
3.476	0.628	0.691	0.512	0.494	20.95% chord	30
3.781	0.683	0.752	0.482	-0.015	20.95% chord	30
4.023	0.727	0.800	0.457	-0.381	20.95% chord	30
4.086	0.739	0.812	0.451	-0.475	20.95% chord	30
4.391	0.794	0.873	0.420	-0.920	20.95% chord	30
4.696	0.849	0.934	0.389	-1.352	20.95% chord	30
4.780	0.864	0.950	0.381	-1.469	20.95% chord	30
5.000	0.904	0.994	0.358	-1.775	20.95% chord	30
5.305	0.959	1.055	0.328	-2.191	20.95% chord	30
5.532	1.000	1.100	0.305	-2.500	20.95% chord	30

Gráfico 42: Cl/Cd vs Ángulo de ataque simulado en X-Foil

