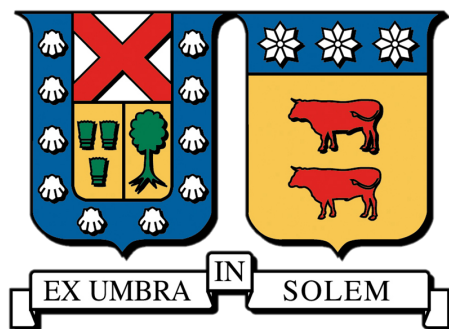


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO - CHILE



**MODELACIÓN COMPUTACIONAL TRIDIMENSIONAL
DE TURBINAS EÓLICAS SAVONIUS, H-DARRIEUS Y
DARRIEUS-SAVONIUS A PEQUEÑA ESCALA**

JEAN CARLOS GIANECCHINE CASTILLO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: PH.D. ROMAIN GERS

PROFESOR CORREFERENTE: DIPL. ING UDO RHEINSCHMIDT

OCTUBRE - 2023

Agradecimientos

Quiero dar las gracias a todas las personas que me ayudaron a hacer esto posible. Comenzando con mis padres, María y Víctor, por su sacrificio, amor y apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida. A Sebastián, por sus años de amistad y aquellas caminatas de vuelta a casa que muchas veces eran el mejor momento del día. A Valentina, por hacer de este año más bonito, escucharme y motivarme a mejorar cada día. Y a mi profesor guía Romain Gers, por estar siempre dispuesto a orientarme con sus conocimientos, con un trato amable y cercano.

*Dedicado a
mis padres*

Resumen

En las últimas décadas, las energías renovables han ido tomando cada vez más relevancia a nivel mundial debido a las condiciones climáticas, es por esto, que realizar la evaluación de nuevas alternativas de generación de potencia resulta de gran interés dentro de la ingeniería.

Dicho lo anterior, es que se realiza el siguiente trabajo, el cual tiene como objetivo llevar a cabo una simulación computacional de tres tipos de turbinas eólicas: Savonius, H-Darrieus y Darrieus-Savonius, sometidas a una velocidad del viento de 8[m/s] y un tip speed ratio igual a 1. El proceso se inicia presentando el contexto actual referente a la energía eólica acompañado del estado del arte, en donde se presentan diversos estudios experimentales en túneles de viento, patentes de turbinas híbridas y turbinas verticales presentes en el mercado, posteriormente se realiza un estudio preliminar de turbinas eólicas verticales, para conocer sus características y usos principales, para de esta forma tener una visión general del tema. Luego se presentan tres prototipos de pequeña escala de las turbinas verticales ya mencionadas, de los cuales su geometría será creada mediante el Software Inventor, en donde se le asignará al material plástico PMMA (comúnmente utilizado para prototipos) para obtener información sobre el peso e inercias de las turbinas, posteriormente las geometrías creadas se importan a Ansys Fluent, en donde se realiza un proceso para construir y definir los volúmenes de control, además, el proceso de modelación se describe en detalle, incluyendo la generación de mallas y la especificación de las condiciones de frontera relevantes, seguido de los métodos utilizados para la realización del cálculo, los cuales son SST k-omega y Coupled.

Los resultados de la simulación entregan que la eficiencia promedio de la turbina Darrieus-Savonius es de un 7.96%, por otra parte, la turbina H-Darrieus tiene una eficiencia promedio de 2.83% y finalmente la turbina Savonius posee un 0.44%. Además, se verifican los valores de coeficiente de potencia para las turbinas Darrieus-Savonius y H-Darrieus con un estudio experimental, y se compara con otra simulación la tendencia de las tres turbinas para un tip speed ratio igual a 1.

Abstract

In the last decades, renewable energies have been getting more relevance worldwide due to climatic conditions, thus, the evaluation of new alternatives for power generation is of great interest in engineering.

Having said this, the following work is carried out, which aims to carry out a computational simulation of three types of wind turbines: Savonius, H-Darrieus and Darrieus-Savonius, subjected to a wind speed of 8 [m/s] and a tip speed ratio equal to 1. The process begins by presenting the current context regarding wind energy together with the state of the art, where several experimental studies in wind tunnels, patents of hybrid turbines and vertical turbines present in the market are presented, followed by a preliminary study of vertical wind turbines, to know their main characteristics and uses, in order to have an overview of the subject. Then three small scale prototypes of the vertical turbines already mentioned are presented, whose geometry will be created using Inventor software, where it will be assigned to the plastic material PMMA (commonly used for prototypes) to obtain information about the weight and inertias of the turbines, then the geometries created are imported to Ansys Fluent, where a process is carried out to build and define the control volumes, also modeling process is described in detail, including mesh generation and specification of the relevant boundary conditions, followed by the methods used to perform the calculation, which are SST k-omega and Coupled.

The simulation results show that the average efficiency of the Darrieus-Savonius turbine is 7.96%, while the H-Darrieus turbine has an average efficiency of 2.83% and finally the Savonius turbine has 0.44%. In addition, the power coefficient values for the Darrieus-Savonius and H-Darrieus turbines are verified with an experimental study, and the tendency of the three turbines for a tip speed ratio equal to 1 is compared with another simulation.

Tabla de Contenidos

1	Introducción	1
1.1	Contexto	1
1.2	Contexto global	3
1.3	Contexto local	4
1.4	Objetivo general	6
1.5	Objetivos específicos	6
2	Estado del arte	7
2.1	Experimentos en túneles de viento	7
2.1.1	Túnel de viento Politécnico di Milano	7
2.1.2	Túnel de viento Tsinghua University	8
2.1.3	Efecto de la altura de las palas Savonius en el rendimiento de una turbina Darrieus-Savonius	9
2.2	Patentes	10
2.2.1	Primera patente	10
2.2.2	Segunda patente	11
2.3	Turbinas verticales en el mercado	12
2.3.1	Turbina DS3000	12
2.3.2	Turbina Smaraad Sx	13
2.3.3	Vertical Sky A32	14
2.4	Normativa	15
3	Marco Teórico	17
3.1	Construcción de turbinas eólicas	17
3.1.1	Eje	17
3.1.2	Acoplamientos	18
3.1.3	Caja de engranajes	18
3.1.4	El generador	18

3.1.5	Frenos	18
3.2	Turbinas eólicas	19
3.2.1	Turbina de eje horizontal	19
3.2.2	Turbinas de eje vertical	20
3.3	Fundamentos de la aerodinámica	25
3.3.1	Perfil aerodinámico	25
3.3.2	Perfil NACA de 4 dígitos	26
3.3.3	Principios de la modelación física y análisis aeroestructural	28
3.4	Modelos	33
3.4.1	RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes)	33
3.4.2	Modelos de dos ecuaciones	34
3.4.3	Modelo SST k-omega	34
3.4.4	Modelo RNG	35
3.4.5	LES (Large Eddy Simulation)	35
3.5	Acoplamiento de la presión	36
3.5.1	SIMPLE	36
3.5.2	SIMPLEC	36
3.5.3	PISO	36
3.5.4	COUPLED	37
3.6	Condición CFL	37
4	Metodología	38
4.1	Diseño en Inventor	38
4.1.1	Turbina Savonius	38
4.1.2	Turbina H-Darrieus	42
4.1.3	Turbina Darrieus-Savonius	46
4.2	Construcción de volúmenes de control	48
4.2.1	Geometría Savonius	49
4.2.2	Geometría Darrieus	50
4.2.3	Geometría Darrieus-Savonius	51
4.3	Malla	52
4.3.1	Malla Savonius	54
4.3.2	Mallado Darrieus	57
4.3.3	Malla Darrieus-Savonius	59
4.4	Configuración (Set-Up)	62
4.4.1	General	62

4.4.2	Modelo	63
4.4.3	Material	63
4.4.4	Condiciones de borde	64
4.4.5	Malla dinámica	64
4.4.6	Métodos	65
4.4.7	Controles	66
4.4.8	Monitores	66
4.4.9	Inicialización	67
4.4.10	Cálculo	67
4.4.11	Errores previos a la modelación final	69
5	Resultados y Análisis	72
5.1	Resultados de turbina Savonius	72
5.2	Resultados de turbina Darrieus	76
5.3	Resultados de turbina Darrieus-Savonius	81
5.4	Resumen de los datos	84
5.5	Tiempo de cálculo	85
5.6	Perspectivas del trabajo	86
6	Validación	87
6.1	Ejemplo N°1 de validación	87
6.2	Ejemplo N°2 de validación	89
7	Conclusión	91
	Referencias	92
	Anexo A: Código Matlab utilizado para la creación de perfil alar	95

Nomenclatura

Símbolo	Significado	Unidad
m	Masa	kg
$\dot{m}$	Flujo másico	kg/s
t	Tiempo	s
ρ	Densidad	$\frac{kg}{m^3}$
$\mathbf{V}$	Vector de velocidad	m/s
F	Fuerza	N
p	presión	Pa
g	Gravedad	m/s^2
Re	Número de reynolds	-
L	Largo característico	m
E_c	Energía cinética	J
P_w	Potencia entregada por el viento	W
P_t	Potencia de la turbina	W
C_p	Coefficiente de potencia	-
C_t	Coefficiente de torque	-
ω	Velocidad angular	rad/s
R	Radio de la turbina	m
D	Diámetro de la turbina	m
λ	Tip speed ratio	-
AR	Razón de aspecto	-
ϕ	Variable dada para ecuación NS	-
μ	Viscosidad dinámica	kg/ms
ν	Viscosidad cinemática	m^2/s
S_ϕ	Término fuente	-
τ	Tensor de esfuerzos de Reynolds	-
CFL	Número de Courant	-
I_2	Momento de inercia respecto al eje y	$kg \cdot mm^2$
$HAWT$	Turbina eólica de eje horizontal	-
$VAWT$	Turbina eólica de eje vertical	-

Capítulo 1

Introducción

1.1 Contexto

Las energías renovables son aquellas que aprovechan los recursos inagotables del planeta para generar un proceso de transformación a energía útil [1]. Por su lado, la energía eólica es un tipo de energía renovable que se obtiene utilizando la fuerza del viento, aprovechando la energía cinética de las masas de aire, este enfoque ha ido evolucionando a lo largo de los años, desde las antiguas turbinas de madera, las cuales son altamente amigables con el medio ambiente tanto en su fase de construcción como de operación, hasta las turbinas eólicas modernas, que si bien generan emisiones durante su fase de construcción, no producen residuos ni contaminan el agua durante su operación. El recurso eólico es inagotable y comienza a tomar gran relevancia a finales de la década de 1960, años en donde ocurre un cambio de paradigma a nivel mundial, pues todo daba a entender que los combustibles fósiles habían dejado atrás al rol del viento en la generación de energía, sin embargo, tras los continuos avances en el uso de la energía eólica, se comienzan a buscar alternativas que tuvieran el potencial necesario para cubrir las necesidades energéticas del ser humano, en este caso, el viento era sumamente adecuado ya que existe en todo el planeta y además se contaba con avances tecnológicos que permitirían aprovecharlo. Tras visualizar este potencial de la energía eólica, los gobiernos comienzan a invertir en investigación para la realización de diversas pruebas, siendo los pioneros en esto: Estados Unidos, Dinamarca y Alemania, permitiendo de esta forma tener avances significativos en lo que es la mecánica de fluidos y así mejorar la eficiencia de las turbinas, aumentar su escala e incrementar cada año la capacidad instalada. A pesar de las virtudes anteriormente mencionadas, esta forma de obtener energía tiene la desventaja de ser intermitente, ante lo cual, deben estudiarse con suma atención los diversos factores que permitirían aprovechar al máximo el potencial eólico presente en el planeta, para ello las soluciones que se plantean, son turbinas eólicas de gran envergadura (figura 1.1), colo-

casas a alturas elevadas, en sectores alejados de las viviendas para no afectar la vida de las personas (principalmente por el ruido que pueden generar), teniendo en cuenta además el periodo de migración de las aves para de esta forma no afectar a la fauna provocando efectos perjudiciales para el medio ambiente. [2]

Con el pasar del tiempo esta tecnología se ha ido refinando gracias al desarrollo en diversas áreas de conocimiento, tales como: la aerodinámica, métodos de diseño, ciencia de los materiales, informática y mecánica de fluidos. Esto ha permitido evaluar el rendimiento de nuevos diseños, adaptar la tecnología de los aerogeneradores, realizar pruebas y mediciones con mayor exactitud, etc. Con ello, van surgiendo nuevas propuestas de turbinas eólicas, cada vez con mayor capacidad de generación de potencia.

Durante los últimos 35 años, las turbinas eólicas han tenido mejoras significativas, aumentando su confiabilidad y rentabilidad, este período de mejora y estudio continúa hasta el día de hoy, pues se siguen desarrollando simulaciones, prototipos y diseños a distintas escalas para aprovechar de esta forma, todas las oportunidades presentes a la hora de reducir el coste de la energía.

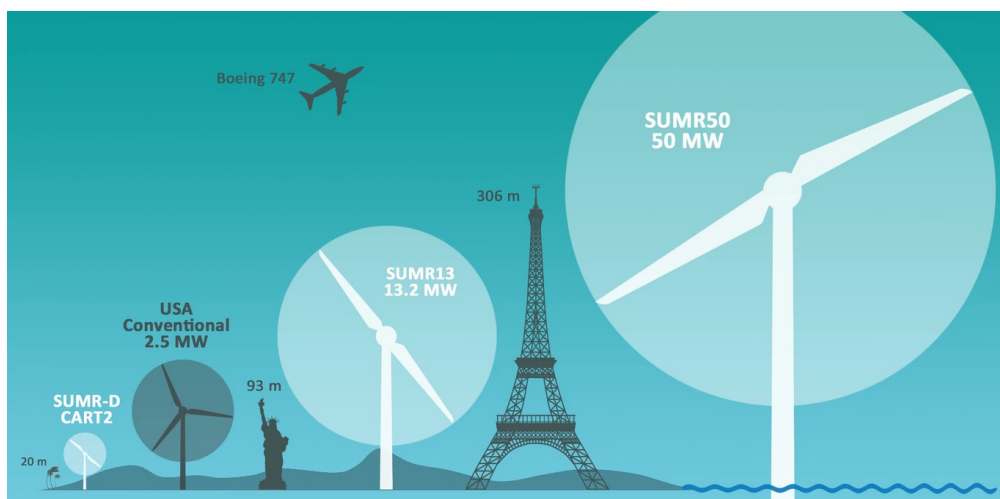


Figura 1.1: Tamaño, altura y diámetro de diversos aerogeneradores

Fuente: <https://www.xataka.com/energia/la-turbina-eolica-mas-potente-del-mundo-sera-mas-alta-que-el-empire-state-building>

1.2 Contexto global

En los últimos años, las emisiones de gases de efecto invernadero tales como: metano, óxido nitroso, dióxido de carbono, ozono, etc. Han aumentado considerablemente en comparación a la etapa preindustrial, provocando que la radiación térmica emitida por la tierra quede atrapada en la atmósfera, dando como resultado el calentamiento global. Esto es sumamente perjudicial para el ecosistema, puesto que desde la década de 1950 han comenzado a haber cambios que no han tenido precedentes en milenios, por ejemplo: aumento en el nivel del mar, disminución en los volúmenes de glaciares y aumento de la temperatura de la atmósfera y el océano. [3]

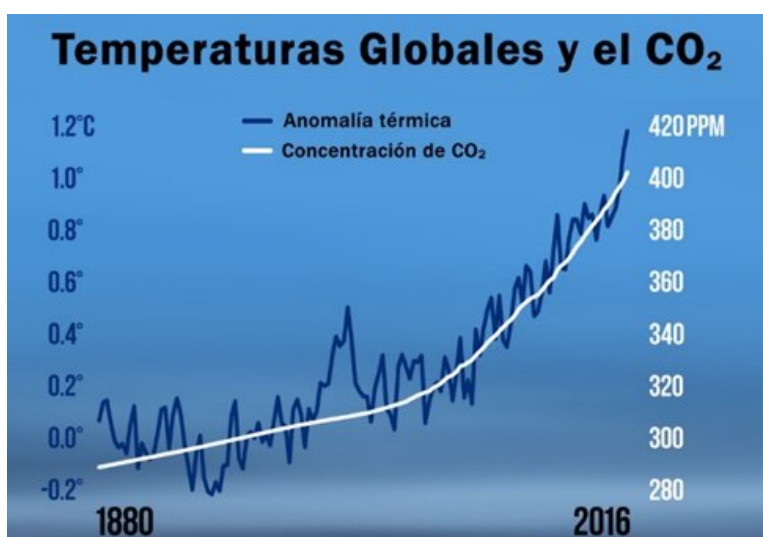


Figura 1.2: Gráfico de aumento de temperatura a nivel mundial

Fuente: <https://cambioclimaticoglobal.com/estudios-y-evidencias-del-calentamiento-global>

En adición a los problemas anteriormente mencionados, el consumo energético global va en aumento cada año, a excepción del año 2020 (inicio de pandemia global) que hubo una caída del 4,5%, pero esta se recuperó el año 2021 con un aumento de 5%, ante esto, es de suma importancia idear formas de generar energías limpias de mayor envergadura y eficiencia, con el objetivo de cubrir las demandas energéticas mundiales que tienen una tendencia al aumento, especialmente en el continente asiático, que en los últimos años se ha transformado en el mayor consumidor de energía del mundo. Ante esto es razonable mencionar que existe una crisis energética ya que es sumamente complicado cubrir estas altas demandas por parte de Norte América y Asia.

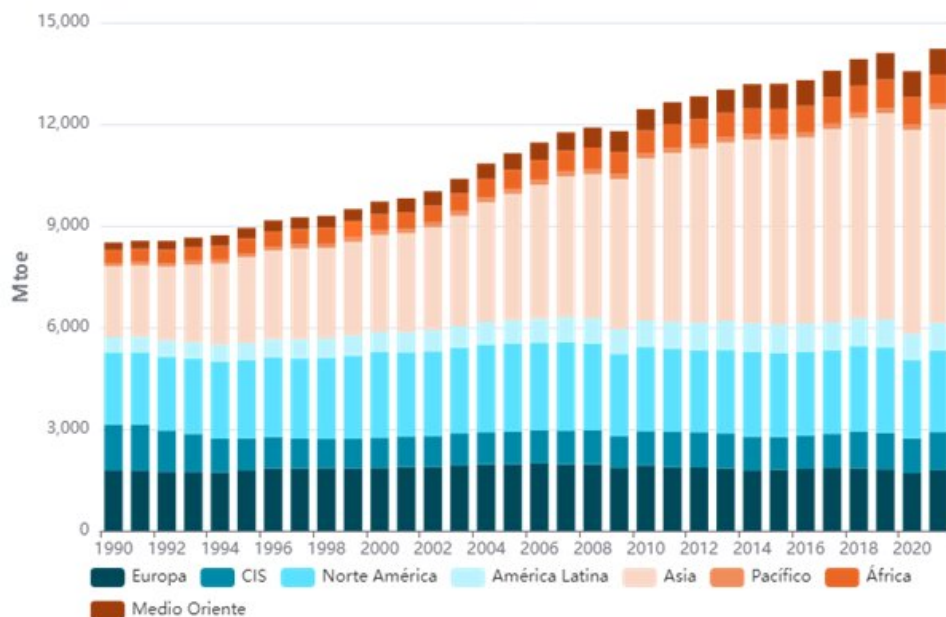


Figura 1.3: Gráfico de consumo energético en 1990-2021

Fuente: <https://datos.enerdata.net/energia-total/datos-consumo-internacional.html>

1.3 Contexto local

Chile posee un potencial en energías renovables considerable, en el norte se posee la radiación solar más alta del mundo, mientras que, de norte a sur, se tiene viento y terreno en condiciones para albergar parques eólicos. Con estos antecedentes se puede apreciar una tendencia al aumento en la generación de energía eólica en Chile al pasar de los años.

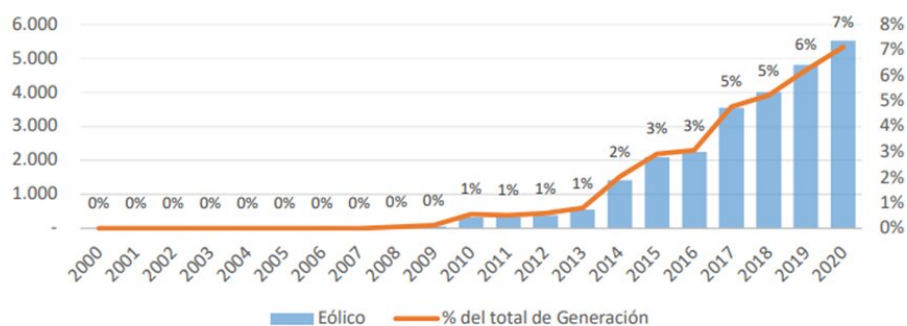


Figura 1.4: Energías renovables vs Capacidad instalada en Chile

Fuente: García Bernal, N. (2021, septiembre). *obtienearchivo*. Matriz energética y eléctrica en Chile.
<https://obtienearchivo.bcn.cl>

En la actualidad, Chile posee 18 proyectos eólicos en operación de los cuales 16 están

conectados al sistema interconectado central, representando un total de 803,3 [MW]. Toda la energía eólica de Chile se genera en centrales “on-shore”, o sea, instaladas en la tierra, por lo que Chile no cuenta con instalaciones “off-shore”, es decir en el mar, a pesar de que hay países con avances contundentes en esta materia, Chile aún no logra desarrollar todo su potencial en ese aspecto, por lo que la tecnología utilizada puede ser calificada como estándar, en donde las variaciones principales van en el tamaño del generador.

Sumado a lo anterior, también existen proyectos que están en proceso de ser ejecutados, tal es el caso del parque eólico Horizonte, que para el año 2024 pretende ser el mayor parque eólico de Chile y América latina, el cual tendrá 140 aerogeneradores contando con una capacidad instalada de 778 [MW] y estará ubicado en la Región de Antofagasta, esto permitiría cubrir el consumo energético de aproximadamente 700 mil hogares y a la vez evitar la emisión de 1.200.000 mil toneladas de dióxido de carbono al año.

Todos estos proyectos que se están llevando a cabo son sumamente importantes, ya que el impacto de la crisis energética ha tenido repercusiones en Chile, pues durante el último tiempo se puede apreciar un alza constante en los precios de las gasolinas, parafina y diésel, ante lo cual es vital enfocarse en mejorar la tecnología referente a energías renovables para disminuir la dependencia en el uso de combustibles fósiles, que además de su alto precio, tienen un impacto medio ambiental grave. [4]

1.4 Objetivo general

Realizar simulaciones tridimensionales mediante el Software Ansys Fluent de tres turbinas de eje vertical, del tipo: Savonius, H-Darrieus y Darrieus-Savonius para obtener los parámetros relevantes y característicos de las mismas al lograr un tip speed ratio igual a 1.

1.5 Objetivos específicos

- Investigar sobre la generación de energía eléctrica por medio de turbinas eólicas de eje vertical, estableciendo las principales ventajas de su utilización.
- Realizar modelos en Inventor de tres turbinas eólicas verticales, incluyendo tamaños, material, peso e inercia para cada uno.
- Desarrollar una modelación computacional por medio del Software Ansys Fluent para torque y velocidad angular de cada turbina, explicando los métodos utilizados.
- Calcular la potencia y rendimiento para cada turbina con los datos obtenidos de la simulación.
- Realizar pruebas de validación comparando con estudios existentes.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1 Experimentos en túneles de viento

2.1.1 Túnel de viento Politécnico di Milano

Este túnel de viento cuenta con una sección transversal de $3.84 \times 4 \text{ [m}^2\text{]}$, funciona con 1.4 [MW] y se utiliza para realizar diversas pruebas en turbinas de tipo VAWT, las cuales tienen diámetros entre 0.5 – 3 [m]. Para caracterizar la estela generada por la turbina se utilizan sensores de presión, y estos arrojan que dos VAWT separadas horizontalmente por 1.2-1.3 veces su diámetro, producen una estela parecida a una turbina que esté aislada, ahora bien, si se mantiene esta separación de 1.3 diámetros pero las turbinas se giran en contra del viento que está entre ellas, se genera una estela más fina que en una turbina aislada.



Figura 2.1: Túnel de viento Politécnico di Milano

Fuente: <https://www.researchgate.net/publication/351764251>

Se realiza otro estudio utilizando el túnel, en donde se compara a una turbina Troposkien con una H-Darrieus, este estudio demostró que ambas generan el mismo empuje, pero la primera logra más potencia cuando el flujo sobrepasa los 6,5 [m/s], puesto que esta elimina los torbellinos generados por el movimiento, mientras que, la H-Darrieus tiene problemas con eso ya que los mantiene permanentemente.

2.1.2 Túnel de viento Tsinghua University

El túnel de viento cuenta con una potencia de 44 [kW], en la parte de las pruebas tiene una sección transversal de 2×1.5 [m^2] y es de tipo abierto, se utiliza para experimentar con diseños nuevos de turbinas, por ejemplo, se experimentó con una turbina de eje vertical, la cual tenía agregadas aspas secundarias móviles, caracterizándola de esta manera como una VAWT que pudiese variar entre H-Darrieus y Savonius con el objetivo de que esta pueda autoiniciarse, los resultados indicaron que esta combinación permite obtener un mayor coeficiente de potencia, sumado a que también tiene un mejor control de la potencia en comparación a la H-Darrieus. [5]

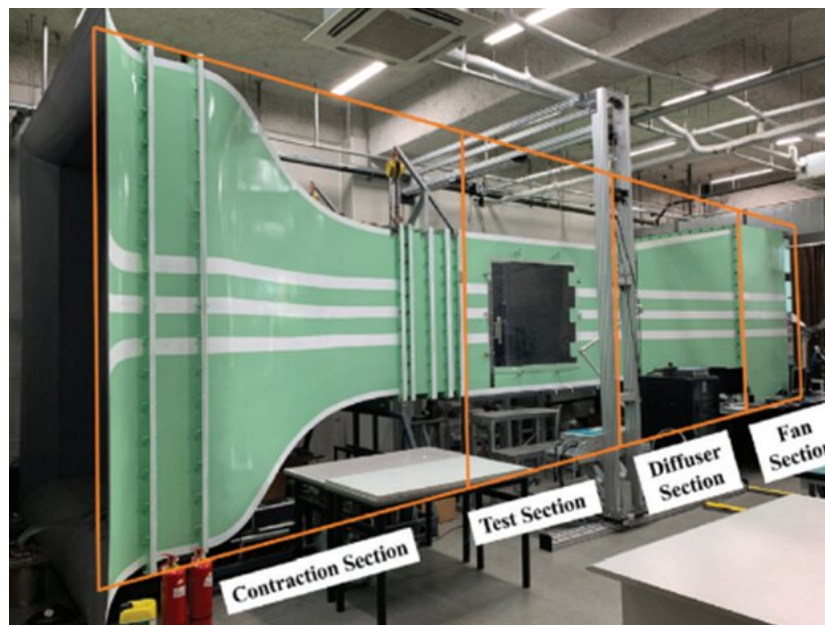


Figura 2.2: Túnel de viento Tsinghua University
Fuente: <https://www.researchgate.net/publication/351764251>

2.1.3 Efecto de la altura de las palas Savonius en el rendimiento de una turbina Darrieus-Savonius

Para este experimento se utiliza un túnel de viento abierto, este tiene una sección transversal de $1,2 \times 1,2 \text{ [m}^2\text{]}$ con un largo de 5 [m], el flujo de viento es producido por un motor eléctrico de 3 [HP] que acciona un ventilador axial rotatorio que se encuentra aguas abajo con el objetivo de mover la turbina se instala en medio del túnel en una sección de $400 \times 400 \times 1000 \text{ [mm}^2\text{]}$ los valores se prueban con velocidades de 5, 7 y 10 [m/s] y el número de Reynolds es calculado en base al diámetro Darrieus. Además, el torque es medido con un dinamómetro de freno de cuerda. Para interpretar los resultados, se define la magnitud adimensional $\delta = \frac{H_s}{H_D}$, y se usan los valores $\delta = 0,4 - 1,0 - 1,4$.

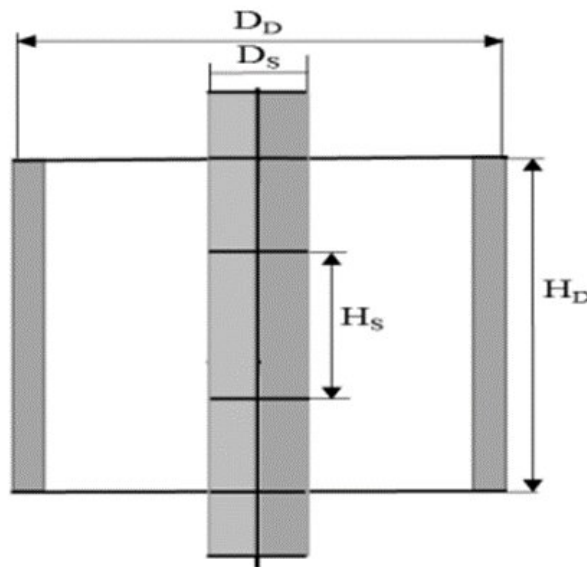


Figura 2.3: Efecto de la altura del álabe Savonius en una turbina híbrida Darrieus-Savonius

Fuente: <https://www.researchgate.net/publication/338250968>

Tras realizar diversas pruebas de rendimiento, el estudio concluye que el aerogenerador híbrido Darrieus-Savonius con $\delta = 1,4$, posee un rendimiento superior en comparación a la turbina híbrida con las relaciones de altura de 0.4 y 1, además de esto su rendimiento es mayor a la turbina Darrieus convencional, a pesar de esto, la turbina Darrieus convencional es más adecuada para velocidades elevadas. Ante esto se puede decir que la relación de altura entre las palas influye en las características del aerogenerador híbrido, además este rotor al combinar fuerza de sustentación y fuerza de arrastre logra un mayor par de torsión y coeficiente de potencia que una turbina Darrieus convencional, logrando aumentar este último desde 29% a 48%. [6]



(a) Turbina Darrieus-Savonius con $\delta=0,4$



(b) Turbina Darrieus-Savonius con $\delta=1,4$

Figura 2.4: Turbinas Darrieus-Savonius con distinto δ

Fuente: <https://www.researchgate.net/publication/338250968>

2.2 Patentes

2.2.1 Primera patente

Se toma como referencia la patente “Hybrid type vertical shaft turbine for wind power generating devices”, la cual utiliza rotores del tipo Darrieus y Savonius, en donde se propone un perfil particular (figura 2.5) con el objetivo de evitar interferencia entre estas dos tecnologías y además asegurar un arranque automático a bajas velocidades, esto se logra gracias a la sección del rotor Savonius, pues al contar con el principio de funcionamiento por arrastre se aumenta el torque generado por la turbina, complementado además por la fuerza de sustentación generada por el rotor Darrieus. Al probar estos perfiles de turbina por separado, se obtuvo que el rotor Savonius cuenta con un rendimiento de 19%, el rotor Darrieus un 25% mientras que el rendimiento de ambas turbinas combinadas alcanzó un 37% lo cual es un aumento importante. [7]

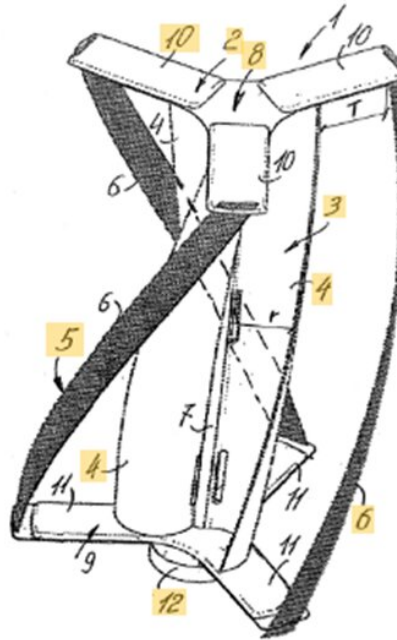


Figura 2.5: Turbina híbrida Darrieus-Savonius

Fuente: <https://patents.google.com/patent/WO2011012970A1/itl>

2.2.2 Segunda patente

La segunda patente estudiada es llamada “turbina eólica híbrida”, consta de un rotor interior de palas tipo Savonius y un rotor exterior de tipo Darrieus conectados a un árbol de rotación común que cuenta además con medios para desacoplar el rotor interior a velocidades medias-altas, esta necesidad de desacoplar, surge debido a que el rotor de tipo Savonius puede comenzar a girar con vientos de baja velocidad, sin embargo, va perdiendo eficiencia a medida que la velocidad del viento sube, ya que esto aumenta considerablemente la fricción, en cambio para el rotor Darrieus se tienen dificultades en el arranque a bajas velocidades puesto que su diseño optimiza el rendimiento con vientos de media o alta velocidad. Ante esto, la invención propuesta busca que en el arranque de la turbina actúe el rotor tipo Savonius, puesto que al ser más sensible a vientos de velocidad baja, tendrá un mejor arranque que el rotor de tipo Darrieus y cuando la turbina logra ponerse en marcha, se espera a que el rotor de Darrieus alcance una velocidad de rotación mayor a la de la turbina Savonius (considerando una velocidad del viento calculada) ante lo cual se desacopla automáticamente el rotor Savonius, esto no imparte ningún impacto negativo a la rotación de la turbina, de esta manera se soluciona el problema de arranque del rotor Darrieus y las ineficiencias a alta velocidad del rotor Savonius. [8]

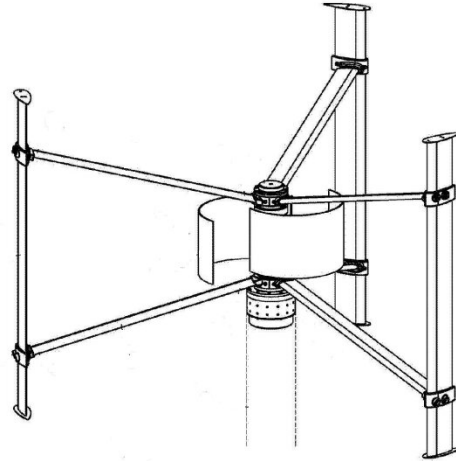


Figura 2.6: Turbina híbrida Darrieus-H Savonius

Fuente: <https://patentimages.storage.googleapis.com/87/3c/b0/79ca30281165ec/ES1078572U.pdf>

2.3 Turbinas verticales en el mercado

2.3.1 Turbina DS3000

La turbina DS3000 es un aerogenerador de eje vertical que logra 3 [kW] de potencia con una velocidad del viento de 12 [m/s], esto se consigue por medio de un sistema híbrido compuesto por palas externas Darrieus las cuales garantizan una eficiencia elevada y por palas internas Savonius las cuales permiten que la turbina se active con vientos de velocidad baja. El equipo posee controladores para regular la máxima potencia en relación con la velocidad del viento, teniendo además un generador de imán permanente controlado por accionamiento directo. Las turbinas cumplen con la normativa IEC 61400-2 la cual especifica requisitos para aerogeneradores pequeños. [9]

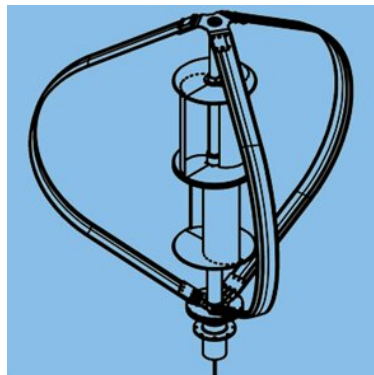


Figura 2.7: Turbina ds3000

Fuente: <https://www.etneo.com/turbina-ds3000/?lang=es>

La turbina presentada además cuenta con las siguientes características principales:

- Tipo de palas: 4 Savonius, 3 Darrieus.
- Generador: Trifásico.
- Potencia nominal: 3 [kW]
- Voltaje: 48 [V] / 220 [V]
- Area barrida: 10,5 [m^2]
- Diámetro: 4[m]
- Masa: 680 [kg]
- Altura: 4,11 [m]

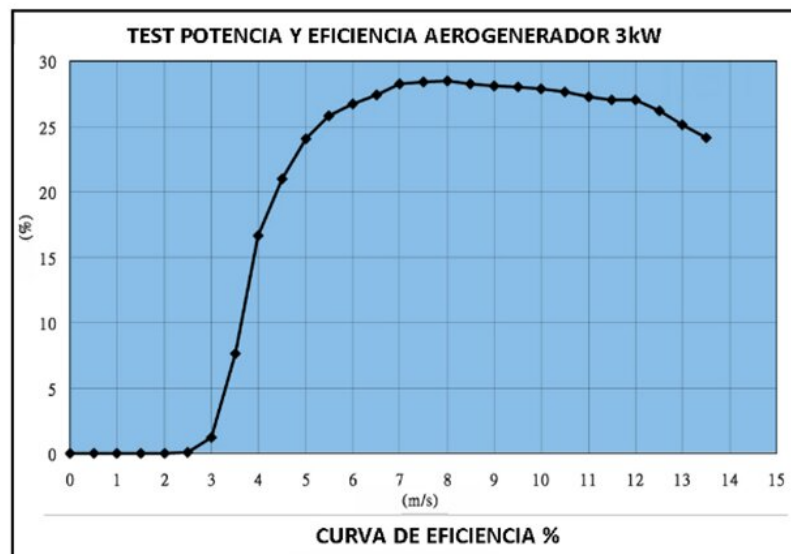


Figura 2.8: Curva de eficiencia de la turbina DS3000

Fuente: <https://www.etneo.com/turbina-ds3000/?lang=es>

2.3.2 Turbina Smaraad Sx

La turbina eólica de eje vertical Smaraad Sx [10], cuenta con un sistema Darrieus-Savonius que incorpora palas de diseño curvo que utiliza el recurso eólico de forma efectiva y con alta eficiencia, funciona con velocidades de viento de entre 2,5 a 25 [m/s], además de esto es ligero, pequeño y se estima que tiene 20 años de vida útil, está certificado por la norma IEC y tiene aplicaciones tanto domésticas como marinas, algunas de sus características son:

- Altura: 1200 [mm]
- Material de aspa: Fibra de Nylon
- Número de palas: 3
- Potencia: Desde 300 [W] hasta 10 [kW]
- velocidad nominal del viento: 13 [m/s]
- Voltaje: 24 [V] / 48 [V]
- Nivel de ruido: 30 [db]

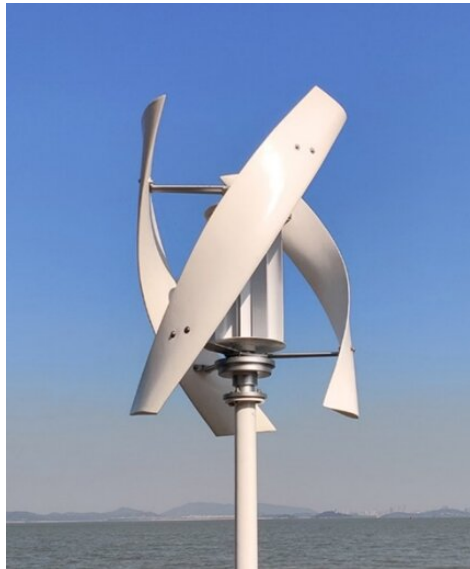


Figura 2.9: Turbina Smaraad Sx instalada

<https://es.aliexpress.com/item/1005004128900618.html?spm=a2g0o.detail.0.0.2c362244cTt6Q6>

2.3.3 Vertical Sky A32

Este aerogenerador ha sido propuesto por la empresa suiza “Agile Wind Power”, con el objetivo de reducir aún más el impacto de la industria eólica en el medio ambiente. Han sido de las primeras VAWT modernas de gran tamaño que cumplen con las certificaciones internacionales para grandes aerogeneradores (IEC 61400). Esta además tiene una baja velocidad de rotación, lo cual permite tener bajas fuerzas centrífugas y esfuerzos en la estructura. Mide 105 [m] de alto, con un diámetro de rotor de 32 [m], con una potencia nominal de 750 [kW].

Este aerogenerador, funciona de mejor manera que otros modelos y además es más silencioso, una turbina moderna, suele producir entre los 96-101 [dB] de nivel sonoro, mientras

que el Vertical Sky A32, solamente produce 86 [dB]. Su diseño permite que sea instalada en espacios más reducidos, puesto que su disposición compacta hace que las estelas turbulentas no interfieran en gran manera con las turbinas posteriores. [11]



Figura 2.10: Turbina Sky A32 instalada

Fuente: <https://www.cdt.cl/vertical-sky-a32>

2.4 Normativa

La comisión de electrónica internacional (IEC) es una organización de primer rango la cual elabora las normas internacionales aplicables a tecnologías eléctricas y electrónicas, para así garantizar que los métodos de pruebas a escala mundial sean los correctos, esto es sumamente importante tanto para los trabajadores como para los consumidores, puesto que los dispositivos instalados o comercializados deben cumplir con esta normativa para disminuir todo riesgo de exposición que se pueda tener.

Respecto a la estandarización de las turbinas eólicas, existe la lista de normas IEC 61400, dentro de los artículos más destacables se pueden mencionar:

- 61400-1: Requisitos de diseño
- 61400-2: Requisitos de diseño para aerogeneradores pequeños
- 61400-11: Técnicas de medición del ruido acústico
- 61400-12: Pruebas de rendimiento de energía de turbinas eólicas
- 61400-13: Medición de cargas mecánicas
- 61400-14: Declaración del nivel de potencia sonora aparente y valores de tonalidad

- 61400-21: Medición y evaluación de las características de calidad de la energía de la red conectada a turbinas de viento
- 61400-24: Protección contra rayos.

En el ámbito nacional, se cuenta con la norma chilena (NCh), en donde se solicita que todos los aerogeneradores deben cumplir con las normas IEC 61400-2, IEC 61400-11, IEC 61400-12, IEC 61000-6.1 y IEC 61000-6.2 o equivalentes, además cada aerogenerador debe llevar de forma visible e indeleble sus especificaciones técnicas, no se deben instalar en ninguna circunstancia aerogeneradores que presenten defectos y se deben respetar las condiciones ambientales haciendo énfasis en la norma IEC 61400-2. [12]

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1 Construcción de turbinas eólicas

Es fundamental conocer las partes de una turbina eólica para abordar los aspectos relacionados con esta tecnología, es por ello que se deben mencionar sus componentes principales, los cuales se dividen en el tren motriz, que es el conjunto de elementos responsables de convertir la energía cinética del viento en energía útil, y los álabes, que son las estructuras que capturan la energía del viento gracias a sus perfiles aerodinámicos.

Un tren motriz de un aerogenerador comprende todos los elementos giratorios esenciales, que incluyen el rotor, eje principal, acoplamientos, caja de engranajes, sistemas de freno y el generador. Todo esto desempeña un papel fundamental en la conversión de la energía eólica en energía utilizable. [2]

3.1.1 Eje

En todos los aerogeneradores, se tiene un eje principal, el cual se conoce comúnmente como eje de baja velocidad o eje del rotor, siendo este el principal elemento giratorio. Tiene como función transmitir el torque producido por la interacción del viento en los álabes hasta el resto de la cadena cinemática, está soportado por cojinetes, los cuales transfieren cargas de reacción al bastidor principal de la turbina. Es posible que los ejes y/o cojinetes se encuentren incorporados en la misma caja de engranajes, o por el contrario ser independientes a ella. Generalmente, los ejes se fabrican de acero, para proporcionar la robustez y resistencia necesaria para las turbinas, independientemente de su potencia.

3.1.2 Acoplamientos

Los acoplamientos cumplen una función fundamental a la hora de realizar conexiones entre los ejes. En los aerogeneradores, se deben considerar dos principales ubicaciones a la hora de emplear acoplamientos de gran tamaño, para así asegurar una transferencia efectiva de energía, estos pueden ser:

1. Entre el eje principal y la caja multiplicadora
2. Entre el eje de salida de la multiplicadora y el generador

3.1.3 Caja de engranajes

La caja de engranajes es incluida en la mayoría de sistemas de transmisión en los aerogeneradores, esta se utiliza con el fin de incrementar la velocidad del eje que va conectado directamente al generador, puesto que este aumento de velocidad resulta fundamental para un funcionamiento efectivo del generador, ya que, por ejemplo, los ejes principales de modelos pequeños de turbinas eólicas, alcanzan velocidades del orden de cientos de RPM, sin embargo la mayoría de generadores funcionan eficientemente a un orden de 1500-2000 RPM.

3.1.4 El generador

Este artefacto cumple un rol fundamental en el proceso de conversión de energía, transformando la potencia mecánica del rotor a energía eléctrica utilizable, todo esto, gracias al trabajo conjunto de sus dos elementos principales: El rotor (zona que está en movimiento) y el estator (zona que se mantiene quieta). Estos dos elementos permiten transformar la energía el movimiento del eje en energía eléctrica utilizable.

3.1.5 Frenos

Los frenos son elementos esenciales para tener seguridad y control sobre el aerogenerador, puesto que en caso de existir una ráfaga de viento de gran magnitud imprevista que pueda dañar el aerogenerador, estos deben ser activados para mantener el aerogenerador funcionando en un rango de velocidad adecuado, idealmente a una velocidad de viento no mayor a 25 m/s. Existen dos tipos de frenos principales los cuales son:

- **Freno mecánico:** Puede detener por completo la turbina
- **Freno aerodinámico:** Ralentiza el movimiento utilizando la resistencia del viento en las aspas.

3.2 Turbinas eólicas

Las turbinas eólicas son máquinas encargadas de transformar la energía cinética del viento a energía mecánica en forma de potencia útil, estas pueden funcionar utilizando el principio de arrastre sobre sus álabes, como es el caso del rotor Savonius o también pueden producir el movimiento del rotor mediante la sustentación como lo hace la turbina Darrieus. Dentro de la clasificación más general existente en turbinas eólicas, se tienen aquellas de eje horizontal y las de eje vertical.

3.2.1 Turbina de eje horizontal

También llamadas HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) cuentan con un eje paralelo al suelo y sus palas giran en posición perpendicular a la dirección del viento, dentro de estas se pueden encontrar dos principales tipos: **upwind** las cuales rotan estando opuestas a la dirección del viento y las **downwind** que rotan estando a favor del viento. [13]



Figura 3.1: Turbinas eólicas de eje horizontal

Fuente: <https://www.ecoticias.com/energias-renovables/76683>

Dentro de las principales características de las turbinas de eje horizontal se encuentran:

- Las palas de la turbina comienzan a moverse con velocidades de 3,5 [m/s] aproximadamente, y proporcionan la potencia máxima con unos 11 [m/s]. Al existir vientos muy fuertes, es decir, con velocidades mayores a los 25 [m/s], el aerogenerador debe activar su sistema de frenos para evitar vibraciones o tensión excesiva.

- Estas turbinas necesitan tener una orientación perpendicular respecto a la dirección del viento para poder funcionar, puesto que de esta forma se aprovecha al máximo la energía entregada por el viento y además se evita tener cargas extra por fatiga, por lo que deben utilizar un mecanismo de orientación del rotor.
- Existe un amplio rango de potencias que pueden alcanzar las turbinas eólicas de eje horizontal, que para aplicaciones residenciales van generalmente desde los 50 [KW] con diámetros de rotor de alrededor de 15 [m], hasta los 5 [MW] con diámetros de rotor de alrededor de 120 [m] para aplicaciones industriales.
- Estas turbinas pueden generar ruido, erosión en el suelo e impacto en la avifauna tanto como por su gran tamaño de rotor, como por la estela turbulenta generada, por lo que es importante buscar soluciones o alternativas que puedan evitar este impacto al ecosistema.

3.2.2 Turbinas de eje vertical

Las turbinas de eje vertical (VAWT) rotan en torno a un eje ubicado al centro de la turbina con dirección perpendicular al suelo, su principal ventaja es que no necesitan modificar su orientación para aprovechar la energía del viento, ya que estas giran independiente de la dirección que el viento tenga. Dentro de este tipo de turbinas, existen varios diseños que difieren en la disposición y forma de los álabes.

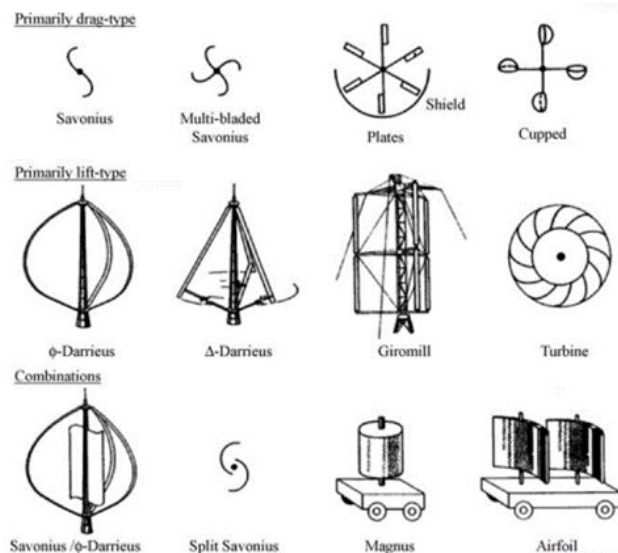


Figura 3.2: Tipos de VAWT.

Fuente: . F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Wiley & Sons, 2nd edition, 2010.

Las características principales de las turbinas eólicas de eje vertical son:

- El mantenimiento de las VAWT es más sencillo puesto que no se debe subir tan alto para llegar a las partes principales de la torre. La mayoría de las partes eléctricas y mecánicas de la estructura no están montadas en la parte superior.
- El diseño se puede reducir a tamaños muy pequeños, permitiendo ser una idea razonable para zonas urbanas, como la azotea de una edificación. Dentro de las ciudades, no siempre existe espacio para tecnologías de gran tamaño, por lo que esta alternativa cobra gran relevancia.
- Poseen menos piezas que las turbinas de eje horizontal, por lo que tienen menos componentes que sufran desgaste o el término de su vida útil, tampoco se necesitan piezas para soportar el cabeceo en la torre.
- La turbina no necesita estar orientada en una dirección específica, puesto que la energía del viento puede ser aprovechada independiente de la dirección de donde provenga.
- Son más baratas de producir que las turbinas de eje horizontal.
- En su mayoría son transportables de un lugar a otro debido a su tamaño compacto.
- Funciona con viento turbulento y en condiciones climáticas extremas.
- Son más silenciosas que las turbinas de eje horizontal.
- No todas las palas producen la misma energía al mismo tiempo, lo que limita la eficiencia de las turbinas verticales.
- Al estar cerca del suelo trabajan con velocidades de viento bajas, por lo que no producen mucha potencia. [14]

H-Darrieus

La turbina H-Darrieus posee palas con un perfil que se asemejan al ala de un avión, estas se unen al eje por medio de dos extremos. Su característica de captación omnidireccional del viento permite que pueda ser instalada sin la necesidad de tener una gran altura, puesto que aprovecha muy bien la energía eólica. Dentro de sus desventajas se encuentra el hecho de tener una gran complejidad en su forma constructiva, sumado además a que la masa del sistema gira alejada del centro, provocando fuerzas centrífugas que le adicionan inestabilidad y vibraciones al sistema, exigiendo de esta forma que la estructura sea más robusta y por

ende más masiva, sumado a estos inconvenientes, el torque que entrega es variable debido a la variación en la dirección de los perfiles aerodinámicos durante el giro.



Figura 3.3: Turbina H-Darrieus.

Fuente: <https://www.cgtrader.com/3d-models/exterior/other/h-type-darrieus-type-vertical-axis-wind-turbine-with-3-blades>

Dentro de las principales características del rotor H-Darrieus se encuentran:

- No necesitan torre para funcionar, por lo que pueden ser colocados incluso en el suelo.
- Su diseño se adapta a la corriente del viento.
- Se puede colocar fácilmente en edificios y en cualquier lugar en donde estén prohibidas las estructuras altas.
- Producen poca energía si son puestas a nivel del suelo, puesto que el viento es más turbulento y de menor velocidad.
- Necesita un arranque para poder funcionar.
- Su mantenimiento es complicado puesto que se debe desmontar toda la máquina para sustituir su cojinete principal. [15]

Turbina Savonius

Las turbinas Savonius son dispositivos simples que poseen dos o tres palas, su forma de funcionar se basa en el principio de arrastre para generar torque en el eje al que se conectan, al ser dispositivos de arrastre no pueden girar a una velocidad mayor a la del viento que lo mueve, por lo que la energía extraíble es menor a la de las turbinas de sustentación. El

diseño de estas turbinas contiene una superficie cóncava y otra convexa, en donde la superficie convexa posee un menor arrastre que la superficie cóncava ya que está sometida a menor resistencia en caso de moverse en contra del viento. Debido a su diseño, se pueden generar ineficiencias, puesto que la pala cóncava con mayor arrastre genera el movimiento de la turbina, pero la pala convexa, a pesar de tener poco arrastre, contrarresta en menor medida el movimiento, por lo que estas turbinas suelen elegirse cuando se deben priorizar los costos por sobre la eficiencia, ya que son económicas y fáciles de mantener. [16]

Savonius-Rotor

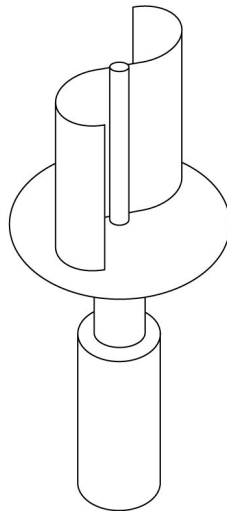


Figura 3.4: Turbina Savonius.

Fuente: <https://www.cgtrader.com/3d-models/exterior/other/h-type-darrieus-type-vertical-axis-wind-turbine-with-3-blades>

Dentro de las principales características del rotor Savonius se encuentran:

- Debido a la sencillez en su diseño, es un aerogenerador de bajo costo, además de que es fácil de mantener.
- El aerogenerador es capaz de partir a bajas velocidades, con una eficiencia que va disminuyendo a medida que aumenta la velocidad, por lo que son útiles cuando la necesidad de energía es baja.
- Las palas no necesitan mecanismos y monitoreos para modificar los ángulos.
- Posee bajo nivel de ruido.
- Tiene bajo rendimiento para altas cargas y velocidades.

Las VAWT en el futuro

A pesar de que las turbinas de eje horizontal logran mayor potencia que las de eje vertical, estas últimas, ofrecen una serie de ventajas que las hacen más versátiles, entre ellas se encuentran su naturaleza omnidireccional, menor dificultad de mantenimiento, posibilidad de tener una menor distancia entre turbinas, un costo de producción más bajo y menor ruido e impacto en la avifauna. Cada año las innovaciones en ingeniería buscan incrementar la eficiencia en la producción de energía de las VAWT, lo cual hace que aumenten las ventajas que estas pueden brindar para diversas aplicaciones, por lo que a pesar de presentar algunas desventajas en comparación con las HAWT, sus atributos particulares las hacen objeto interesante de estudio, puesto que a futuro podrían llegar a ser una alternativa muy competitiva en la industria.

A continuación, se presenta una tabla resumen con las características principales de las turbinas eólicas de eje horizontal y de eje vertical:

Tabla 3.1: Características HAWT y VAWT

Características	Eje Horizontal	Eje vertical
Orientación de la turbina	Perpendicular	Omnidireccional
Rango de potencia	50 [KW]- 5[MW]	100 [W] - 10 [KW]
Dificultad del mantenimiento	Alta	Media
Tamaño rotor	15 [m] - 120[m]	1[m] - 30[m]
Número de piezas	Alto	Bajo
Transporte	Difícil	Fácil
Funcionamiento en condiciones complejas	Limitado	Soporta vientos Turbulentos
Costo de producción	Alto	Medio
Impacto en el Medio ambiente	Ruido, erosión, impacto en la avifauna	Ruido bajo, menor impacto en avifauna
Eficiencia	Alta	Baja

3.3 Fundamentos de la aerodinámica

La aerodinámica es un área de la mecánica que estudia el movimiento de gases o fluidos, esto ayuda a comprender la interacción y fuerzas que se generan con cuerpos de geometrías particulares. Es fundamental comprender estos principios para discutir lo que se puede llegar a lograr con un aerogenerador, ya que gran parte de ellos utilizan la sustentación como principio de funcionamiento, la cual se logra utilizando perfiles aerodinámicos en los álabes de la turbina.

3.3.1 Perfil aerodinámico

El perfil aerodinámico se forma con estructuras de geometrías específicas, las cuales buscan generar fuerzas a través del movimiento relativo entre el fluido y la superficie. El estudio de estos perfiles, permite conocer durante la etapa de diseño una serie de variables relevantes para el funcionamiento de la turbina, tales como la potencia máxima y la eficiencia, permitiendo además conseguir diversos resultados variando parámetros relevantes del perfil durante la modelación computacional [17]. Para entender la conformación de un perfil alar, es necesario conocer las siguientes definiciones:

1. Extradós: Parte superior del perfil, de mayor distancia que la inferior, lo cual produce una mayor velocidad en el flujo, generando de esta forma una menor presión en esta zona.
2. Intradós: Parte inferior del perfil aerodinámico, de menos distancia que la superior, lo cual produce una menor velocidad del flujo, generando de esta forma una mayor presión en la zona.
3. Borde de ataque: Zona delantera del perfil, es el primer punto en que interacciona al flujo en caso de venir de paralelo a él.
4. Borde de salida: También conocido como punto de fuga, es la zona trasera del perfil, en donde se encuentra el fluido que sale del extradós y del intradós
5. Cuerda: Línea recta que conecta el borde frontal (de ataque) con el borde de salida, esta permite definir el factor de tamaño ($k = 4c$) en la transformada de Joukovsky para el mapeo del perfil aerodinámico.
6. Combadura media: Línea imaginaria que pasa por entremedio del intradós y el extradós, desde el borde de ataque hasta el bode de salida.

7. Espesor máximo: Mayor separación entre el intradós y el extradós.
8. Combadura máxima: distancia máxima entre línea de combadura media y la cuerda.

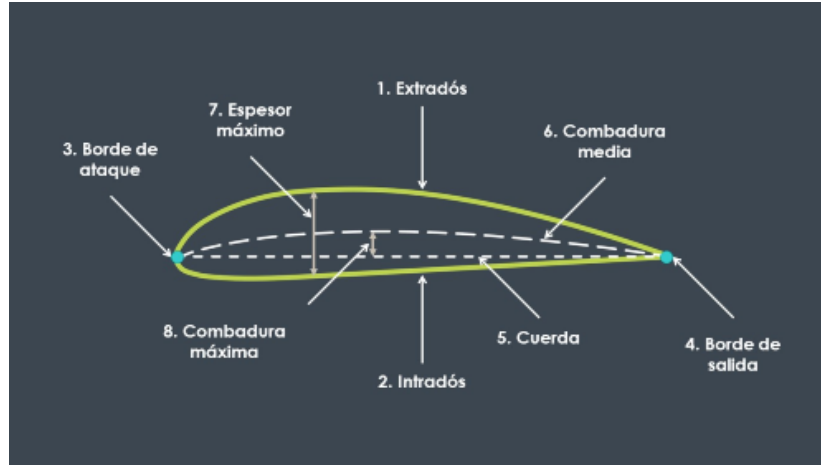


Figura 3.5: Parámetros relevantes de un perfil alar

Fuente: <https://vuela.com.mx/am/articulos/articulos-de-actualidad/12643-perfil-aerodinamico-partes-y-nomenclatura-naca-4-digitos.html>

3.3.2 Perfil NACA de 4 dígitos

Para la turbina a modelar, se utiliza un perfil NACA de 4 dígitos, el cual es NACA4415, cada dígito representa una característica específica del perfil alar, las cuales vienen dadas por:

- Primer dígito: Indica el valor porcentual de tamaño de la combadura máxima respecto a la cuerda, para este caso, la combadura máxima es un 4% de la cuerda.
- Segundo dígito: Indica en qué posición se encuentra la combadura máxima respecto de la cuerda, tomando como punto de partida el borde de ataque, para calcularlo, basta con dividir este valor por 10, y multiplicarlo por el valor de la cuerda, para este caso resulta ser: $\frac{4 \cdot c}{10}$
- Los últimos dos dígitos entregan el porcentaje del espesor máximo del perfil respecto al tamaño de la cuerda, para este caso, el espesor máximo del perfil tiene un 15% del tamaño de la cuerda.

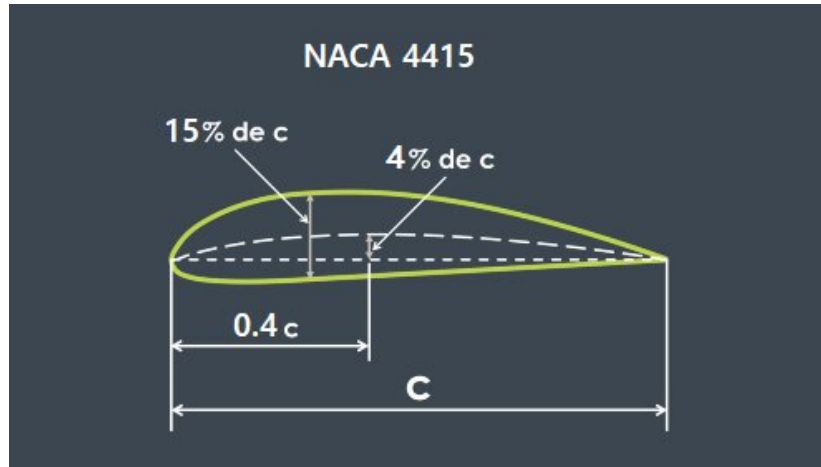


Figura 3.6: Parámetros relevantes de un perfil alar

Fuente: <https://vuela.com.mx/am/articulos/articulos-de-actualidad/12643-perfil-aerodinamico-partes-y-nomenclatura-naca-4-digitos.html>

Por último, es necesario conocer definiciones físicas relevantes para entender qué fuerzas se generan en el perfil, las cuales son las siguientes:

- Flujo de aire: Es la masa de aire que se enfrenta con un ángulo de ataque α al perfil alar.
- Ángulo de ataque: Ángulo que se forma entre la línea de la cuerda del perfil y la dirección del flujo de aire.
- Fuerza de sustentación: Es una fuerza producto de las diferencias de presión entre la parte inferior y superior del perfil alar, se define perpendicular a la dirección del flujo de aire respecto al ángulo de ataque.
- Fuerza de arrastre: Es una fuerza producto de la viscosidad del flujo, este al interactuar con la superficie aerodinámica produce fuerzas de fricción viscosas dando como resultado una fuerza en la misma dirección y sentido al flujo de aire.

En el caso de las turbinas eólicas, las palas de los aerogeneradores deben poseer una geometría idónea, por lo que se deben estudiar las relaciones entre largo y ancho, en conjunto a la forma geométrica, para así maximizar la potencia a generar.

3.3.3 Principios de la modelación física y análisis aeroestructural

Las expresiones más importantes a considerar para el estudio de un fluido newtoniano incompresible, presentan ecuaciones diferenciales parciales para cada uno de los ejes del plano cartesiano (x,y,z) las cuales aplican principios fundamentales de la termodinámica y la mecánica. Referente a la presente investigación, se debe considerar lo siguiente:

Conservación de la masa

La masa no se crea ni se destruye, por lo que, al estudiar un fluido dentro de un volumen de control, la masa permanece constante al pasar el tiempo, lo cual puede ser expresado matemáticamente de la siguiente manera:

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (3.2)$$

Donde ρ representa a la densidad del fluido mientras que $\mathbf{V}$ describe las componentes cartesianas de la velocidad, dadas por $\mathbf{V}(x, t) = u(x, t)\hat{i} + v(x, t)\hat{j} + w(x, t)\hat{k}$

Conservación del momento

Nace a partir de la segunda ley de Newton, llevado al campo de la mecánica de fluidos se puede decir que, si existen cambios en la cantidad de movimiento, quiere decir que existe una fuerza distinta de cero actuando sobre el elemento de fluido. [18]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \sum_{n=1}^n F \quad (3.3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla) V \right) = -\nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 V \quad (3.4)$$

Energía

En el caso de estudio, no se considerarán las ecuaciones relacionadas a energía interna derivadas de la primera ley de la termodinámica, debido a que no se profundizará en las variaciones de temperaturas presentes en la estructura.

Número de Reynolds

Este es un parámetro adimensional de suma importancia a la hora de identificar el comportamiento y tipo de flujo que se tiene, un número de Reynolds bajo indica flujo laminar, mientras que, por el contrario, un número de Reynolds alto se atribuye a un flujo turbulento. Se calcula de la siguiente manera:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} \quad (3.5)$$

En donde:

- ρ = densidad del fluido
- V = velocidad
- L = largo característico
- μ = viscosidad cinemática

Ecuaciones de potencia

La ecuación de energía cinética permite calcular la cantidad de energía que llevan las masas de aire en movimiento, esto es relevante pues a partir del resultado que se obtenga, se puede tener una idea del máximo teórico que se puede llegar a obtener con la turbina.

$$Ec = \frac{1}{2} m V^2 \quad (3.6)$$

En donde "m" corresponde a la masa del elemento de estudio y "V" indica su velocidad. Si se escribe la energía cinética utilizando un flujo másico a través del tiempo " $\dot{m}$ ", se llega a una expresión de potencia la cual viene dada por la siguiente ecuación:

$$P_w = \frac{\dot{m} V^2}{2} = \frac{\rho A V^3}{2} \quad (3.7)$$

Esta potencia representa un valor máximo teórico de energía presente en el viento, ante esto, el físico Alemán Albert Beltz, desarrolla un modelo matemático en donde encuentra que lo máximo que puede aprovechar una turbina eólica respecto a la potencia entregada por el viento es un 59,3% [2].

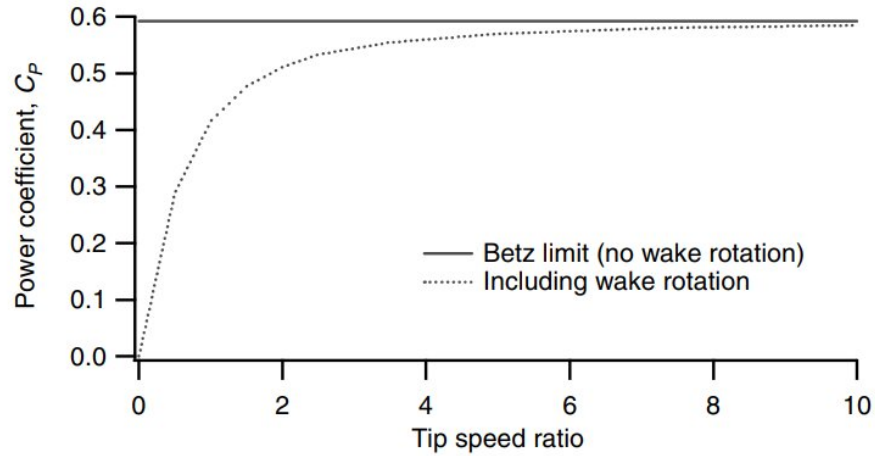


Figura 3.7: Límite de beltz

Fuente: . F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Wiley & Sons, 2nd edition, 2010.

Se define además el coeficiente de potencia, parámetro adimensional que representa la razón entre la potencia generada por la turbina P_t y la potencia del viento P_w .

$$C_p = \frac{P_t}{P_w} \quad (3.8)$$

Existe otro parámetro adimensional llamado velocidad específica λ el cual surge de la necesidad de corregir incongruencias que se puedan producir conceptualmente para los cálculos.

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (3.9)$$

Se puede observar que relaciona la velocidad entre las puntas de las aspas y el viento, esto se hace para tener en consideración aquellas situaciones en donde exista mucha diferencia entre ellas, permitiendo visualizar de mejor manera el comportamiento de la turbina, debido a esto, además se define el coeficiente de torque el cual viene dado por:

$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} \quad (3.10)$$

Finalmente para el caso de estudio es importante conocer la razón de aspecto (AR), la cual es la razón existente entre el diámetro de la turbina y su altura, esta debe mantenerse tanto en el modelo como en el prototipo a diseñar.

$$AR = \frac{D}{L} \quad (3.11)$$

Método de volúmenes finitos

Las ecuaciones de Navier Stokes han sido objeto de arduo estudio a lo largo de los años. Dentro de la dinámica de fluidos computacional, si bien, estas ecuaciones logran representar cualquier fenómeno físico dentro de la mecánica de fluidos, solo han logrado ser resueltas de manera analítica para flujos y geometrías de fácil construcción, utilizando una serie de simplificaciones para facilitar el planteamiento de la ecuación diferencial gobernante en cada problema, es por este motivo, que para situaciones más complejas en donde no exista solución analítica, se debe emplear el método de volúmenes finitos. Este método fue creado por McDonald, MacCormack y Paullay en la década de 1970, y tiene como base las ecuaciones de conservación de la masa, momentum y energía descritas en la sección (3.3.3), las cuales, pueden ser escritas de forma generalizada de la siguiente manera. [19]

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}}_{\text{Tiempo}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \phi)}_{\text{Convección}} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi)}_{\text{Difusión}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Generación}} \quad (3.12)$$

Los parámetros nuevos introducidos vienen siendo ϕ que representa la variable transportada, Γ es la constante de difusión y S_ϕ es el término fuente. De forma más específica, cada término de la ecuación viene representado de la siguiente manera:

- **Tiempo:** Tasa de cambio de la variable ϕ transportada a través del tiempo en un medio de densidad ρ .
- **Convección:** El término convectivo de la ecuación de Navier Stokes se relaciona a la tasa de dilatación volumétrica de un elemento diferencial del fluido.
- **Difusión:** Todo este término en su conjunto representa las fuerzas de cuerpo debido a la viscosidad del fluido, donde el coeficiente de difusión queda denotado como Γ .
- **Generación:** Este último término (S_ϕ) es asociado a la fuente, la cual físicamente es la tasa neta de creación de la propiedad ϕ

La base del método de volúmenes finitos, consta de la representación del dominio completo, en pequeños volúmenes de control, para lograr esto, es que se crea una malla computacional, en donde las variables van siendo almacenadas en nodos, los cuales pueden estar ubicados en los vértices de los volúmenes de control, o en el centro de cada volumen, permitiendo de esta manera ser la representación numérica del comportamiento físico del problema a resolver, lo que es fundamental para aproximar la solución para el dominio completo. [20] Como referencia se tiene la figura (3.8)

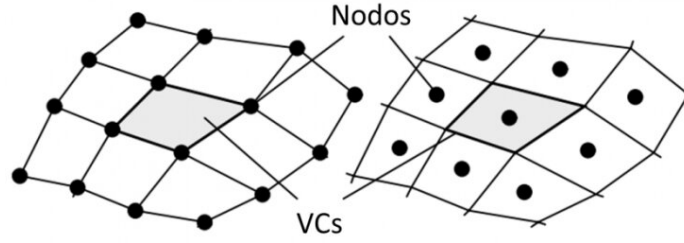


Figura 3.8: Nodos y VCs

Fuente: <https://www.esss.co/es/blog/el-metodo-de-volumenes-finitos/>

Tras definir cada volumen de control, las ecuaciones de conservación son reescritas de forma integral para cada volumen, para conseguir esto, se debe integrar la ecuación (3.12) y aplicar teorema de la divergencia de Gauss y así convertir los operadores de divergencia a integrales de superficie, quedando de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi dA = \oint_A \Gamma \nabla \phi dA + \int_V S_\phi dV \quad (3.13)$$

Finalmente, para el cálculo numérico se debe cambiar el dominio continuo representado por la ecuación (3.13) por un dominio discreto, esto, por medio de un conjunto de pequeños volúmenes de control, los cuales son utilizados para resolver el conjunto de ecuaciones de manera numérica. Con ello la ecuación debe ser planteada como una sumatoria de los volúmenes de control presentes en la malla, lo cual queda representado de la siguiente manera:

$$V_{celda} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \sum_{f=1}^N \rho_f V_f \phi_f A_f = \sum_{f=1}^N \Gamma_f \nabla \phi_f A_f + S_\phi V_{celda} \quad (3.14)$$

En resumen, el método de volúmenes finitos consta de los siguientes pasos fundamentales:

1. Descomponer el dominio en volúmenes de control.
2. Formular las ecuaciones integrales de conservación para cada volumen de control.
3. Aproximar numéricamente las integrales.
4. Aproximar los valores de las variables en las caras y las derivadas con la información de las variables nodales.
5. Ensamblar y resolver el sistema algebraico obtenido.

3.4 Modelos

3.4.1 RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes)

Las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas son una reducción de las ecuaciones generales de Navier-Stokes, en estas ecuaciones, la solución en estado estacionario está desacoplada de las fluctuaciones a lo largo del tiempo del sistema. La técnica que se utiliza para derivar estas ecuaciones es la descomposición de Reynolds, en donde se aplica un promedio temporal a las ecuaciones de Navier-Stokes, esto se realiza para eliminar parcial o totalmente la variable temporal, dividiendo en este caso la velocidad media del flujo (independiente del tiempo) y fluctuaciones de velocidad que varían en el tiempo, [21] esto puede ser expresado de la siguiente forma:

$$u(x, t) = \bar{u}(x) + u'(x, t) \quad (3.15)$$

En donde $\bar{u}(x)$ corresponde a la velocidad promedio, mientras que $u'(x, t)$ representa una fluctuación en la velocidad, al sumarse da como resultado la velocidad a utilizar en las ecuaciones promediadas de Navier Stokes. Debido a esta consideración, existe una reformulación a las ecuaciones originales de Navier Stokes, obteniendo de esta manera una expresión similar a la original, pero con una variable adicional, es por esta razón que el modelo requiere más ecuaciones para poder cerrarse, a continuación, se presenta la ecuación promediada de Reynolds:

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_i} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial \bar{x}_j} [-\bar{p} \delta_{ij} + 2\mu \bar{S}_{ij} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j] \quad (3.16)$$

Donde la media del tensor de velocidad de deformación viene dada por:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial \bar{x}_i} \right) \quad (3.17)$$

Mientras que el término adicional que aparece en la ecuación, llamado tensor de esfuerzos de Reynolds es:

$$\tau = \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (3.18)$$

3.4.2 Modelos de dos ecuaciones

Estos son los principales modelos de simulación de turbulencia utilizados para aspectos industriales, ya que forman un sistema que incluye todos los elementos del modelado RANS, sirviendo incluso para geometrías complejas. Estos modelos incluyen dos ecuaciones de transporte adicionales las cuales tienen como objetivo representar las propiedades de turbulencia del flujo, con esto se logra considerar la convección y difusión de energía turbulenta. La variable más común dentro de estas ecuaciones es la energía cinética “ k ” y la otra variable que se puede presentar es la disipación turbulenta “ ϵ ”, para el modelo $k-\epsilon$ o la tasa de disipación turbulenta específica ω , esta segunda variable es la que determina la escala de turbulencia (ya sea en longitud o tiempo). [22]

3.4.3 Modelo SST $k-\omega$

Este es un modelo de viscosidad turbulenta que combina los modelos $k-\omega$ y el $k-\epsilon$ para tener coherencia tanto en la zona de la pared como en la corriente libre, siendo adecuado para todo el campo de flujo, esto se debe a que el modelo $k-\omega$ predice adecuadamente el flujo en la subcapa viscosa, es decir, cerca de la pared, mientras que el modelo $k-\epsilon$ lo simula en regiones alejadas de esta, teniendo menor sensibilidad a las condiciones de flujo libre. Utiliza además un limitador de esfuerzo cortante que evita la acumulación de energía cinética turbulenta excesiva cerca de los puntos de estancamiento e incluso simula la influencia de la rugosidad de la pared. [23]

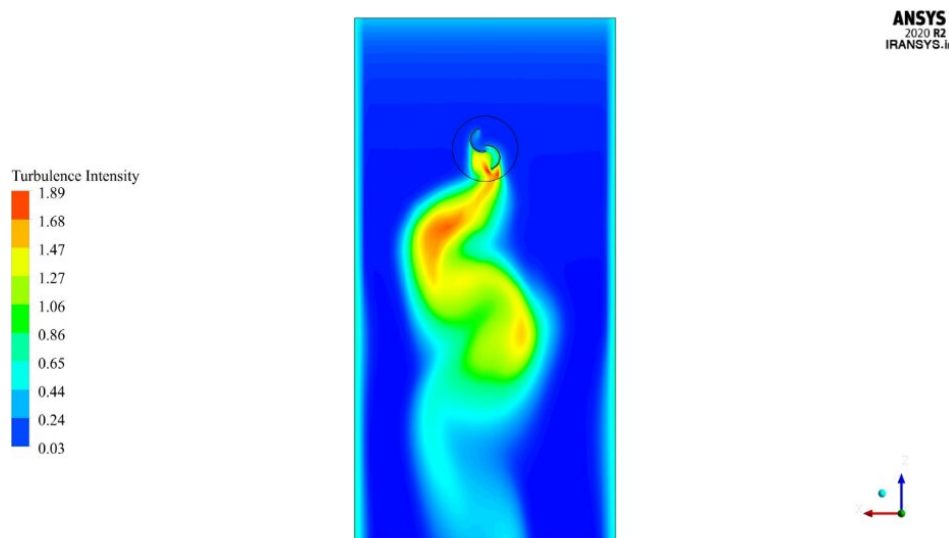


Figura 3.9: Turbina savonius simulada con SST $k-\omega$

Fuente:

<https://www.mr-cfd.com/shop/savonius-two-blade-wind-turbine-cfd-simulation-3-d-ansys-fluent-training/>

3.4.4 Modelo RNG

El modelo Re-Normalisation Group (RNG) usado para re-normalizar las ecuaciones de Navier-Stokes, se utiliza para tener en cuenta las pequeñas escalas de movimiento, esto nace del modelo $k - \epsilon$ estándar, en donde la viscosidad turbulenta es calculada a partir de solo una escala de longitud de turbulencia, lo cual conlleva a que la difusión sea calculada solo en esta escala específica, sin embargo esto no es tan representativo de la realidad, puesto que todas las escalas de movimiento contribuyen a la difusión turbulenta, es por esto que el modelo RNG modifica el modelo $k - \epsilon$ para poder explicar la turbulencia en distintas escalas de movimiento. [24]

3.4.5 LES (Large Eddy Simulation)

Large Eddy Simulation es una técnica propuesta en el año 1960 para representar flujos atmosféricos, esta permite simular la mecánica de fluidos logrando un equilibrio entre el tamaño de malla y eficiencia computacional, para esto se resuelven directamente las grandes escalas mientras que las escalas más pequeñas se modelan sin ser calculadas directamente. Esto además considera que los vórtices de gran escala son influenciados en gran medida por las condiciones de frontera mientras que la turbulencia a menor escala tiene información con una influencia más pequeña por parte de las condiciones de contorno, por lo tanto, no es tan crítica. A pesar de lo anterior mencionado, este modelo al resolver directamente parte de las ecuaciones de Navier Stokes resulta muy costoso computacionalmente para algunos problemas prácticos. [25]

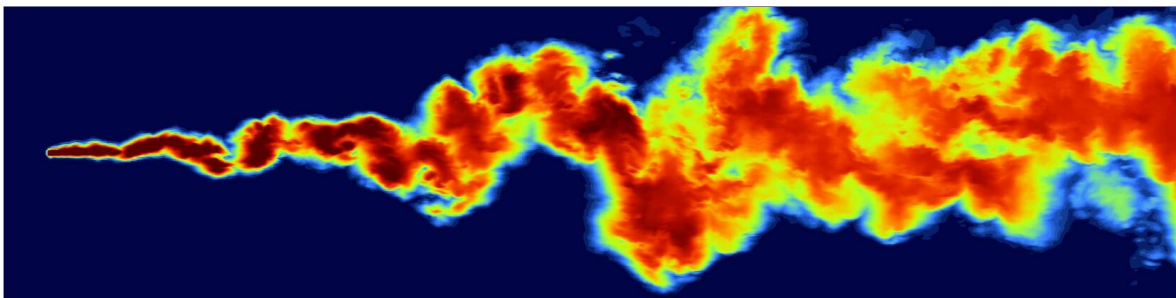


Figura 3.10: Large Eddy Simulation

Fuente: <https://comtessa-turbulence.net/large-eddy-simulation/>

3.5 Acoplamiento de la presión

los métodos SIMPLE, SIMPLEC, PISO y COUPLED son métodos de acoplamiento de presión usados en la dinámica de fluidos computacional para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes acoplando la velocidad y la presión en los sistemas en que exista un flujo incompresible. Cada uno de estos métodos aborda el acoplamiento de presión de forma distinta, usando distintos enfoques para asegurar la convergencia y eficiencia computacional dependiendo del caso que se requiera utilizar. [26]

3.5.1 SIMPLE

El algoritmo SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations) es recomendable para problemas de estado estacionario que se resuelvan de forma iterativa, esto debido a que no es necesario resolver por completo el acoplamiento lineal presión-velocidad ya que los cambios entre soluciones seguidas no son pequeños. La forma de obtener este algoritmo es aproximando el campo de velocidades tras resolver la ecuación de momento. Se debe formular además la ecuación de presión y resolverla para corregir la velocidad y reiterar este procedimiento. La ecuación de momento y de corrección de presión se resuelven implícitamente, mientras que la corrección de velocidad se resuelve de manera explícita, lo cual hace que el método sea semi-implícito

3.5.2 SIMPLEC

El algoritmo SIMPLEC de sus siglas (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent) es una modificación del algoritmo SIMPLE, puesto que sigue sus mismos pasos, con la diferencia en el uso de las ecuaciones de momento, utilizando simplificaciones u omisiones no tan significativas como lo hace el algoritmo SIMPLE. Este algoritmo, permite una convergencia rápida para problemas simples, por ejemplo, para flujos laminares.

3.5.3 PISO

El algoritmo PISO (Pressure implicit with splitting of operator) propuesto en 1986 por Issa, es una extensión del algoritmo SIMPLE. Este procedimiento, fue desarrollado originalmente para el cálculo no iterativo de flujos compresibles no estacionarios, pero de igual manera se logra adaptar a problemas estacionarios. Este algoritmo tiene un paso predictor y dos pasos correctores, satisfaciendo de esta manera la conservación de la masa utilizando pasos predictor-corrector. Las aproximaciones que utiliza este métodos son de mayor orden que en SIMPLE, lo cual puede tener mayor costo computacional.

3.5.4 COUPLED

Este método resuelve las ecuaciones de momento y continuidad de forma simultánea, mejorando de esta manera la convergencia de los resultados. En caso de utilizar un algoritmo basado en la presión, se puede aplicar para problemas de una fase teniendo además un buen desempeño para problemas que involucren máquinas giratorias. No es recomendable cuando se tienen flujos multifásicos, flujos másicos periodicos y casos de tipo NITA.

3.6 Condición CFL

En dinámica de fluidos computacional, la condición CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) es un criterio de estabilidad numérica, que se evalúa cuando se resuelven las ecuaciones diferenciales parciales utilizando métodos como el de volúmenes finitos, esta condición relaciona el tamaño del paso temporal, la velocidad de propagación del fluido y el espaciado de la malla para garantizar que la solución numérica sea estable.

Es por esta condición, que a la hora de elegir el paso de tiempo se debe tener en consideración la distancia que recorre un elemento de fluido en ese paso de tiempo, ya que esta, no debe superar el tamaño espacial mínimo de separación de la malla. Matemáticamente, la condición CFL se puede expresar como:

$$CFL = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \leq CFL_{max} \quad (3.19)$$

En donde:

- CFL es el número de courant (Adimensional).
- u es la velocidad del fluido.
- Δt Es el paso de tiempo.
- Δx Es el espaciado espacial.
- CFL_{max} Es el número de Courant máximo permitido para algún problema determinado.

En resumen, cumplir la condición de CFL permite evitar inestabilidades numéricas, como por ejemplo que la solución no converja o muestre oscilaciones no físicas, garantizando que la información no se propague demasiado rápido en relación a la discretización espacial.

Capítulo 4

Metodología

El diseño de las turbinas se saca de un estudio experimental que se menciona a futuro en el Capítulo 6. Estos datos deben ser considerados a la hora de crear la geometría en el Software Inventor, en donde se debe generar la geometría de tres turbinas: Savonius, H-Darrieus y Darrieus-Savonius para realizar una modelación de su comportamiento cuando se alcanza un tip speed ratio de 1, es decir, la velocidad tangencial de la turbina igual a la velocidad del viento. La condición de borde en la entrada del volumen de control, es una velocidad del viento de 8 [m/s]. Cabe mencionar, que las cotas en los bocetos de Inventor están en milímetros, para facilitar la visualización en las imágenes, pero en las descripciones y cálculos, estas medidas son tratadas en metros.

Para la simulación, el computador utilizado cuenta con un sistema operativo Windows 10 pro, procesador Intel(R) Xeon(R) Gold 520, memoria RAM de 128 (gb) y 28 procesadores lógicos.

4.1 Diseño en Inventor

4.1.1 Turbina Savonius

La construcción de la turbina Savonius es relativamente sencilla, pues está hecha de geometrías simétricas que pueden ser representadas con semicircunferencias con una orientación en sentido opuesto, ambas unidas a un eje central en torno al cual giran. Las cotas principales con las cuales se construye la turbina Savonius son las siguientes:

Tabla 4.1: Cotas turbina Savonius

Característica	Magnitud	Unidad
Altura	300×10^{-3}	[m]
Diámetro turbina	110.8×10^{-3}	[m]
Diámetro eje	12×10^{-3}	[m]
Espesor	2×10^{-3}	[m]

Para la generación de la turbina se siguen los siguientes pasos:

Paso 1: Se realiza un boceto de dos círculos con un diámetro de 54.4×10^{-3} [m], centrados en las coordenadas $(x_1, z_1) = (-27.2 \times 10^{-3}, 0)$ [m] y $(x_2, z_2) = (27.2 \times 10^{-3}, 0)$ [m], posterior a ello, con la herramienta desfase de inventor, se les da un espesor de 2×10^{-3} [m] a cada uno

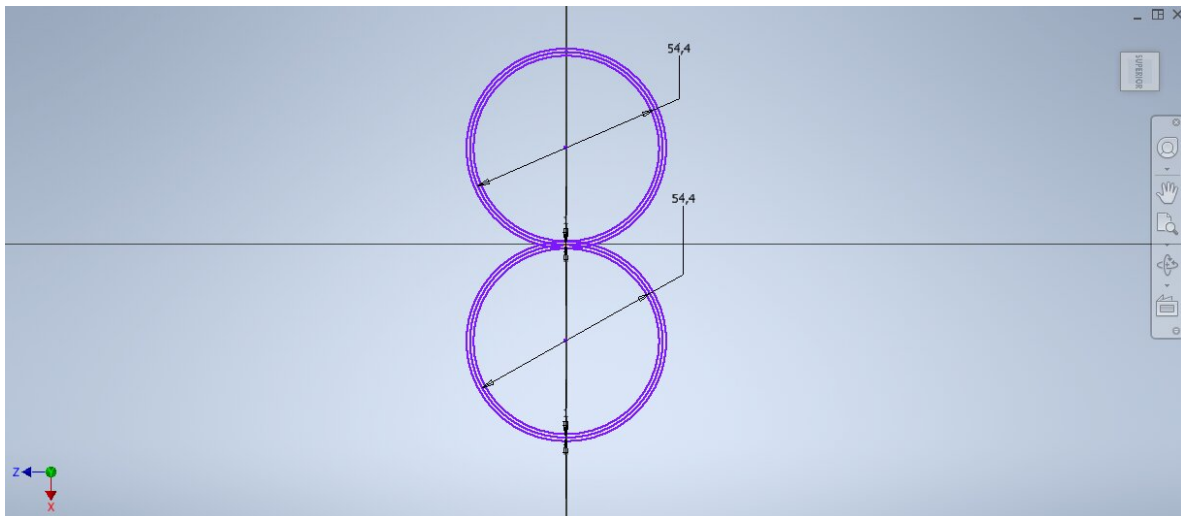


Figura 4.1: Boceto inicial turbina Savonius

Fuente: Elaboración propia.

Paso 2: Se realiza el boceto del eje central con 12×10^{-3} [m] de diámetro, y además se verifica que la cota del diámetro de la turbina cumpla con la razón de aspecto dada por el caso práctico a replicar, es decir $A.R = \frac{300 \times 10^{-3}}{110.8 \times 10^{-3}} = 2,7$. La cual es una característica del problema que se va a modelar.

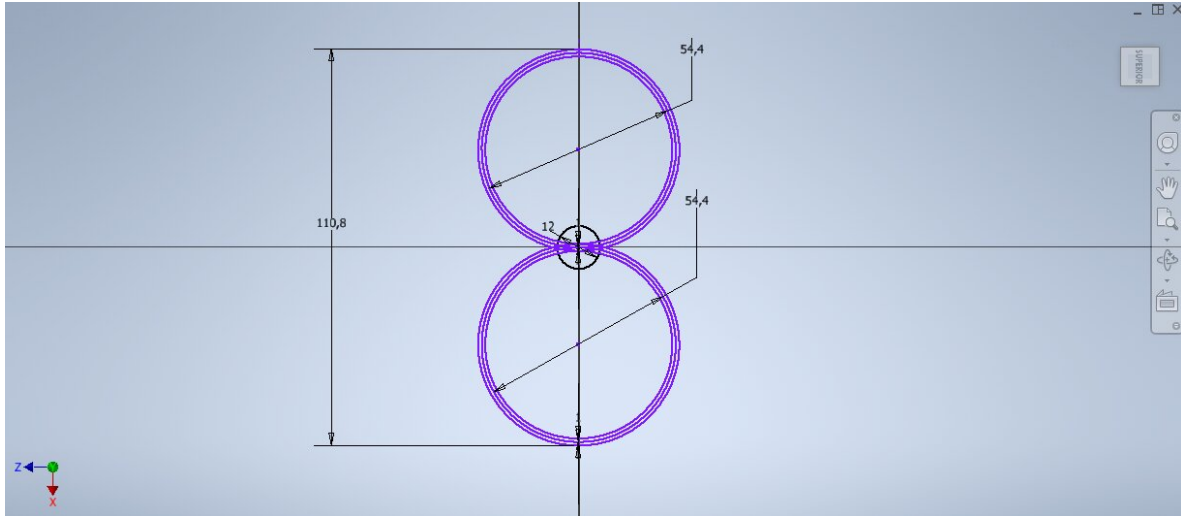


Figura 4.2: Verificación de cotas turbina Savonius

Fuente: Elaboración propia.

Paso 3: Con la herramienta recortar, se borran los bocetos que no son útiles para la creación de la turbina, con ello, se logra la geometría transversal característica de los aerogeneradores Savonius.

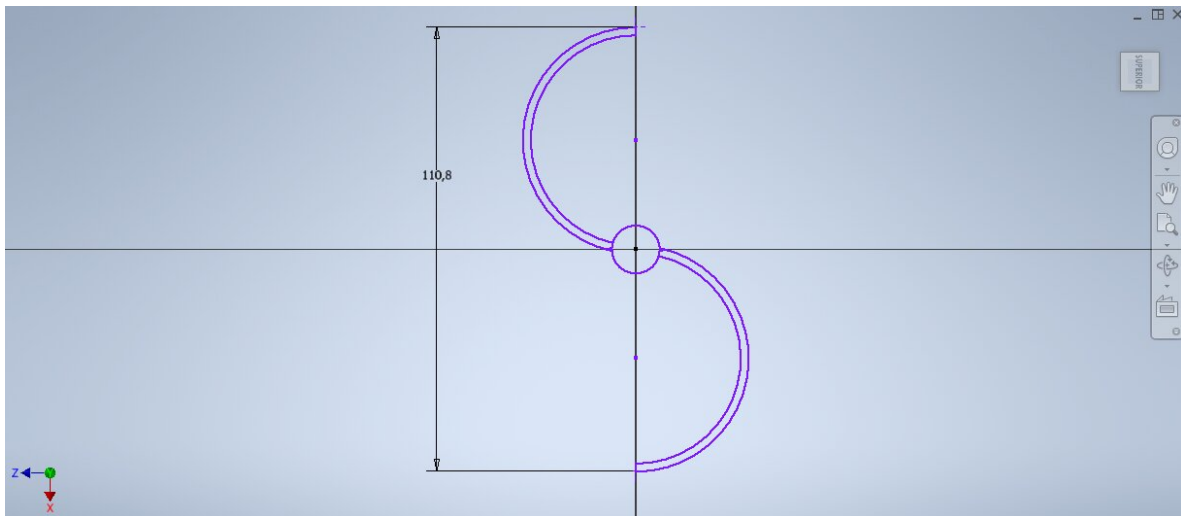


Figura 4.3: Boceto final de turbina Savonius

Fuente: Elaboración propia.

Paso 4: Se realiza una extrusión de 300×10^{-3} [m], lo cual representa la altura de la turbina, la dirección de la extrusión es simétrica, esto quiere decir que esta se realiza hacia ambos lados comenzando desde el eje central, por lo que queda la turbina centrada en $(x, y) =$

$(0, 0)$ con cotas en el eje y que van desde $(x_1, y_1) = (0, 150 \times 10^{-3})[\text{m}]$ hasta $(x_2, y_2) = (0, -150 \times 10^{-3})[\text{m}]$ haciendo un total de $300 \times 10^{-3} [\text{m}]$.

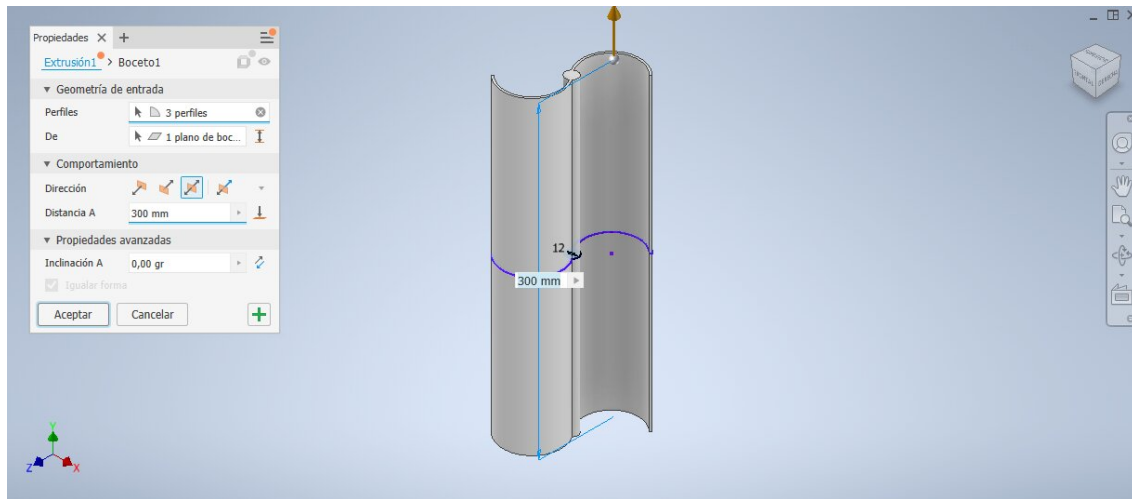


Figura 4.4: Extrusión turbina Savonius

Fuente: Elaboración propia.

Paso 5: En la ventana de iPropiedades en Inventor, se debe asignar el material de la turbina en la subsección "Propiedades físicas", se escoge el plástico PMMA, comúnmente utilizado para la construcción de prototipos de turbinas eólicas, de igual forma, revisando otro tipo de plásticos se tienen características similares. Esta asignación del material, se realiza para obtener la masa y el momento de inercia de la turbina al establecer un giro en torno al eje "y", este momento de inercia viene dado por "I2", estos datos son relevante cuando se programa la malla dinámica en ANSYS fluent. Los valores obtenidos para la masa y el momento de inercia son:

- Masa = 0,154 [kg]
- Momento de inercia = $180,997 [kg \cdot mm^2] = 0,000180997 [kg \cdot m^2]$

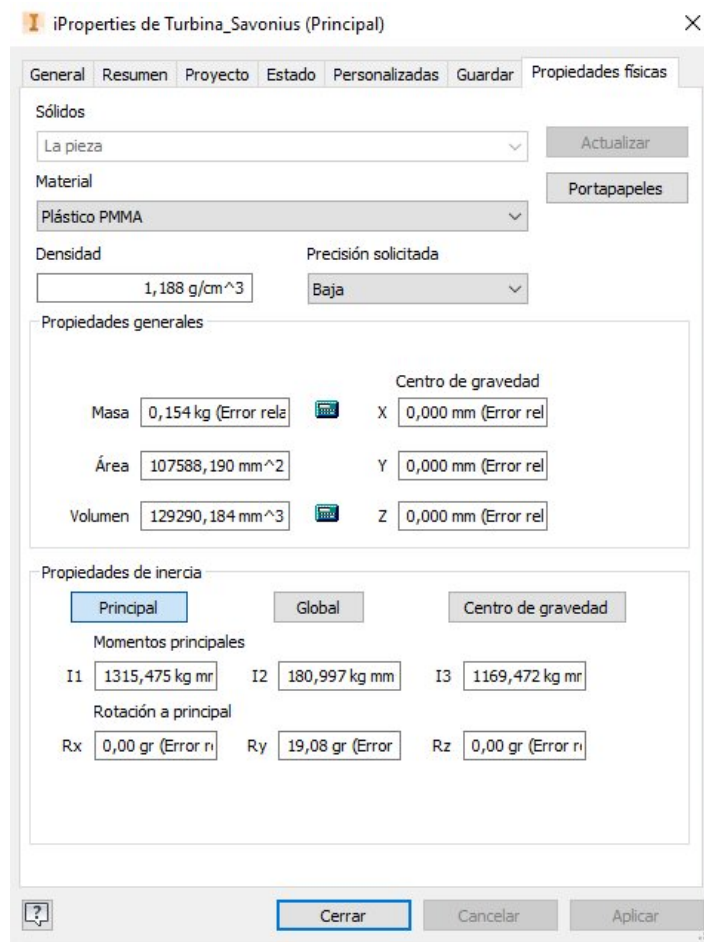


Figura 4.5: Propiedades turbina Savonius

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Turbina H-Darrieus

La construcción de la turbina Darrieus necesita de una geometría compleja, Inventor tiene una extensión comercial que genera perfiles alares, sin embargo, para este trabajo se utiliza un código abierto de Matlab (Anexo 1) para obtener los puntos en este perfil.

Paso 1: En el código de Matlab, se coloca la nomenclatura NACA 4415 la cual es la que se quiere utilizar para el caso de estudio, con ello se crea un perfil de 50 puntos, este perfil tiene una longitud característica de 1, por lo que luego se debe multiplicar por el valor del tamaño de la cuerda del perfil alar que se desee generar. Es importante que el perfil no tenga demasiados puntos, puesto que Inventor tiene problemas para generar el spline cuando son demasiados. A continuación, se muestra una imagen de la creación del perfil alar:

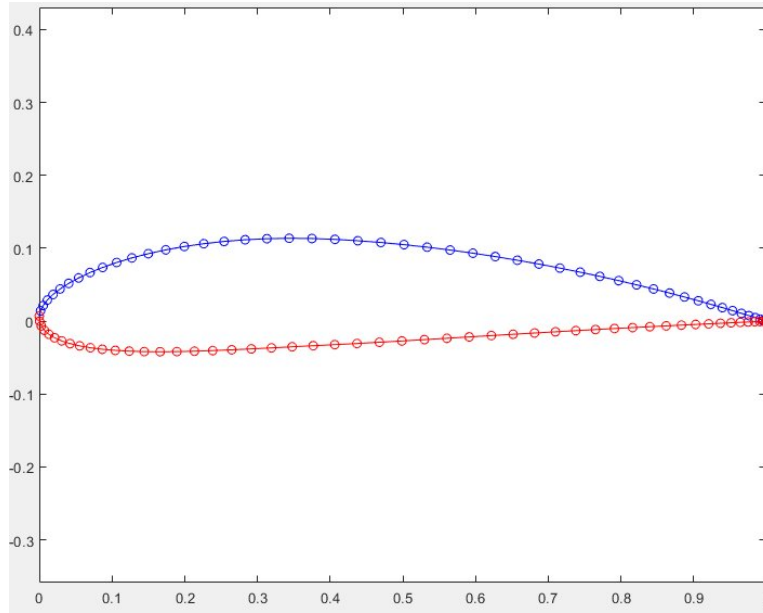


Figura 4.6: Creación perfil alar en MATLAB

Fuente: Elaboración propia.

Paso 2: Los puntos de Matlab deben ser transferidos a un bloc de notas, posteriormente llevados a Excel y multiplicarlos por el largo del perfil alar, en este caso por 60, lo cual le indica a Inventor la cantidad de milímetros del largo de la cuerda del perfil alar. Luego de esto, se importa el perfil alar a inventor.

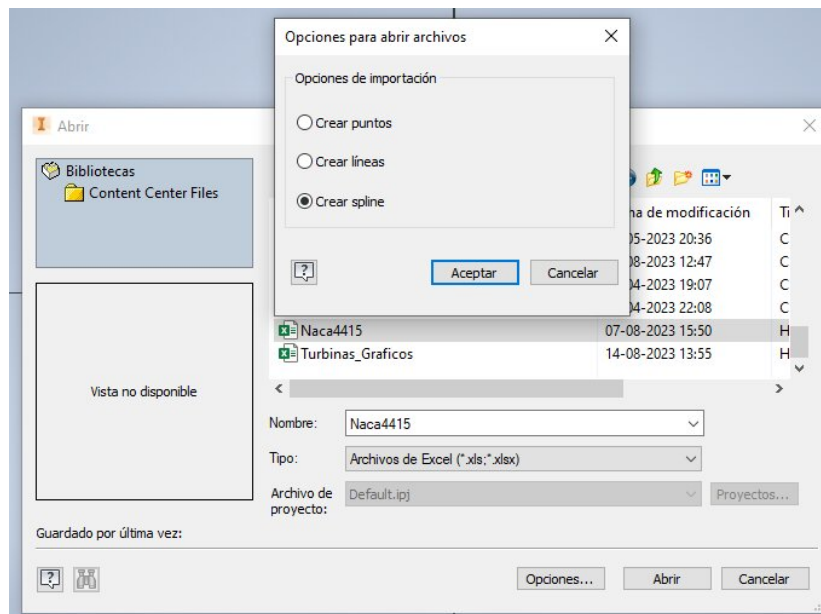


Figura 4.7: Importación de perfil alar a Inventor

Fuente: Elaboración propia.

Paso 3: Se orienta la geometría en el plano XZ y su borde de ataque es llevado a la posición $(x_1, z_1) = (25 \times 10^{-3}, 170 \times 10^{-3})[m]$. Si bien, el largo del perfil alar es $60 \times 10^{-3}[m]$, para que las distancias fueran simétricas este debería ser llevado al punto $(30 \times 10^{-3}, 170 \times 10^{-3})[m]$, sin embargo, se deja en el punto anterior mencionado para disminuir las ineficiencias que pueda generar un borde de ataque tan adelantado en el caso del aerogenerador híbrido. En la turbina del estudio no se especifica sobre esto, pero se puede observar en el boceto el perfil alar un poco más retrasado, tal y como se está haciendo acá.

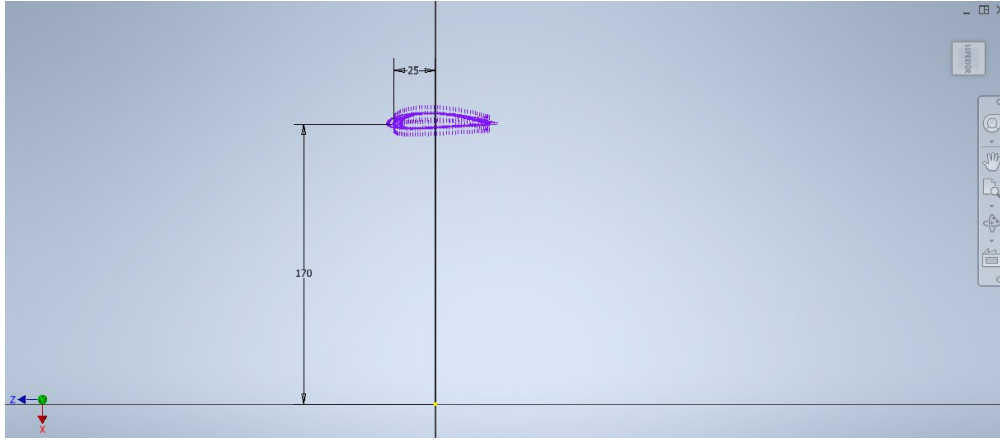


Figura 4.8: Importación de perfil alar a Inventor
Fuente: Elaboración propia.

Paso 4: Con la herramienta “circular” se genera el segundo perfil alar utilizando como centro el eje O, esta herramienta es muy conveniente puesto que permite realizar la cantidad de perfiles que se deseen y de manera simétrica, solamente colocando el número a utilizar, en este caso 2.

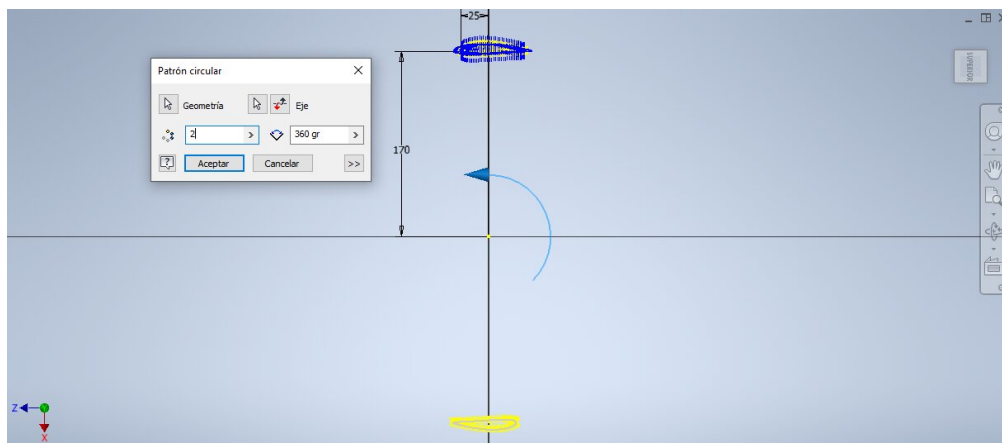


Figura 4.9: Operación circular turbina Darrieus
Fuente: Elaboración propia.

Paso 5: Ya teniendo los perfiles alares, se genera el boceto del eje central, se orienta en la dirección final y se verifican las cotas.

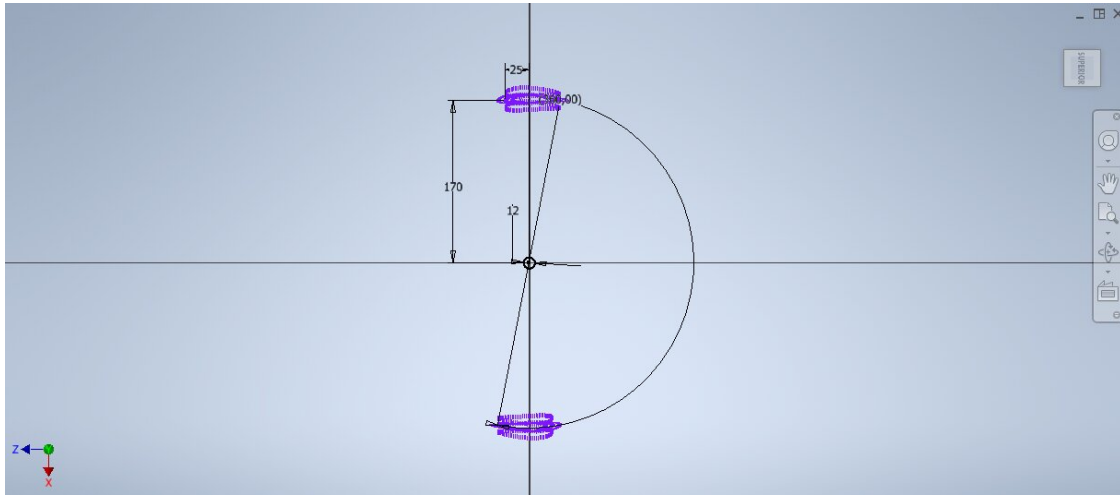


Figura 4.10: Boceto turbina Darrieus

Fuente: Elaboración propia.

Paso 6: Al igual que en el perfil Savonius, Se realiza una extrusión de 300×10^{-3} [m], lo cual representa la altura de la turbina, la dirección de la extrusión es simétrica.

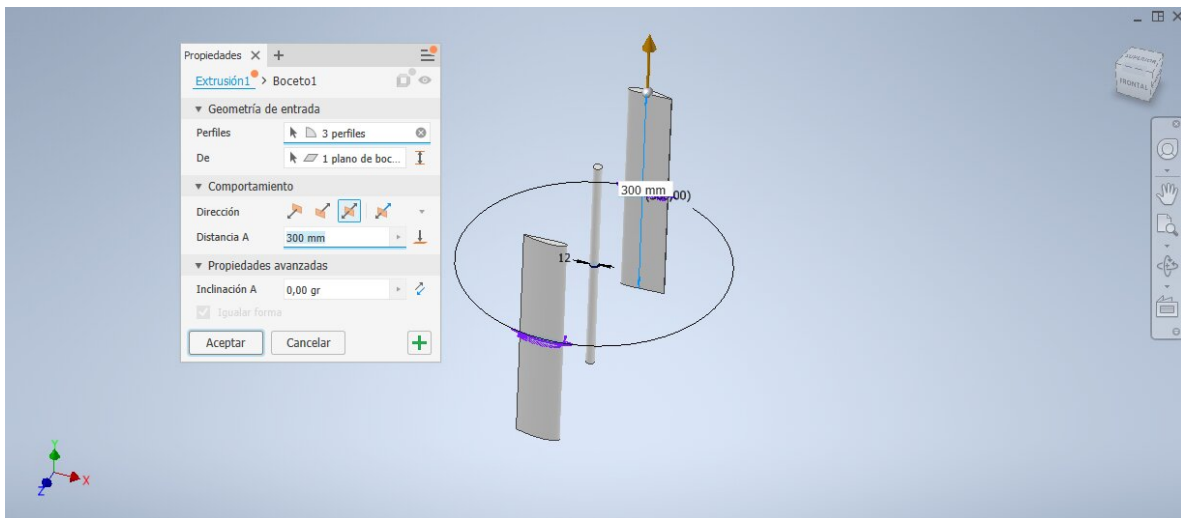


Figura 4.11: Extrusión turbina Darrieus

Fuente: Elaboración propia.

Paso 7: Se asigna el material plástico PMMA, esta asignación del material, se realiza para obtener la masa y el momento de inercia de la turbina, lo cual es relevante más adelante cuando se esté programando la malla dinámica en ANSYS. Los valores son:

- Masa = 0,303 [kg]
- Momento de inercia = 7806,689 [$kg \cdot mm^2$] = 0,007806689 [$kg \cdot m^2$]

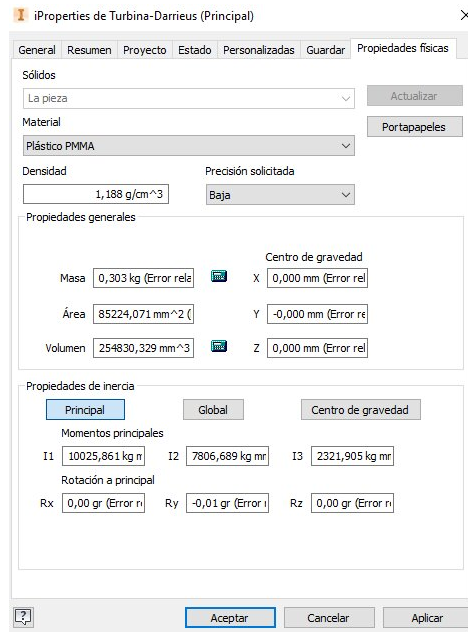


Figura 4.12: Propiedades turbina Darrieus

Fuente: Elaboración propia.

Si bien la turbina Darrieus tiene el doble de masa que la turbina Savonius, resulta interesante observar su gran aumento en el valor de la inercia, influenciado principalmente por el aumento del diámetro del rotor, esto permite visualizar de manera numérica uno de los factores detrás de sus dificultades en el arranque.

4.1.3 Turbina Darrieus-Savonius

Para la construcción de la turbina Darrieus-Savonius, se deben seguir los mismos pasos anteriores, principalmente fijarse en que los álabes Darrieus estén orientados en la posición correcta respecto a la turbina Savonius. Cabe destacar que en las tres turbinas, se orientan en una posición favorable para el arranque pensando en la modelación dinámica.

Paso 1: Se genera el boceto completo y se verifican las cotas.

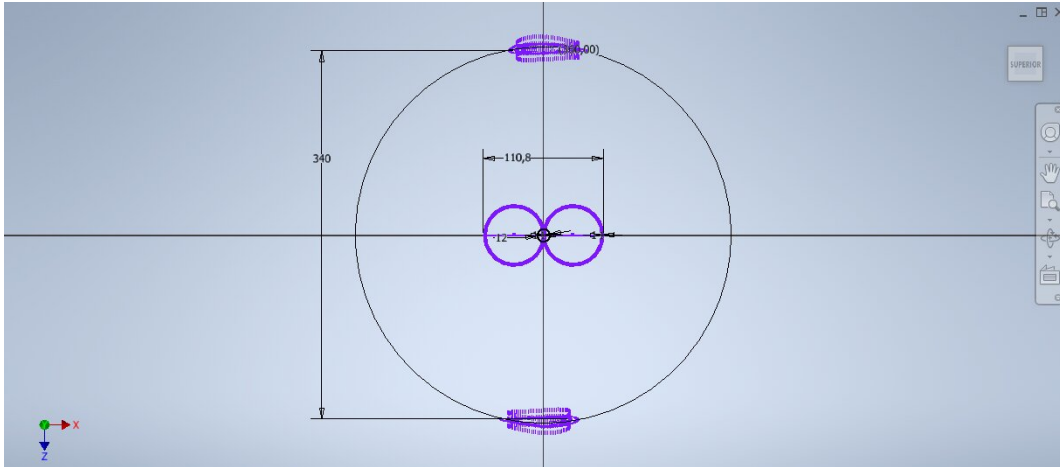


Figura 4.13: Boceto turbina Darrieus-Savonius

Fuente: Elaboración propia.

Paso 2: Posterior a borrar las cotas innecesarias y acomodar la orientación del boceto, se realiza una extrusión de 300×10^{-3} [m] simétrica centrada en el eje O.

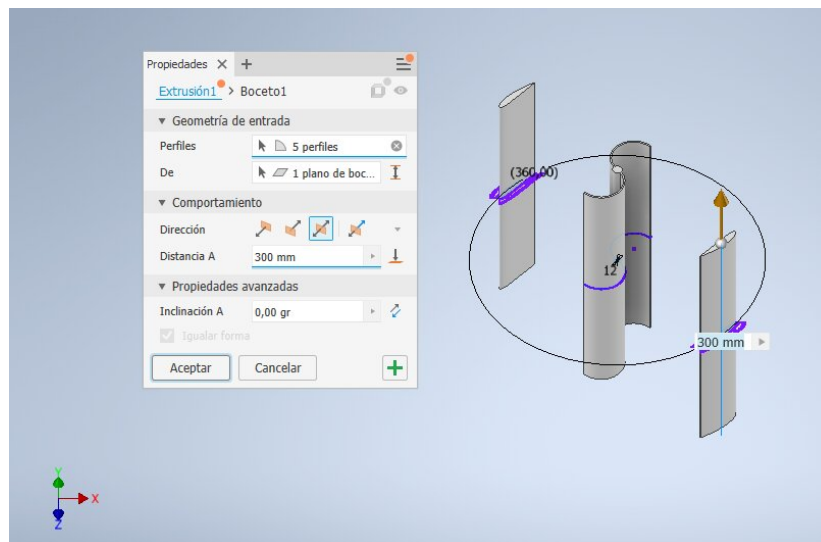


Figura 4.14: Extrusión turbina Darrieus-Savonius

Fuente: Elaboración propia.

Paso 3: Se asigna el material plástico PMMA y se recopilan los valores de masa e inercia, los cuales son:

- Masa = 0,416 [kg]
- Momento de inercia = $7986,96 [kg \cdot mm^2] = 0,00798696 [kg \cdot m^2]$

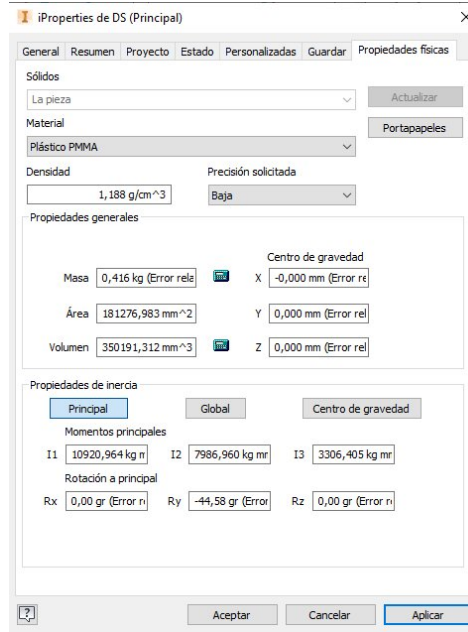


Figura 4.15: Propiedades turbina Darrieus-Savonius
Fuente: Elaboración propia.

Un detalle a considerar, si se realiza la suma de las masas de las turbinas Savonius y Darrieus por separado, da como resultado $0,457[kg]$ lo cual es distinto a la masa que se puede ver de la turbina Darrieus-Savonius $0,416[kg]$. Esto no es por un error en el cálculo, es simplemente porque al sumar las masas de las turbinas Savonius y Darrieus, se estaría sumando dos veces el eje central. Los álabes de la turbina Darrieus, sin el eje, pesan $0,262[kg]$ lo cual al sumarlo con los $0,154[kg]$ de la turbina Savonius, efectivamente da como resultado del valor de la masa de la turbina Darrieus-Savonius.

4.2 Construcción de volúmenes de control

La creación de la geometría en Ansys es una de las partes fundamentales a la hora de realizar una modelación computacional. Es importante generar un volumen de control a estudiar que permita representar el problema de una forma correcta y sin elevar en sobremanera el costo computacional. Para los tres casos de estudio, se sigue un procedimiento similar, puesto que la única diferencia entre ellos es el tamaño del diámetro del cilindro exterior que rodea a la turbina. Acá toman relevancia las herramientas “Add frozen” y “Boolean” las cuales nos permiten lo siguiente:

- **Add frozen:** Operación de extrusión que permite crear un cuerpo nuevo.

- **Boolean:** Es una operación utilizada para poder seleccionar diferentes sólidos y así restarlos, intersectarlos, unirlos, etc.

Para llevar a cabo la creación de las geometrías, se deben generar volúmenes de control con la herramienta "add frozen" y posterior a ello realizar las operaciones correspondientes para este tipo de simulación computacional con la herramienta "boolean". Dejando un dominio exterior, un dominio interior y la geometría de la turbina.

4.2.1 Geometría Savonius

Se genera un volumen de control cilíndrico de diámetro $150 \times 10^{-3}[m]$ y altura $340 \times 10^{-3}[m]$. Esta proporción es a simple vista razonable, ya que el realizar un volumen de control cilíndrico muy amplio, puede traducirse en un mayor costo computacional, puesto que en esta zona la malla debe ser refinada en conjunto a las paredes de la turbina. Luego de esto, se crea un volumen de control en forma de paralelepípedo permitirá incluir las condiciones de borde, y tener una idea de lo que ocurre con el viento fuera de la turbina, pudiendo visualizar la estela. Las medidas de este paralelepípedo son las mismas para las tres turbinas, las cuales están basadas en las medidas de la turbina Darrieus-Savonius, que se especificarán más adelante.

Tras generar estos cuerpos, se debe realizar la operación booleana. El primer paso, es sustraerle el volumen de control cilíndrico al paralelepípedo, conservando los cuerpos de herramientas. Y el segundo paso es sustraerle la geometría de la turbina al volumen de control cilíndrico, con ello quedan dos cuerpos para realizar el estudio los cuales se pueden visualizar a continuación:

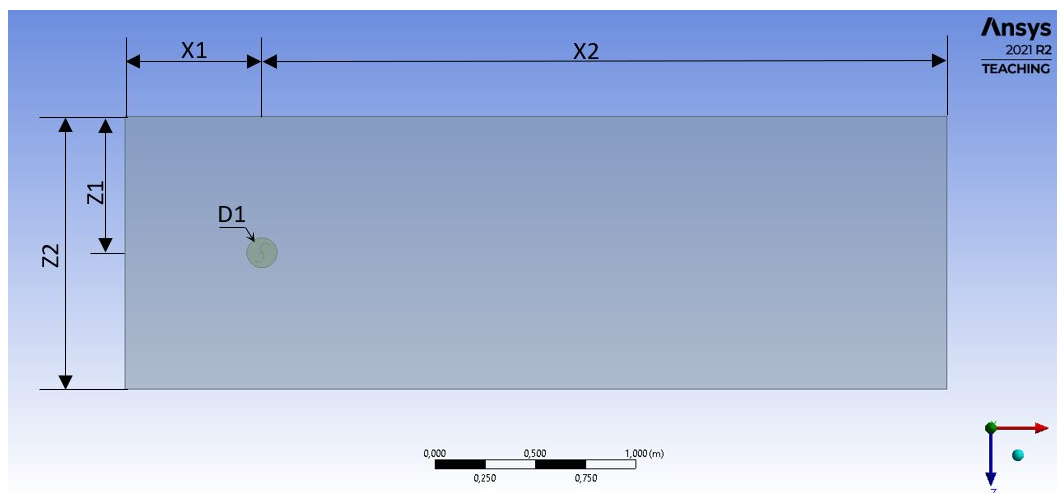


Figura 4.16: Vista desde arriba geometría Savonius

Fuente: Elaboración propia.

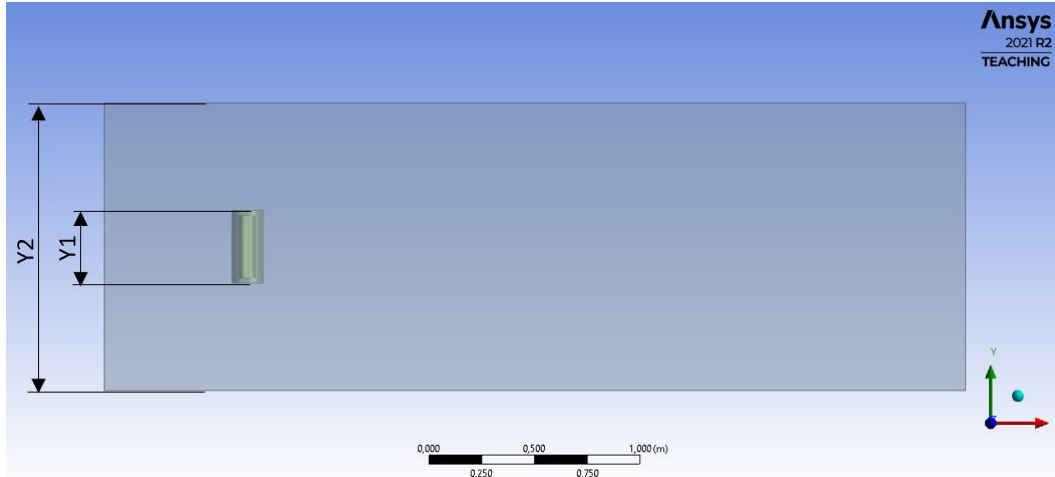


Figura 4.17: Vista lateral geometría Savonius
Fuente: Elaboración propia.

En donde, las cotas son las siguientes:

Tabla 4.2: Cotas en geometría Savonius

Cota	Magnitud	Unidad	Proporción diametral con turbina referencial
X1	680×10^{-3}	[m]	2
X2	3400×10^{-3}	[m]	10
Y1	340×10^{-3}	[m]	1
Y2	680×10^{-3}	[m]	2
Z1	680×10^{-3}	[m]	2
Z2	1360×10^{-3}	[m]	2
D1	150×10^{-3}	[m]	0,44

4.2.2 Geometría Darrieus

Se genera un volumen de control cilíndrico de diámetro $D2 = 420 \times 10^{-3}[m]$ y altura $340 \times 10^{-3}[m]$. Las demás operaciones de extrusión y booleanas son idénticas a las mencionadas en la turbina savonius

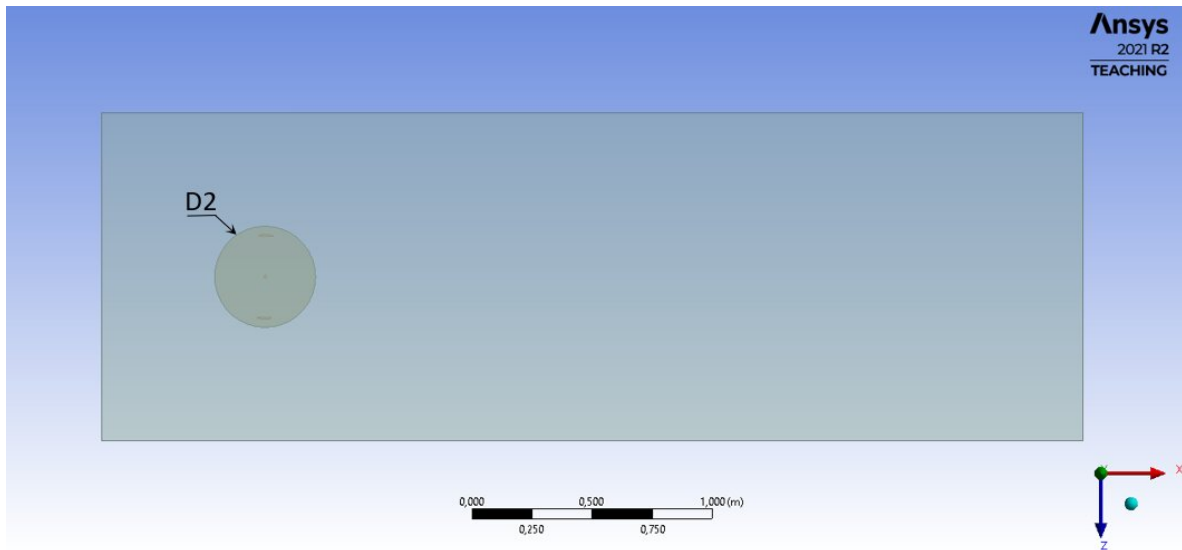


Figura 4.18: Vista desde arriba geometría Darrieus

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Geometría Darrieus-Savonius

El volúmen de control Darrieus-Savonius se hace de manera idéntica al de la turbina Darrieus, esto es debido que las proporciones de altura y diámetro exterior son exactamente las mismas, y con ello el añadir la geometría Savonius en el interior no influye en la construcción del dominio computacional.

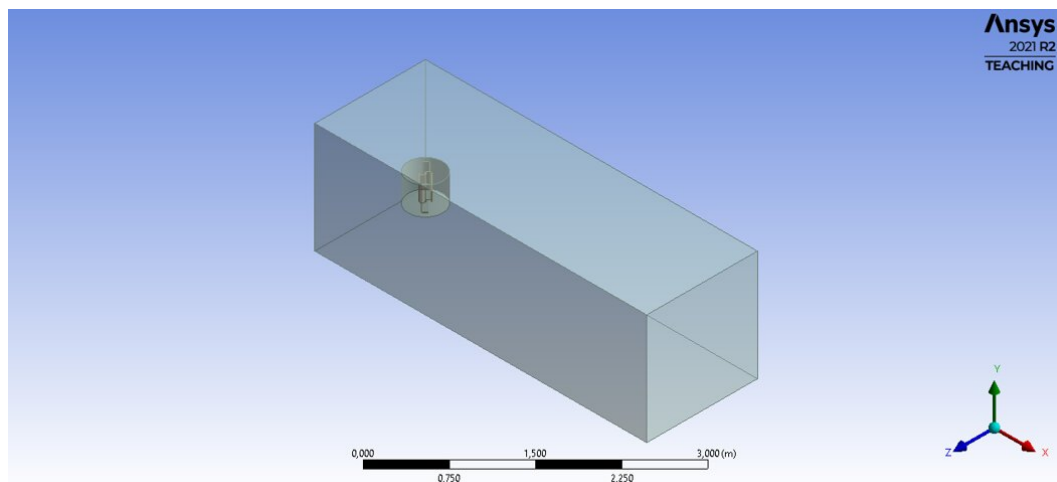


Figura 4.19: Vista isométrica geometría Darrieus-Savonius

Fuente: Elaboración propia.

Es importante mencionar, que en la etapa de realizar la geometría, se nombran las zonas

que tendrán relevancia como condiciones de borde para las tres turbinas, las cuales son llamadas como:

- Inlet (entrada)
- Outlet (salida)
- Sym1 (simetría 1)
- Sym2 (simetría 2)
- Turbine (turbina)

Para brindar una representación más clara de la ubicación de las condiciones de frontera dentro del volumen de control, se presenta la siguiente imagen:

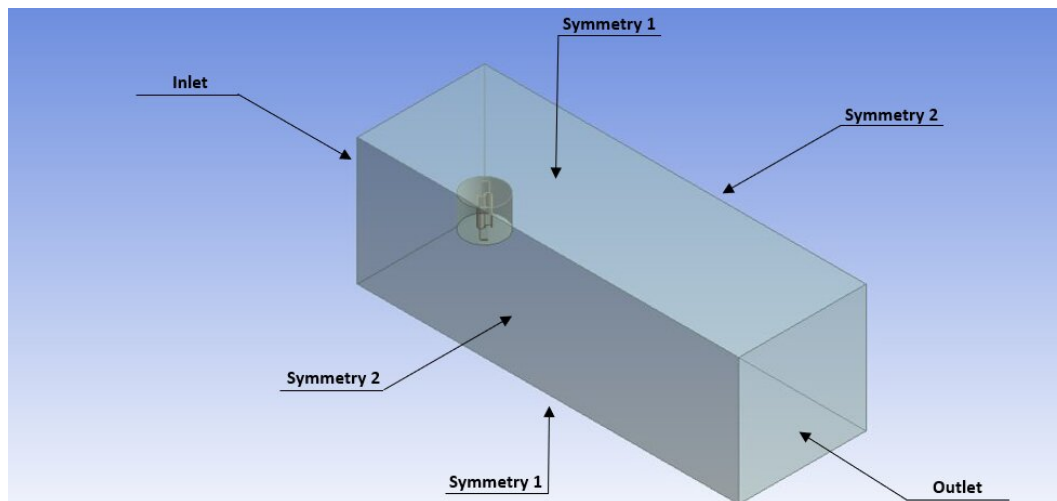


Figura 4.20: Condiciones de contorno

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Malla

El generar una buena malla tiene un papel relevante en las simulaciones computacionales de este tipo, debido a que esta es la representación discretizada del dominio en el espacio como se explicó en el Capítulo 3. Al tener una malla de alta calidad se pueden lograr bajos valores en los residuales y una buena convergencia para el problema en cuestión. Con el fin de alcanzar esto, es esencial considerar las dimensiones adecuadas que se ajusten a la geometría a evaluar, esto debe hacerse de la manera más óptima posible sin descuidar la calidad de la malla, implementando una estructura refinada en las áreas de mayor interés, como lo puede

ser cerca de las paredes de la turbina para este caso. La selección de un tamaño adecuado para cada elemento, es un aspecto de gran importancia, puesto que para representar la geometría de manera correcta, se debe lograr una calidad ortogonal y oblicuidad apropiada en la malla, idealmente con la menor cantidad de elementos posibles sin comprometer la convergencia de la simulación, de esta manera se pueden tener tiempos de cálculo razonables, en paralelo a lograr representar correctamente la física del problema. Otro punto a destacar, es que es recomendable adaptar y hacer coincidir las dimensiones en la zona de la interfaz, para de esta forma garantizar el remallado en el futuro y una convergencia exitosa de la malla dinámica. De los parámetros mencionados en el párrafo anterior, es necesario tener en cuenta las siguientes definiciones:

- **Skewness (Oblicuidad):** La oblicuidad, se refiere al grado de deformación que tienen los elementos dentro de la malla, a modo de ejemplo, en un cuadrado cada ángulo mide 90° , si este cuadrado se transforma en un rombo, los ángulos diferirán de este valor, o sea, en la medida en que más deformación y distorsión haya en el elemento, se dice que tiene una mayor oblicuidad. Un alto grado de oblicuidad puede llegar a generar inexactitud en los resultados o problemas de convergencia en la simulación, afectando al cálculo .
- **Orthogonal Quality (Calidad Ortogonal):** La calidad ortogonal está relacionada al ángulo que se forma entre las líneas que conectan a los centroides y las celdas adyacentes con las caras aledañas, en una malla perfecta, estas líneas serían perpendiculares a las caras que se comparten, significando que el flujo atraviesa de manera ortogonal, sin embargo, en las mallas reales se pueden dar desviaciones en esta ortogonalidad, lo cual disminuye la precisión y convergencia de la simulación. Cuando se tiene una buena ortogonalidad, es decir, valores cercanos a 1, se tiene un mejor cálculo numérico.

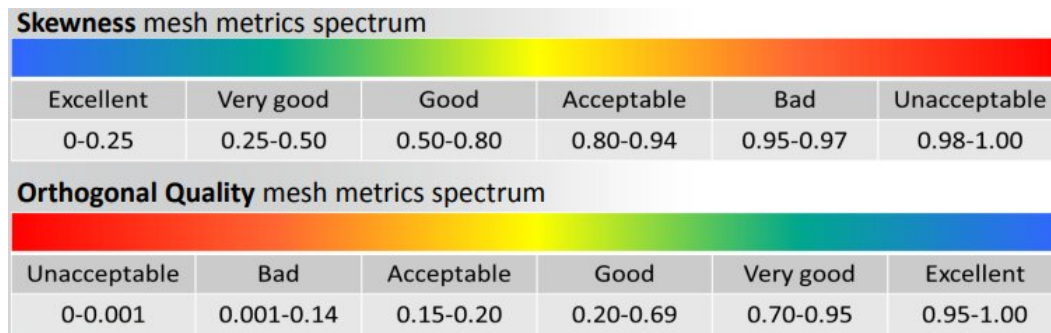


Figura 4.21: Calidad de oblicuidad y ortogonalidad

Fuente: [https://featips.com/wp-](https://featips.com/wp-content/uploads/2021/05/Mesh-Intro16.0L07-Mesh-Quality-and-Advanced-Topics.pdf)

[content/uploads/2021/05/Mesh – Intro16.0L07 – Mesh – Quality – and – Advanced – Topics.pdf](https://featips.com/wp-content/uploads/2021/05/Mesh-Intro16.0L07-Mesh-Quality-and-Advanced-Topics.pdf)

Es importante tener estos valores en mente a la hora de verificar los parámetros para cada turbina y asegurarse de que no tengan una mala calidad ortogonal ni oblicuidad.

4.3.1 Malla Savonius

Para la representación de la turbina Savonius a través de elementos discretizados, se realiza una malla simplificada en donde se especifican los tamaños de la interfaz en el volumen de control exterior, el tamaño máximo de los elementos del cilindro que rodea la turbina y el tamaño de los elementos en la pared de la turbina. Para la pared de la turbina se coloca un tamaño de $2 \times 10^{-3}[m]$, logrando de esta manera una representación más detallada en las zonas que requieren mayor refinamiento, El cilindro que rodea la turbina, por su parte, tiene elementos con un máximo de $1 \times 10^{-2}[m]$ en su periferia, mientras que la malla exterior establece un tamaño mínimo de $1 \times 10^{-2}[m]$ en la interfaz. A continuación, se pueden ver las operaciones realizadas en la confección de la malla:

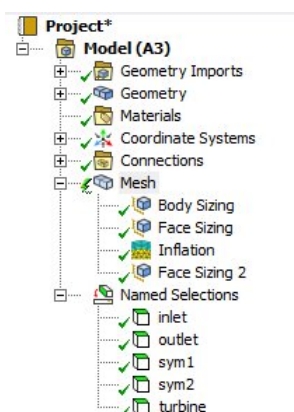
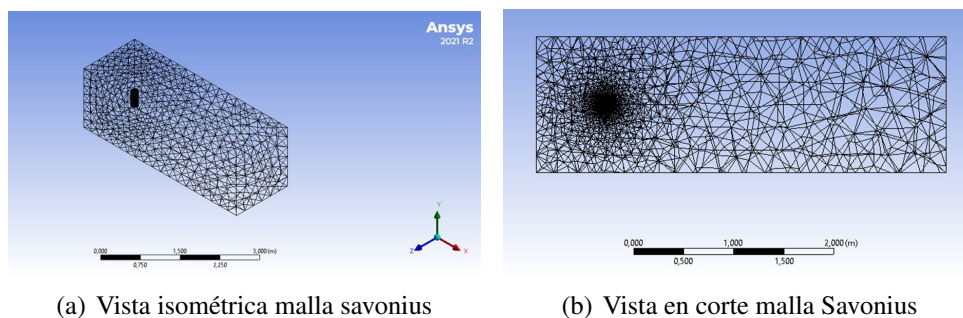


Figura 4.22: Operaciones turbina savonius

Fuente: Elaboración propia.



(a) Vista isométrica malla savonius

(b) Vista en corte malla Savonius

Figura 4.23: Malla turbina Savonius

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que el lugar con mayor densidad de elementos y concentración de nodos, se ubica en la zona del cilindro, específicamente al rededor de la turbina, en donde pese a su menor tamaño respecto al paralelepípedo exterior, tiene una mayor cantidad de elementos. Además en las paredes de la turbina, se implementa la opción de inflación, con 12 capas y una tasa de crecimiento de 1,2 con una transición gradual. Este ajuste tiene por objetivo generar una malla más representativa en la zona de la pared, para así tener mayor precisión en el cálculo, contribuyendo a resultados más reales en esas regiones críticas

A continuación, se presentan fotografías aumentadas del resultado de la malla:

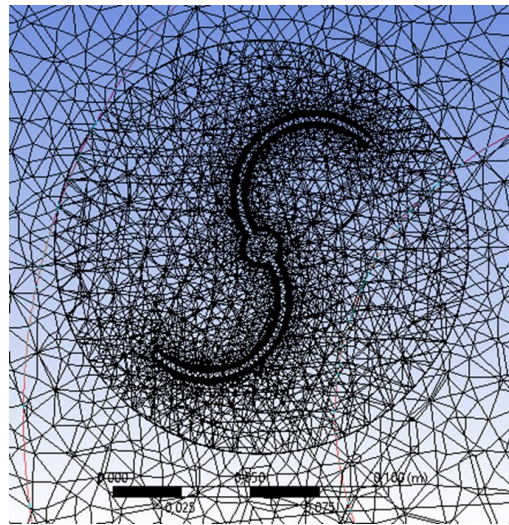
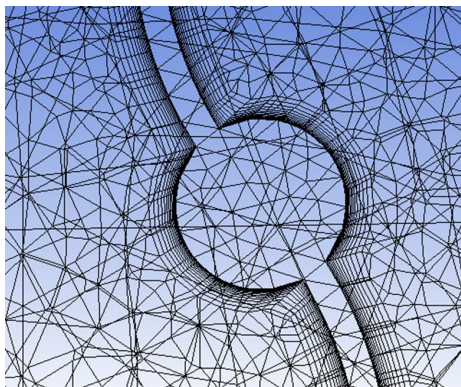
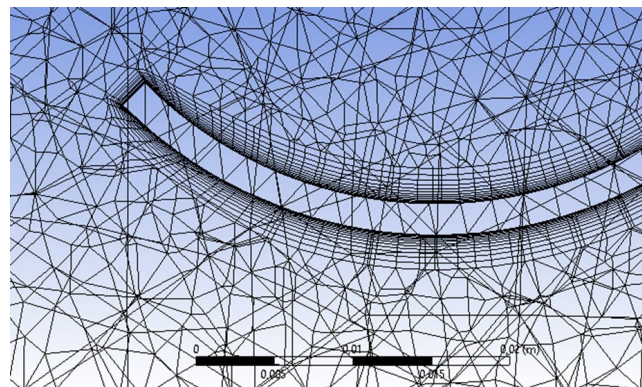


Figura 4.24: Malla turbina Savonius

Fuente: Elaboración propia.



(a) Zona central savonius



(b) Zona exterior del álabe

Figura 4.25: Vista en detalle malla savonius

Fuente: Elaboración propia.

Como se indicó al inicio de esta sección, resulta de suma importancia mantener los parámetros de calidad ortogonal y oblicuidad dentro de un rango óptimo. En términos de calidad ortogonal, es deseable que los valores estén alejados de cero, indicando así una alineación cercana a la perpendicularidad entre las líneas que conectan los centroides de celdas adyacentes y las caras compartidas. Por otro lado, en lo que concierne a la oblicuidad, los valores cercanos a cero se presentan como los más favorables, señalando una menor deformación de los elementos de la malla.

A continuación, se presentan los gráficos correspondientes a cada uno de estos parámetros en el contexto de la turbina de tipo Savonius:

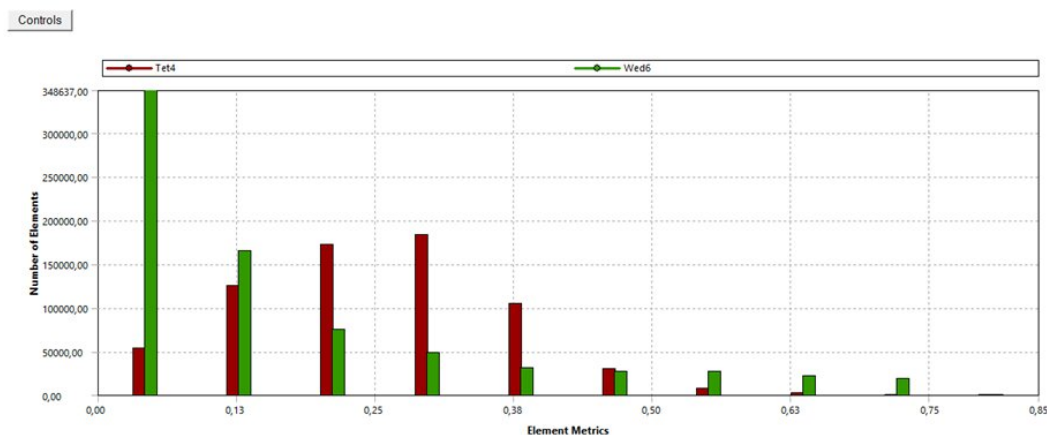


Figura 4.26: Oblicuidad turbina Savonius
Fuente: Elaboración propia.

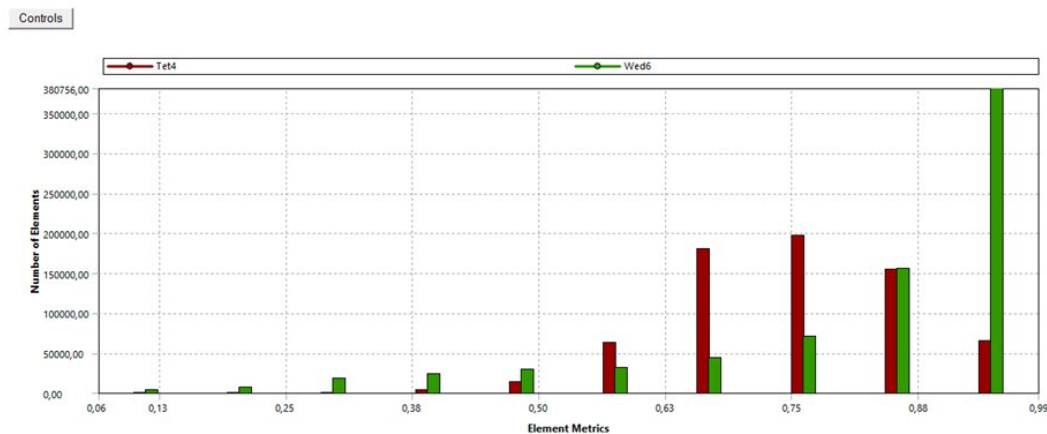


Figura 4.27: Calidad ortogonal turbina Savonius
Fuente: Elaboración propia.

Estos gráficos sirven como herramientas de evaluación, para tener un indicio del comportamiento que puede llegar a tener la malla a la hora de realizar la simulación, permitiendo

visualizar la calidad de la malla generada en relación con los criterios de calidad ortogonal y oblicuidad requeridos.

4.3.2 Mallado Darrieus

La generación de una malla tridimensional para una geometría Darrieus implica un costo computacional más elevado, puesto que la construcción de un perfil alar es compleja. La adaptación de la malla debe hacerse tanto en el área del borde de ataque, debido a su forma curva, como en la región del punto de fuga, caracterizada por una esquina con una curva cerrada, esto agrega complejidades al proceso, sobretodo si la simulación es tridimensional y se tiene la geometría completamente encerrada en un volumen de control.

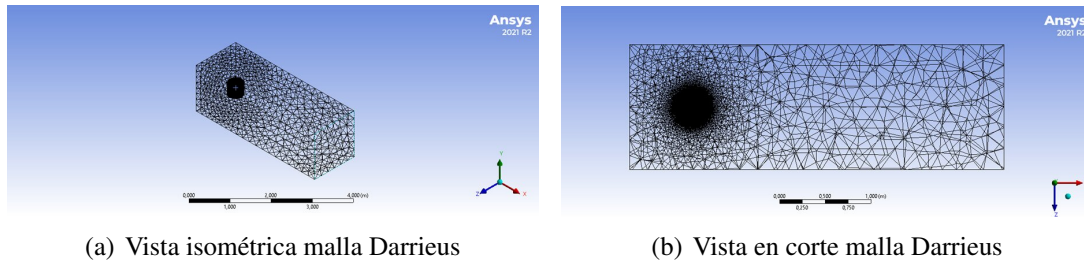


Figura 4.28: Malla Darrieus

Fuente: Elaboración propia.

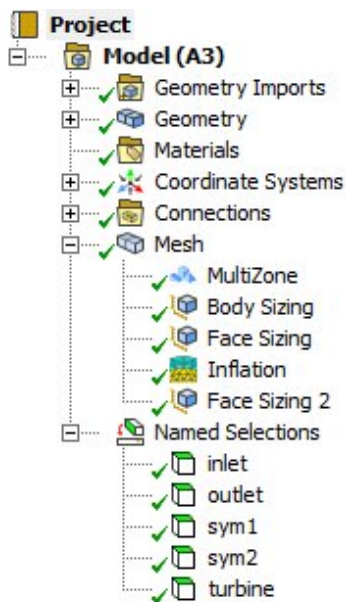


Figura 4.29: Operaciones turbina Darrieus

Fuente: Elaboración propia.

El estructurar la malla en las zonas anteriormente mencionadas, representa desafíos significativos, por esta razón, se realiza una pequeña simplificación en el punto de fuga. En lugar de mantener una esquina tan cerrada, se opta por establecer un borde recto con una dimensión inferior a un milímetro, esto debe ser considerado a la hora de crear la geometría en Inventor. Esta estrategia posibilita la implementación del comando multizone y la construcción de esa sección de la malla con geometrías en forma de prisma, además en la zona del borde de ataque se establece que se debe capturar la curvatura de la zona. Estas técnicas permiten lograr una representación precisa en la superficie, manteniendo un enfoque eficiente para la generación de la malla, minimizando de esta manera el costo computacional que puede implicar esta geometría.

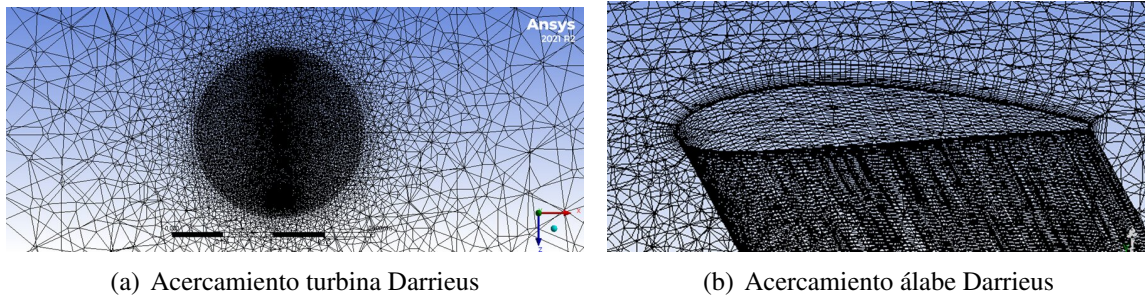


Figura 4.30: Vista en detalle malla savonius

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los gráficos que muestran la calidad ortogonal y la oblicuidad de la malla:

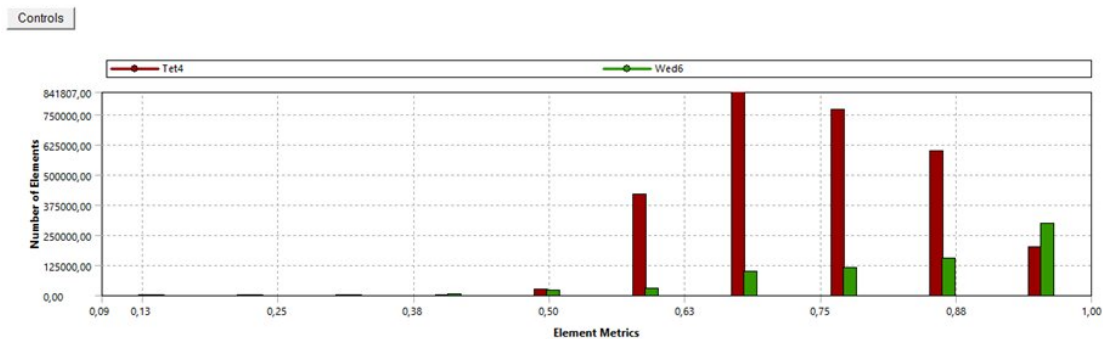


Figura 4.31: Calidad ortogonal turbina Darrieus

Fuente: Elaboración propia.

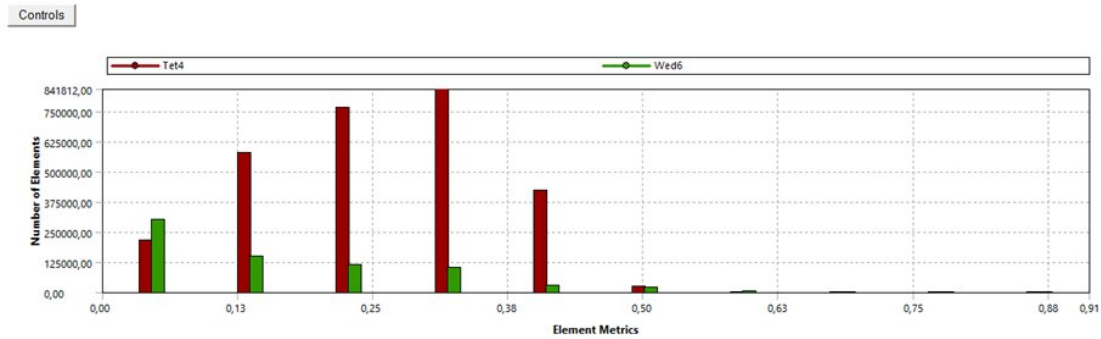


Figura 4.32: Oblicuidad turbina Darrieus

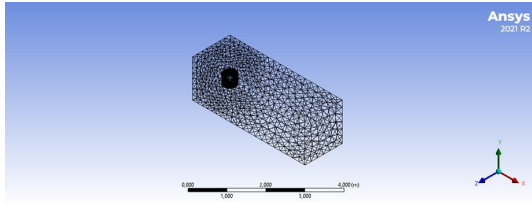
Fuente: Elaboración propia.

Se observa que ambos parámetros tienen una calidad inferior respecto de la turbina Savonius, lo cual es razonable, debido a que esta última posee una geometría más simple, facilitando la obtención de valores dentro del rango "Excelente". Por otro lado, los valores de la turbina Darrieus en su mayoría caen entro del rango "Bueno" y "Muy bueno" lo cual sigue siendo un buen indicio para el resto de la simulación.

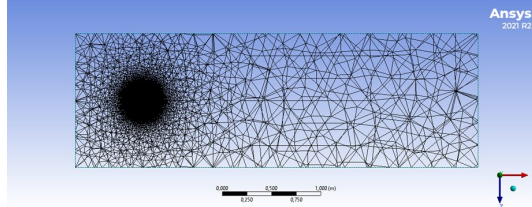
4.3.3 Malla Darrieus-Savonius

El proceso para crear la malla de la turbina Darrieus-Savonius, se asemeja bastante al de la turbina Darrieus individual. Nuevamente debe emplearse la herramienta multizone para representar de manera estucturada los elementos en la superficie de la turbina. Se elije un tamaño de elemento de $2 \times 10^{-3}[m]$ en las paredes de la turbina y se utiliza la opción de adaptación de curvatura con un tamaño mínimo de $0.744 \times 10^{-3}[m]$.

La elección de este tamaño mínimo se fundamenta en la longitud de la parte recta en el punto de fuga del álabe Darrieus. Este enfoque permite que la geometría se ajuste de manera precisa a esta zona particular, minimizando al mismo tiempo el incremento en el costo computacional. La representación gráfica de la malla de la turbina Darrieus-Savonius se presenta a continuación en una vista isométrica y en un corte, mostrando cómo se configura el mallado para este tipo de turbina.



(a) Vista isométrica

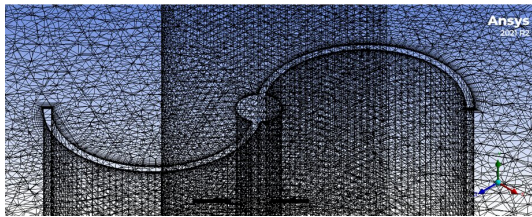


(b) Vista en corte Darrieus-Savonius

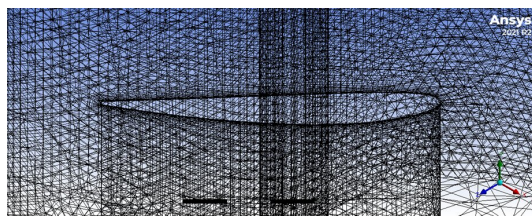
Figura 4.33: Malla Darrieus-Savonius

Fuente: Elaboración propia.

Esta forma de realizar la malla permite un control preciso de la representación geométrica, asegurando una distribución adecuada de los elementos en las áreas críticas de la turbina. Al realizar un acercamiento en la malla en la zona de los álabes se puede visualizar de forma clara el como se organizan los elementos en esta zona.



(a) Acercamiento zona Savonius



(b) Acercamiento álabe Darrieus

Figura 4.34: Acercamiento en los álabes

Fuente: Elaboración propia.

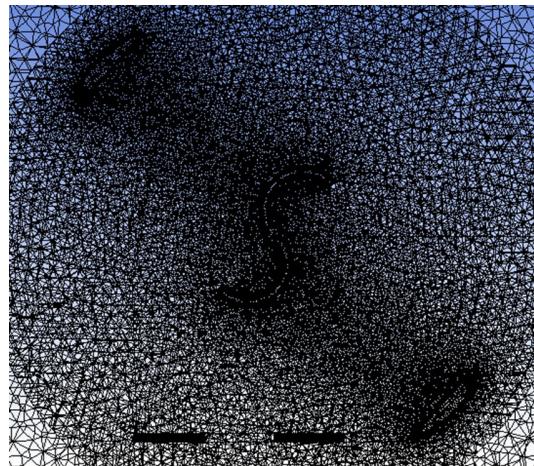


Figura 4.35: Acercamiento en la malla

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los gráficos que muestran la calidad ortogonal y la oblicuidad de la malla de la turbina Darrieus-Savonius.

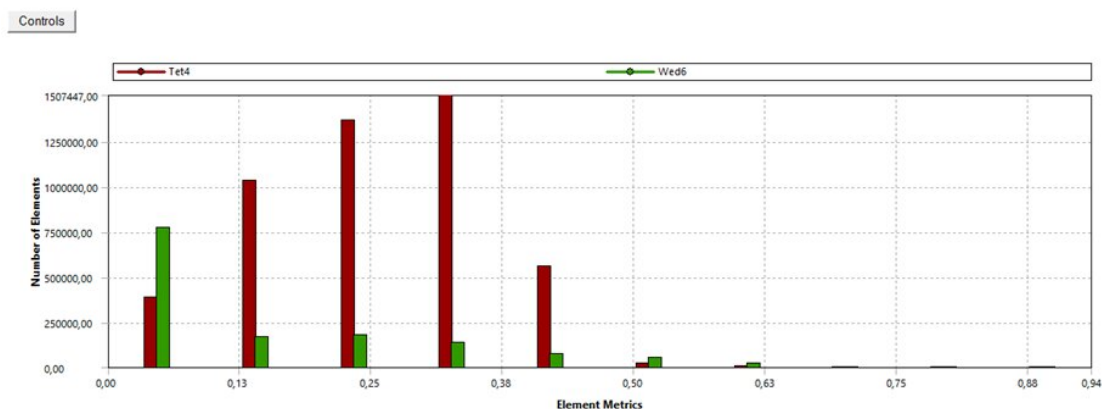


Figura 4.36: Oblicuidad mallado Darrieus-Savonius

Fuente: Elaboración propia.

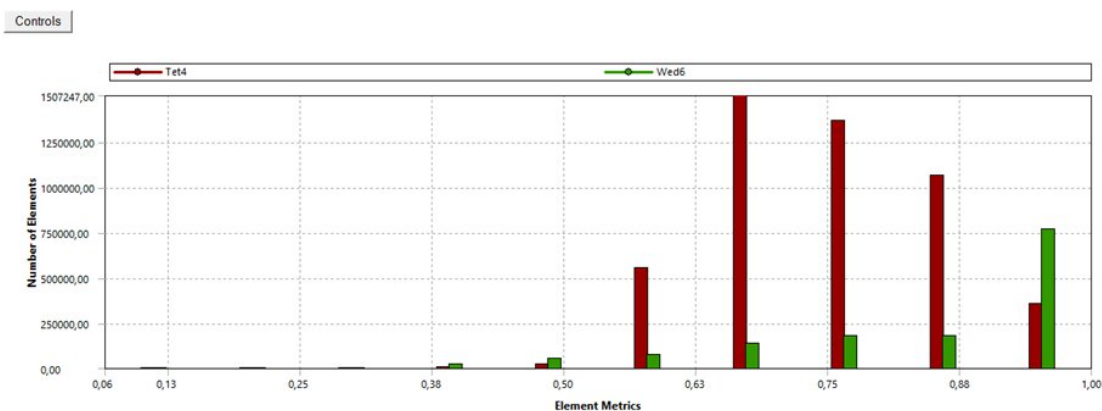


Figura 4.37: Calidad ortogonal mallado Darrieus-Savonius

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se presentan dos tablas resumen, que muestran parámetros relevantes del mallado, la primera tabla contiene el número de elementos, número de nodos y el tamaño mínimo del elemento dentro de la malla, mientras que la segunda tabla, contiene los valores promedio de calidad ortogonal y oblicuidad respectivos para cada turbina. Es importante tener en consideración el valor de Δx_{min} para cada turbina, pues es determinante a la hora de calcular el número CFL.

Tabla 4.3: Resumen de características de la malla

Turbina	Número de elementos	Número de nodos	Δx_{min}
Savonius	1.435.381	512.049	$2 \times 10^{-3}[m]$
Darrieus	3.558.113	846.977	$0.744 \times 10^{-3}[m]$
Darrieus-Savonius	6.275.648	1.555.574	$0.744 \times 10^{-3}[m]$

Tabla 4.4: Resumen de calidad promedio de malla

Turbina	Calidad ortogonal	Oblicuidad
Savonius	0,79	0,21
Darrieus	0,76	0,23
Darrieus-Savonius	0,77	0,22

4.4 Configuración (Set-Up)

4.4.1 General

La configuración de todas las turbinas se hace de manera similar, en donde las únicas diferencias resultan ser la velocidad angular inicial de la turbina, el paso de tiempo y el número de pasos de tiempo. Se utiliza una programación transiente, con una aceleración de gravedad de $y = -9.81[m/s^2]$ y como solver se selecciona "pressure based", debido a que se trabaja el aire como flujo incompresible para simplificar la modelación, esto se puede realizar siempre y cuando la velocidad del viento sea tal que su número de Mach tenga un valor menor a 0.3. Para comprobarlo se realiza el siguiente cálculo:

$$M = \frac{u}{c} = \frac{8[m/s]}{340[m/s]} = 0,02 < 0,3 \quad (4.1)$$

Con "M" igual al número de Mach, "u" igual a la velocidad del viento en la modelación y "c" igual a la velocidad del sonido en el medio.

Además se calcula el número de Reynolds para saber si se está en presencia de un flujo turbulento o laminar.

Para la turbina Savonius se tiene:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{1,225[kg/m^3] \cdot 8[m/s] \cdot 0,110[m]}{1,7894 \times 10^{-5}[kg/ms]} = 6.024 \times 10^4 \quad (4.2)$$

Mientras que para las turbinas Darrieus y Darrieus-Savonius se tiene:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{1,225[kg/m^3] \cdot 8[m/s] \cdot 0,354[m]}{1.7894 \times 10^{-5}[kg/ms]} = 1.93 \times 10^5 \quad (4.3)$$

Ante ello se puede observar que para ambos casos se está en presencia de un régimen turbulento.

4.4.2 Modelo

Se selecciona el método SST k-omega, comúnmente usado para modelaciones de turbinas eólicas, ya que cuenta con una buena representación del comportamiento del fluido en la pared y lejos de ella, tiene un mayor costo computacional que el método k-epsilon, sin embargo, la representación que llega a tener es más precisa. a continuación, se puede ver una foto en el instante inicial de una simulación Savonius con el método SST k-omega.

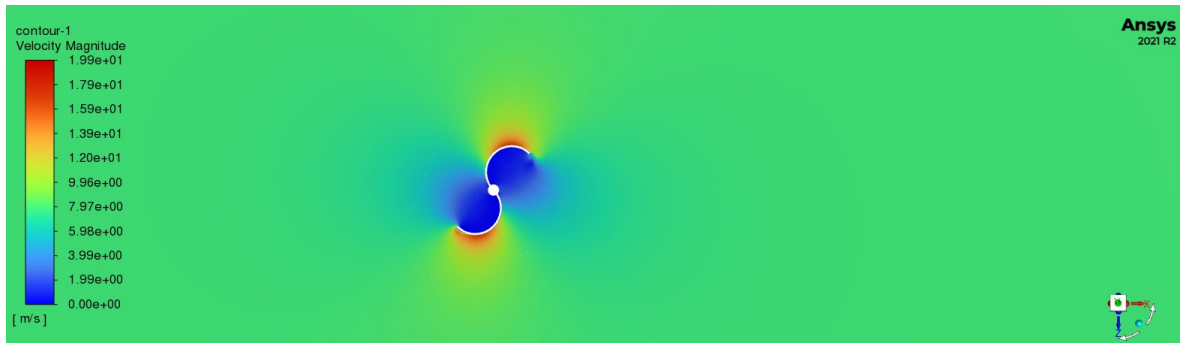


Figura 4.38: Contornos de la velocidad calculados con SST k-omega
Fuente: Elaboración propia.

4.4.3 Material

En la sección de Material, se debe establecer que se trabaja con un fluido, específicamente aire, con las siguientes características:

Tabla 4.5: Características del aire en la simulación

Propiedad	Magnitud	Unidad
Presión	101.325	[Pa]
Temperatura	288,15	[K]
Densidad	1,225	[kg/m ³]
Viscosidad dinámica (μ)	1.7894×10^{-5}	[kg/ms]
Viscosidad cinemática (ν)	1.465×10^{-5}	[m ² /s]

4.4.4 Condiciones de borde

En las zonas nombradas de la malla: Inlet, Outlet, Simetría 1, Simetría 2, Turbina, se establecen las siguientes condiciones de contorno:

- **Inlet:** Presión = 101.325 [Pa]. Velocidad en el eje $x = 8[m/s]$
- **Outlet:** Condición de salida de flujo .
- **Sym1:** Condición de simetría.
- **Sym2:** Condición de simetría.
- **Turbina:** Condición de pared.

4.4.5 Malla dinámica

Para la malla dinámica la rotación es simulada con "Dynamic Mesh 6DOF method" esta sección se debe rellenar con las características de cada turbina, masa, inercia y eje de giro.

Tabla 4.6: Características de las turbinas

Turbina	Masa	Inercia	Eje
Savonius	0,154 [kg]	0,00018099 [$kg \cdot m^2$]	$y = 1$
Darrieus	0,303 [kg]	0,007806689 [$kg \cdot m^2$]	$y = 1$
Darrieus-Savonius	0,416 [kg]	0,00798696 [$kg \cdot m^2$]	$y = 1$

Six DOF Properties

Name

Mass [kg] ☐ One DOF Translation ☒ One DOF Rotation

One DOF

Axis

X Y Z

Center of Rotation

X [m] Y [m] Z [m]

Spring

Preload [N m] Constant [(N m)/rad]

☐ Constrained

Reference Angle

Value [deg] Minimum [deg] Maximum [deg]

Moment of Inertia [kg m²]

Figura 4.39: Six DOF Propieties

Fuente: Elaboración propia.

En la selección de malla dinámica se debe especificar los dominios que requieren estar en movimiento, para el caso de estudio, la turbina debe tratarse como un cuerpo rígido, el cilindro que rodea la turbina (inner-domain) también debe ser considerado como un cuerpo rígido, aunque con una particularidad: se debe marcar como un agente pasivo en la modelación, ya que su comportamiento en la realidad implica seguir el movimiento de la turbina en lugar de mantenerse rígido, finalmente el dominio exterior debe ser configurado como deformable para que se vaya adaptando a las variaciones de la malla interior a medida que la simulación avanza.

4.4.6 Métodos

Para el acoplamiento de presión se utiliza el método Coupled, esto debido a las características mencionadas en el Capítulo 3.

4.4.7 Controles

Cuando se selecciona el algoritmo Coupled en Ansys Fluent, es necesario ajustar algunos parámetros en la pestaña de controles, los cuales son el número de Courant y los factores explícitos de relajación. El número de Courant, tiene como valor predeterminado 200, sin embargo, para casos transientes, debe ser modificado a 10^7 . Es de suma importancia destacar que este número de Courant "NO" es la condición $CFL < 1$, este número de Courant es un factor de relajación de Ansys Fluent, que desafortunadamente lleva el mismo nombre que el número de Courant de la condición CFL, generando confusión entre algunos usuarios. Además se deben modificar los valores de los factores explícitos de relajación a un valor de 1. [26]

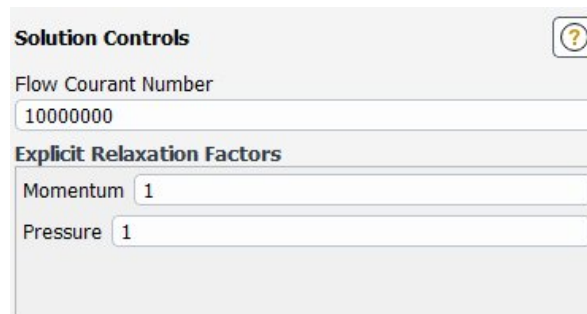


Figura 4.40: Numero de Courant y factores de relajación

Fuente: Elaboración propia.

4.4.8 Monitores

Dentro de la pestaña de monitores se pueden ajustar los residuales, los cuales son indicadores fundamentales para evaluar la convergencia entre iteraciones en un proceso de cálculo. Un valor elevado de residuales puede ocasionar problemas de convergencia y resultados que se alejan de la realidad. Por otro lado, un valor de residuales excesivamente bajo puede producir resultados más precisos, pero a costa de aumentar el tiempo de cálculo.

Los valores de residuales predeterminados para las ecuaciones de masa y momento son de $0,001[-]$, lo que generalmente proporciona resultados razonables. Sin embargo, a elección del usuario, se puede realizar un pequeño ajuste, reduciendo el valor de residuales en la ecuación de continuidad a $0,00001[-]$ con el propósito de garantizar una convergencia adecuada. Aunque esto pueda resultar en un aumento en el tiempo de cálculo, dicho incremento se ve limitado por el número de iteraciones, por lo que es una buena elección realizar este ajuste.

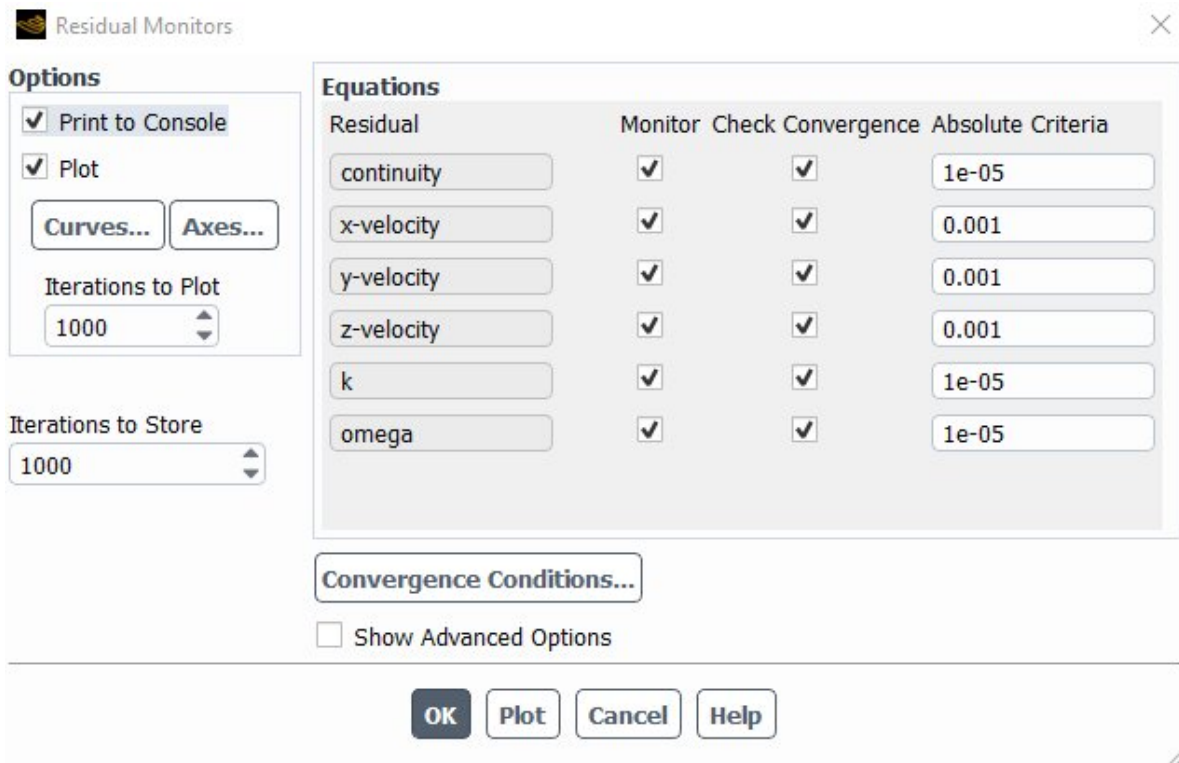


Figura 4.41: Ajuste en los residuales de la simulación

Fuente: Elaboración propia.

4.4.9 Inicialización

La inicialización se realiza de igual manera para todas las turbinas, colocando una velocidad inicial en el eje "X" de 8 [m/s] en todos los dominios, y una presión de 101.325 [Pa].

4.4.10 Cálculo

Para realizar los cálculos relacionados con turbina, es necesario determinar el número de pasos de tiempo necesarios para que esta de una vuelta completa. También debe ser calculada la condición CFL, donde un valor apropiado se encuentra por debajo de 1. Esto se realiza para no tener problemas de convergencia en el proceso. A continuación, se muestra el cálculo de esta condición para cada una de las turbinas.

Savonius

Para determinar el tiempo que tarda la turbina Savonius en dar 3 vueltas a una velocidad tangencial de 8 [m/s] basta con calcular el perímetro de la circunferencia recorrida por el punto más lejano al eje central de la turbina, y con ello, el tiempo que toma recorrer esa distancia.

$$P = 2\pi \cdot 0,0554[m] = 0,348[m] \quad (4.4)$$

$$t_s = \frac{d}{v} = \frac{0,348[m]}{8[m/s]} = 0,0435[s] \quad (4.5)$$

Por lo tanto el tiempo que tarda en dar tres vueltas es $3 \cdot t_s = 0,13[s]$

Mientras que para el cálculo de Δt en cada iteración, se busca lograr una condición $CFL < 1$ Para este caso se utiliza 0,4 lo cual se logra mediante el siguiente cálculo:

$$CFL = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \leq CFL_{max} \quad (4.6)$$

Se elige un paso de tiempo igual a 0,0001 [s] ya que resulta de fácil visualización a la hora de realizar los gráficos y guardar la información según pasos de tiempo, cumpliendo además con una condición $CFL < 1$

$$CFL = \frac{8[m/s] \cdot 0,0001[s]}{0,002[m]} = 0,4[-] \quad (4.7)$$

Darrieus y Darrieus-Savonius

El caso de las turbinas Darrieus y Darrieus-Savonius, siguen un procedimiento similar, se busca saber el tiempo en que tardan en dar tres vueltas con una velocidad tangencial de 8 [m/s] para establecer el paso de tiempo y un número CFL adecuado, para ello se calcula el perímetro y el tiempo que se tarda en recorrerlo.

$$P = 2\pi \cdot 0,177[m] = 1,11[m] \quad (4.8)$$

$$t_d = \frac{d}{v} = \frac{1,11[m]}{8[m/s]} = 0,139[s] \quad (4.9)$$

Por lo tanto el tiempo que tarda en dar tres vueltas es $3 \cdot t_d = 0,417[s]$.

Notar que el radio utilizado es 0,177 [m] y no 0,17 [m] lo cual es porque este último valor, en base al cual fue construida la turbina, es la distancia hasta la altura de la cuerda del perfil

alar, pero para tener más exactitud en el cálculo con Ansys, es recomendable utilizar como radio la distancia al punto más lejano de la construcción del álabe. Dicho lo anterior, para el cálculo del tiempo de cada iteración, se busca lograr una condición $CFL < 1$ Para este caso se utilizará 0,43 lo cual el siguiente cálculo:

$$CFL = \frac{8[m/s] \cdot 0,00004[s]}{0,000744[m]} = 0,43 \quad (4.10)$$

Se elige un paso de tiempo igual a 0,00004 [s] ya que resulta de fácil visualización a la hora de realizar los gráficos y guardar la información según pasos de tiempo, cumpliendo además con una condición CFL adecuada.

4.4.11 Errores previos a la modelación final

El obtener los pasos a seguir para para la simulación de una turbina no es un proceso lineal ni sencillo, requiere de muchas pruebas previas que resultan en simulaciones y prototipos erróneos que se van mejorando hasta llegar a la simulación final. En esta sección, se comentan algunos de los principales procedimientos erróneos realizados previos a tener una buena convergencia en los resultados.

Uniones poco físicas

El primer error que se tuvo a la hora de realizar la simulación, ocurrió con la turbina Savonius, en donde se hizo el diseño sin tener en cuenta una transición suave entre los bordes de la turbina y el eje central como se puede ver en la imagen:

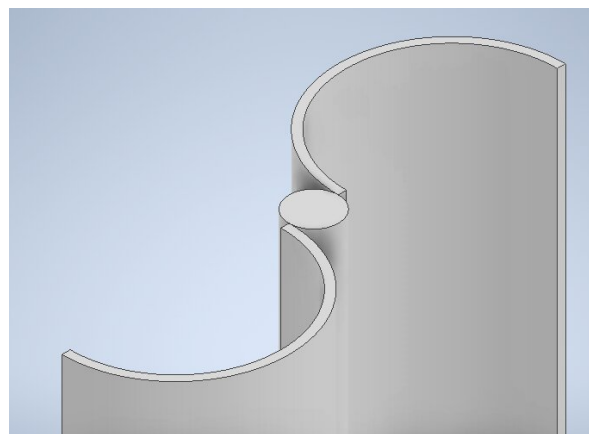


Figura 4.42: Construcción errónea de turbina Savonius

Fuente: Elaboración propia.

Esto posteriormente trajo consigo un error en la generación de la operación de sustracción en el booleano, sumado a la imposibilidad de realizar la malla al no poder representar estas discontinuidades con los volúmenes finitos. Es importante no cometer este tipo de errores en la creación de la geometría, ya que en caso de poder seguir con la simulación, puede provocar una mayor concentración de elementos en zonas de difícil representación, y en cualquier momento la simulación puede llegar a tener errores de convergencia, por lo que es mejor evitar este tipo de geometrías.

Curva cerrada en geometría Darrieus

La representación del punto de fuga suele traer consigo muchos problemas en la simulación computacional cuando se quiere crear una malla con inflación al rededor del álabe de la turbina. Esto especialmente ocurre en geometrías 3D que estén completamente encerradas en un volumen de control, debido a que se tiene una esquina muy cerrada, las cuales no son soportadas en el algoritmo de "pre-inflation". En algunos casos esto puede solucionarse utilizando el método de tetraedros junto al algoritmo de post-inflation, sumado a refinar la malla en esa zona con un cuerpo de influencia, sin embargo, esto para una representación tridimensional, representa un costo computacional muy elevado, es por ello que se opta por dejar el punto de fuga del álabe terminado en una forma recta y no en punta, esto puede afectar levemente la representación de la estela, sin embargo, es un costo que se puede asumir para una representación más eficiente.

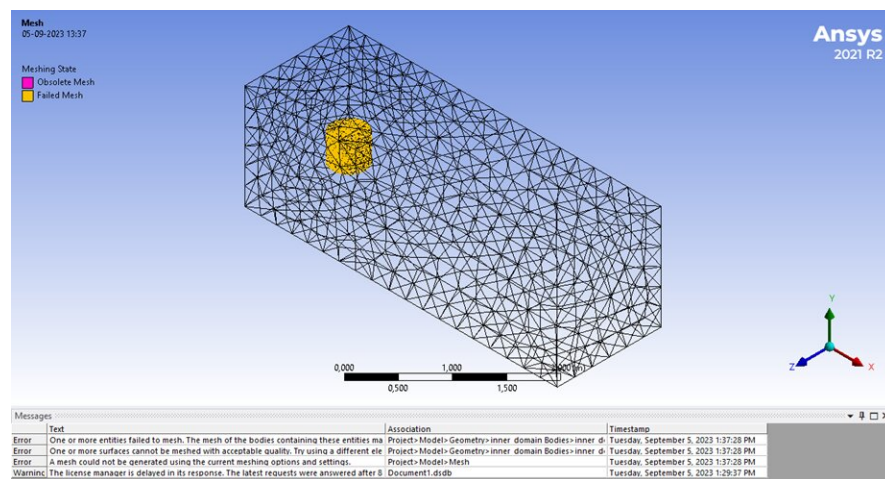
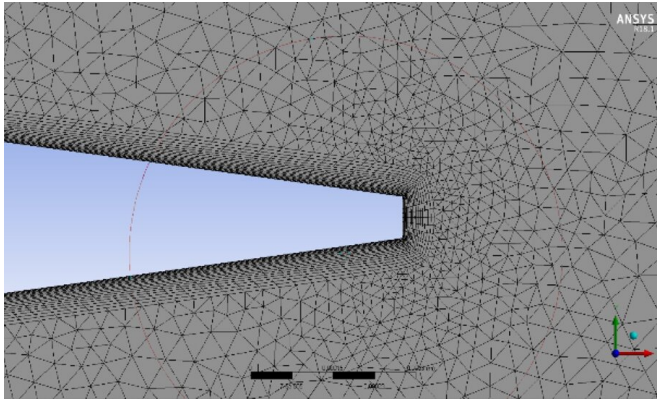


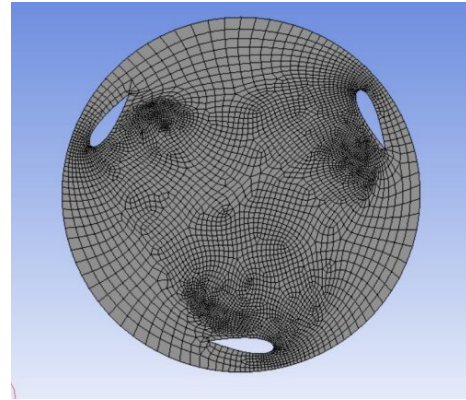
Figura 4.43: Problemas en malla con geometría Darrieus

Fuente: Elaboración propia.

En vista de lo anteriormente mencionado, diversos estudios, proponen realizar mallas sin líneas de inflación o simplificar la geometría Darrieus, tal como se ve en las imágenes



(a) Punto de fuga simplificado



(b) Vista en corte malla Darrieus sin inflación

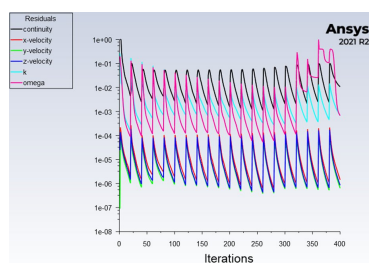
Figura 4.44: Simplificaciones en álabe Darrieus

Fuente: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/21/5564> &

<https://tfaws.nasa.gov/wp-content/uploads/TFAWS2020-ID-512-El-Nenaey-Paper.pdf>

Planteo erróneo de dominios

En busca de una simulación más simple, algunas fuentes sugieren no generar el dominio cilíndrico giratorio al rededor de la turbina, y solamente tener una malla dinámica en forma de paralelepípedo alrededor de la turbina. Esto puede funcionar al inicio de la simulación, sin embargo, a medida que la turbina va a tomando velocidad, el programa comienza a diverger, teniendo un problema de volúmenes negativos, lo cual ocurre debido a que las celdas se mueven muy rápido y no se logra hacer el proceso de remallado alrededor de la turbina. Al intentar ese tipo de simulación, los residuales fueron demasiado altos y termina en la divergencia del programa, con lo que se descartó este método.



(a) Divergencia en residuales

```
turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 12 cells
turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 12 cells
turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 12 cells
done.
WARNING: 124473 cells with non-positive volume detected.
Error at host: Update-Dynamic-Mesh failed. Negative cell volume detected.
=====Message from the Cortex Process=====
Compute processes interrupted. Processing can be resumed.
=====
Error: Update-Dynamic-Mesh failed. Negative cell volume detected.
Error Object: #1
Calculation complete.
```

(b) Error arrojado

Figura 4.45: Errores de convergencia

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 5

Resultados y Análisis

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos a través de las simulaciones computacionales realizadas en Ansys Fluent, en donde se consigue el momento y la velocidad angular en función del tiempo, con estos dos parámetros, es posible calcular la potencia, coeficiente de torque, coeficiente de potencia y eficiencia para cada turbina simulada. Cada simulación fue hecha poniendo como condición de entrada una velocidad de viento de 8 [m/s] y una velocidad tangencial en la turbina de 8 [m/s], es decir, igual a la velocidad del viento, teniendo un tip speed ratio (TSR) de 1.

5.1 Resultados de turbina Savonius

Los datos anteriormente mencionados, pueden presentarse tanto en función del tiempo como de la posición angular de la turbina, por lo que es importante mencionar, que el sistema de referencia tomado para la turbina Savonius es el siguiente:

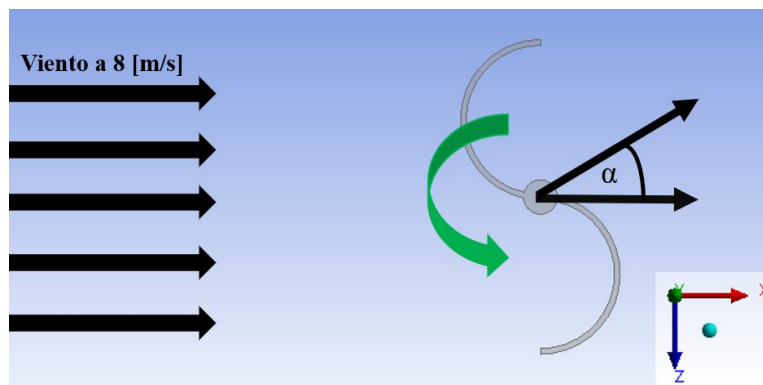


Figura 5.1: Sistema de referencia turbina Savonius

Fuente: Elaboración propia.

En la posición de la imagen, la turbina se encuentra orientada con un ángulo $\alpha = 0$ en un tiempo igual a cero. El tiempo y el ángulo van aumentando a medida que la turbina se mueve en sentido antihorario, puesto que el viento viaja de izquierda a derecha. Tras modelar 3 vueltas con estas condiciones se obtienen los siguientes gráficos de momento y velocidad angular:

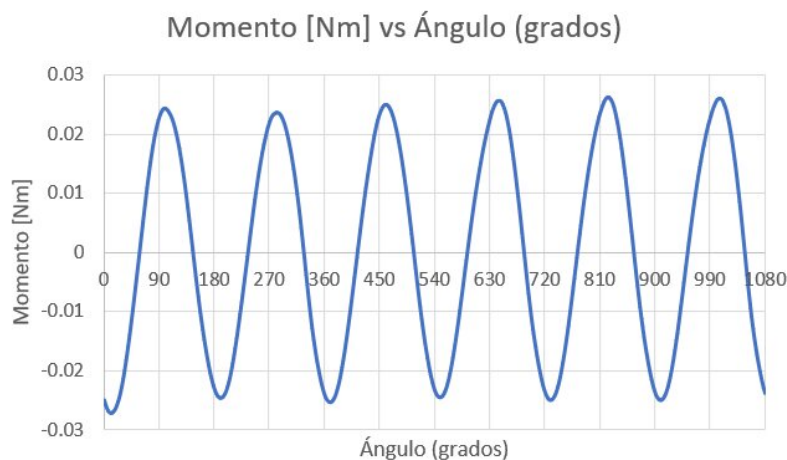


Figura 5.2: Curva de Momento [Nm] vs Ángulo (grados)

Fuente: Elaboración propia.

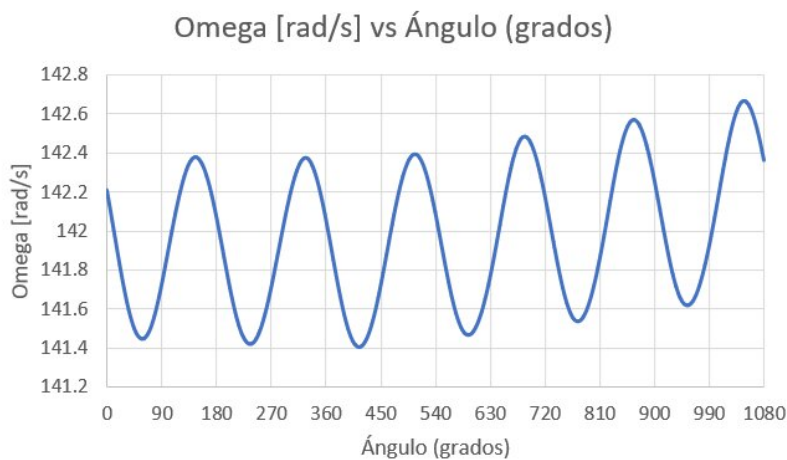


Figura 5.3: Curva de Omega [rad/s] vs Ángulo (grados)

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar, que para que la turbina tenga una velocidad tangencial de 8 [m/s], la velocidad angular debe ser de 144,4 [rad/s] aproximadamente, en los gráficos se puede ver una velocidad angular levemente menor, esto es debido a que se deja andar un poco la simulación

antes de tomar los datos para dar tiempo a que se establezca la solución y el análisis sea más realista. Dicho esto, se puede observar un torque oscilante entre valores positivos y negativos de similar magnitud a medida que pasa el tiempo, con un valor máximo de $0,0261 \text{ [Nm]}$ y mínimo de $-0,0272 \text{ [Nm]}$, además, cuando los valores de torque son negativos la velocidad angular tiende a disminuir levemente, mientras que cuando son positivos esta aumenta. Con estos datos junto a la modelación de velocidad angular se puede obtener la potencia entregada por la turbina en función del tiempo y posición:

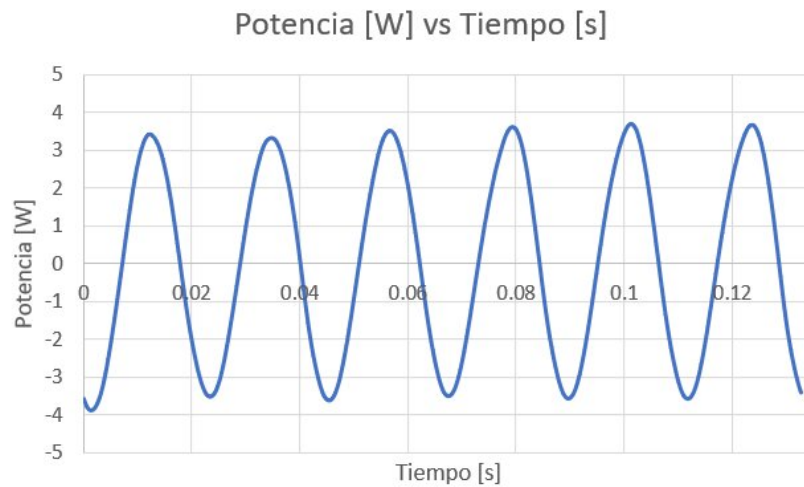


Figura 5.4: Curva de Potencia [W] vs Tiempo [s]
Fuente: Elaboración propia.

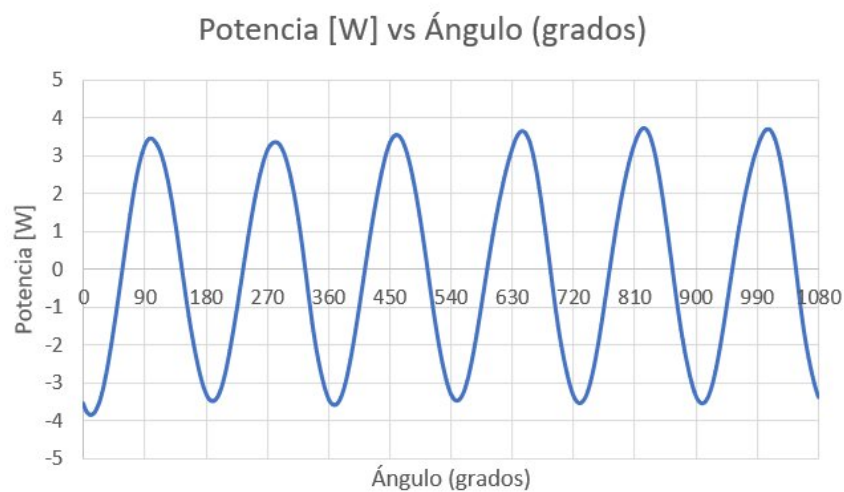


Figura 5.5: Curva de Potencia [W] vs Ángulo (grados)
Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que la turbina Savonius, alcanza una potencia máxima de 3,71 [W] cuando se encuentra en la posición de $823,5^\circ$ (equivalente a $103,5^\circ$) respecto a la referencia inicial y también se tiene un valor negativo mínimo de -3.86 [W] cuando se encuentra en una posición de $11,39^\circ$. El torque positivo se genera cuando el momento de la pala cóncava (la de abajo según la imagen de referencia) es mayor que el de la pala convexa (la de arriba según la imagen de referencia). Mientras que el torque negativo, se genera cuando la pala convexa produce un torque mayor a la pala cóncava, lo cual conlleva a una leve disminución en la velocidad angular cada vez que esto ocurre, es por ello que tanto el torque como la velocidad angular, son oscilantes. Además, tras calcular la potencia promedio, este valor resulta ser 0,027 [W], significando también una eficiencia promedio igual a 0,44%. Para visualizar de mejor manera la explicación, se muestra la turbina en su posición inicial y en 45° .

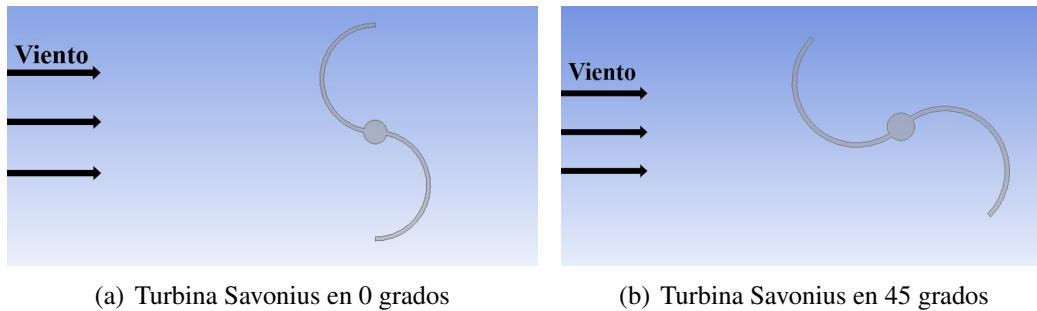


Figura 5.6: Posicionamiento de turbina Savonius

Fuente: Elaboración propia.

Además para complementar, se muestra la turbina en las ubicaciones de 90° y 135° .

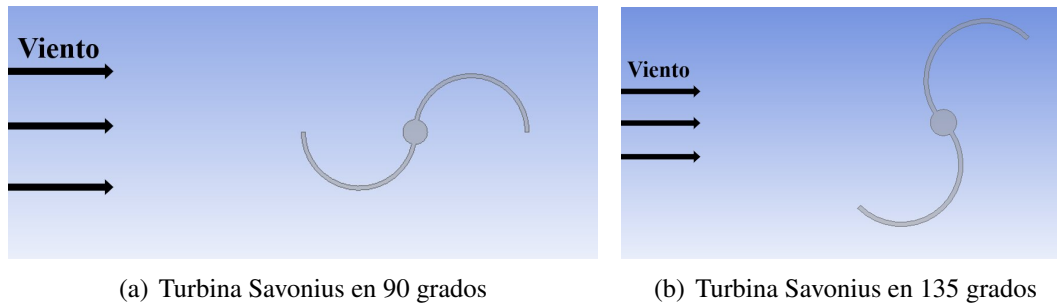


Figura 5.7: Posicionamiento de turbina Savonius

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se muestra una gráfica con los residuales de la simulación de la turbina Savonius, la cual demuestra valores de convergencia adecuados.

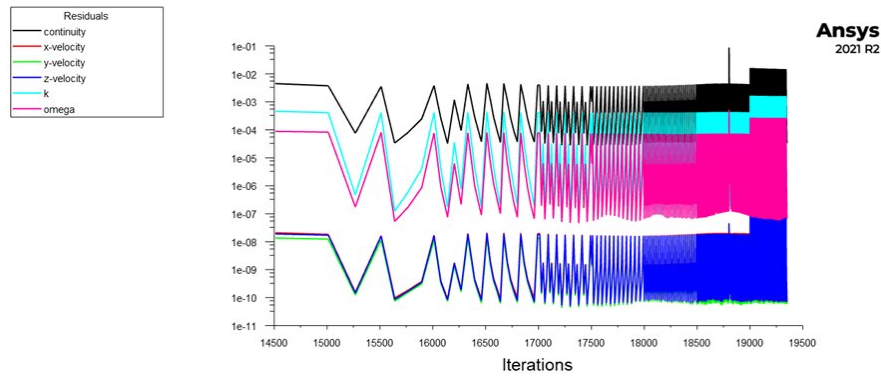


Figura 5.8: Residuales en simulación de turbina Savonius
Fuente: Elaboración propia.

5.2 Resultados de turbina Darrieus

Para la construcción de los gráficos de la turbina Darrieus, el sistema de referencia para la posición se basa en la siguiente figura:

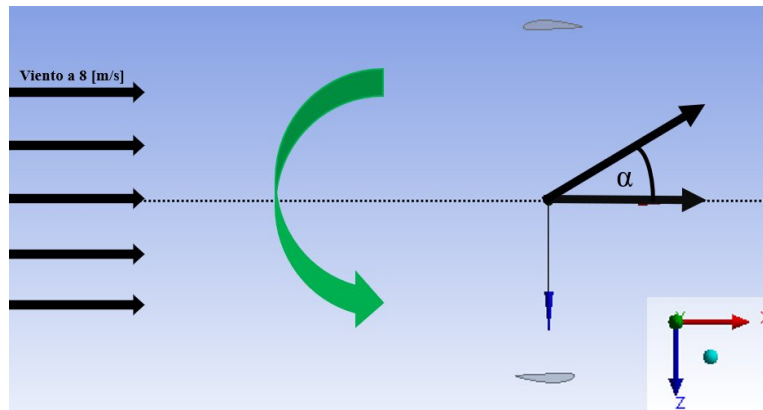


Figura 5.9: Posición inicial de turbina Darrieus
Fuente: Elaboración propia.

Al igual que para la turbina Savonius, la imagen referencial de la turbina Darrieus indica su posición en el instante inicial con un tiempo igual a cero, la cual está orientada en un ángulo $\alpha = 0$ de acuerdo al sistema de referencia utilizado, además su movimiento se genera en sentido antihorario, pues el viento viaja de izquierda a derecha, lo cual genera fuerzas de sustentación que producen el movimiento en este sentido. Tras modelar 3 vueltas con estas condiciones se obtienen los siguientes gráficos de momento y velocidad angular:

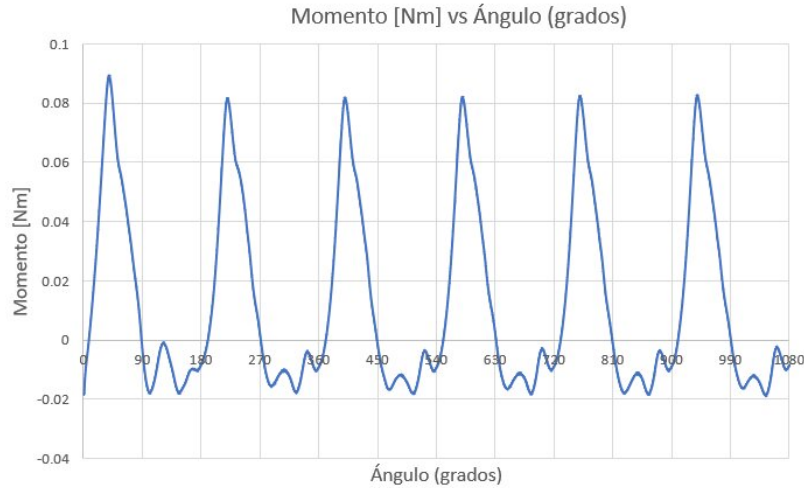


Figura 5.10: Curva de Momento [Nm] vs Ángulo (grados)
Fuente: Elaboración propia.

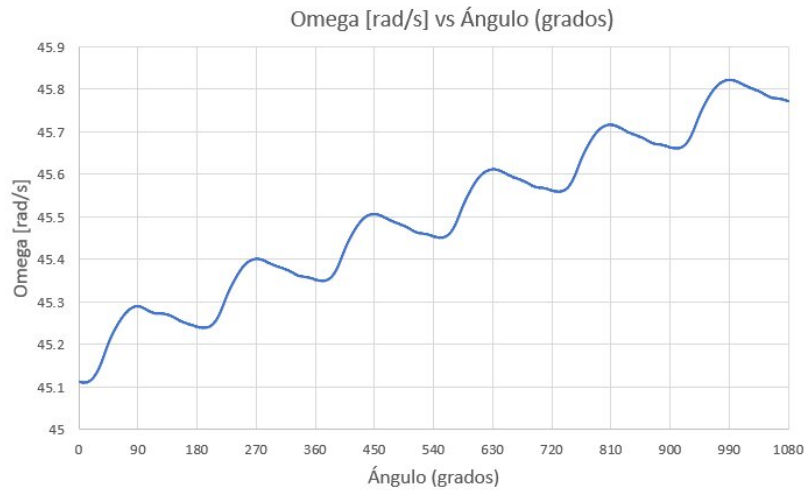


Figura 5.11: Curva de Omega [rad/s] vs Ángulo (grados)
Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar un torque con una forma periódica, mayormente dentro de valores positivos, con un máximo de 0,0889 [Nm] y mínimos que alcanzan los -0,0186 [Nm], además la velocidad angular tiende a ir en aumento, debido a que la sumatoria de torque positivo es mayor a la suma de torques negativos. Nuevamente se puede observar una tendencia de la velocidad angular a aumentar al mismo tiempo en que se tienen valores de torque positivos y tiende a disminuir en menor medida cuando el torque es negativo (debido a que estos valores negativos de torque son de menor magnitud). Con estos datos junto a los modelados

de velocidad angular se puede obtener la potencia entregada por la turbina en función del tiempo, lo cual se muestra en el siguiente gráfico:

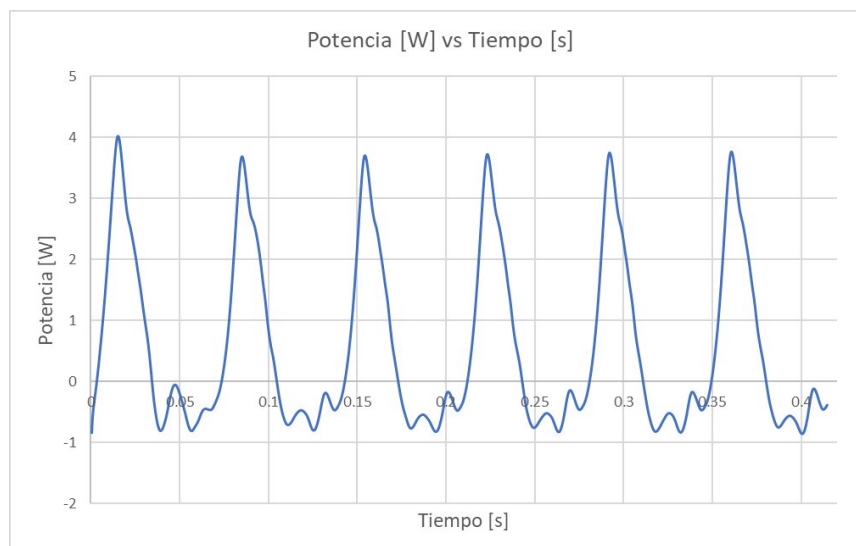


Figura 5.12: Curva de Potencia [W] vs Tiempo [s]

Fuente: Elaboración propia.

La potencia alcanza un máximo de 4,01 [W] y un mínimo de -0,854 [W]. Para visualizar de mejor manera la potencia entregada según la posición de la turbina, se realiza un gráfico de la Potencia [W] vs Ángulo (grados), de la misma manera en que se hizo con la turbina Savonius, esta vez utilizando como referencia la figura 5.9.

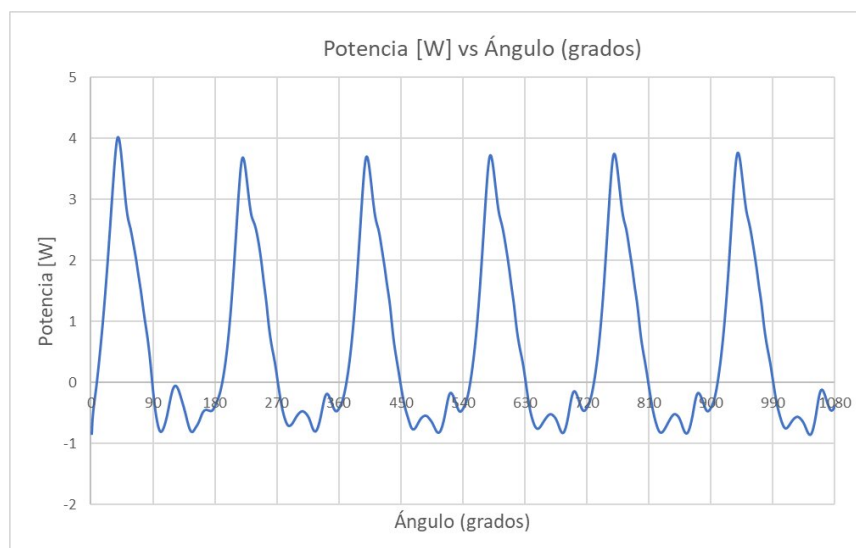


Figura 5.13: Curva de Potencia [W] vs Ángulo (grados)

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la turbina logra valores positivos de torque cuando su posición se encuentra entre 0° y 90° , y tiene valores negativos entre 90° y 180° aproximadamente. Esto ocurre, porque desde 0° a 90° el álabe que se mueve en dirección contraria al viento con un ángulo de ataque que permite una sustentación eficiente y efectiva, mientras que entre 90° y 180° , ningún álabe está en un punto favorable para la sustentación, lo cual provoca fuerzas de arrastre en la turbina en sentido horario es decir, opuesto al giro, por parte del álabe que se encuentra más a la derecha. El torque vuelve a ser positivo cuando el segundo álabe se encuentra en una posición favorable para generar la sustentación, repitiendo así cíclicamente este comportamiento.

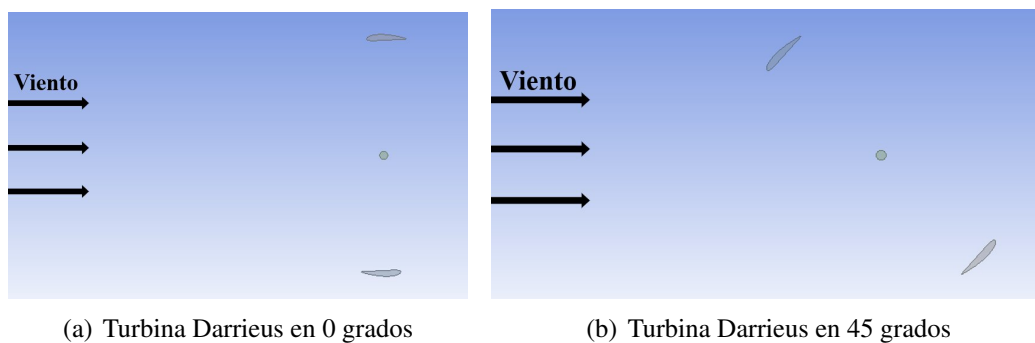


Figura 5.14: Posicionamiento de turbina Darrieus
Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el caso anterior, se muestra la turbina en las ubicaciones de 90° y 135° .

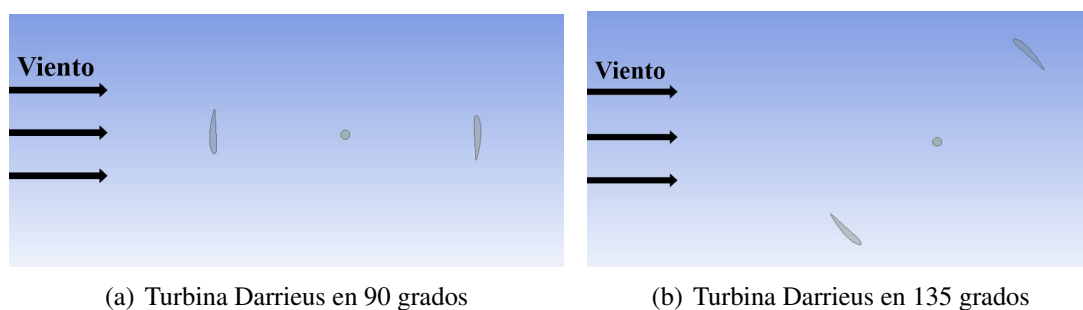


Figura 5.15: Posicionamiento de turbina Darrieus
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta además la gráfica de residuales:

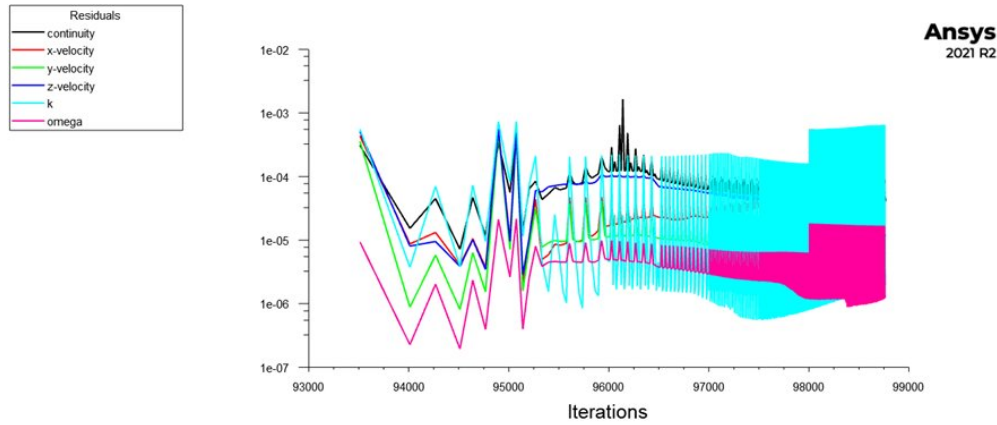


Figura 5.16: Residuales en simulación de turbina Darrieus
Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que los residuales son bastante bajos a la hora de alcanzar la convergencia, teniendo valores mínimos cercanos al criterio de convergencia establecido. Como último inciso respecto a la turbina Darrieus, se muestran a continuación los contornos de velocidad del viento en los instantes finales de la simulación:

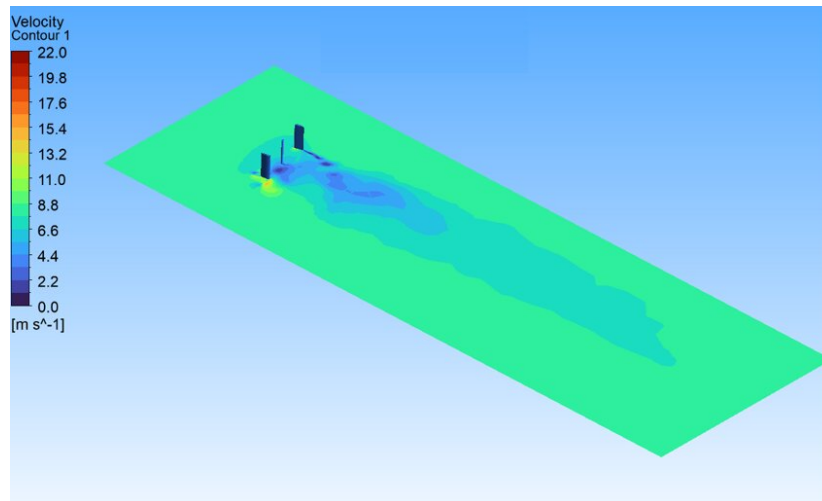


Figura 5.17: Velocidad del viento en [m/s] para turbina Darrieus en instante final
Fuente: Elaboración propia.

5.3 Resultados de turbina Darrieus-Savonius

Para la turbina Darrieus-Savonius, los resultados son modelados con la siguiente imagen referencial:

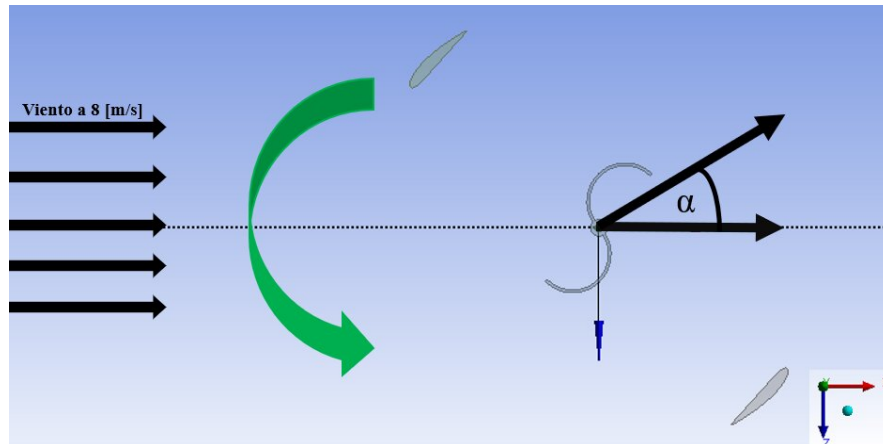


Figura 5.18: Posición referencial turbina Darrieus-Savonius

Fuente: Elaboración propia.

En donde al igual que en las demás turbinas, la posición mostrada en la imagen muestra una orientación de la turbina en un ángulo $\alpha = 0$ en un tiempo igual a cero. A continuación se pueden ver las gráficas de momento y velocidad angular obtenidas.

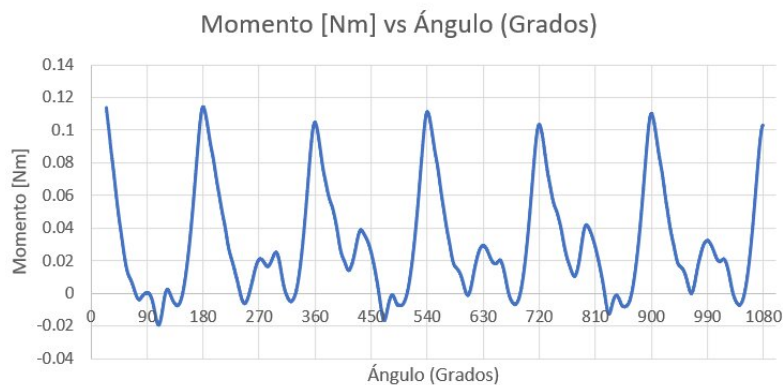


Figura 5.19: Curva de Momento [Nm] vs Ángulo (grados)

Fuente: Elaboración propia.

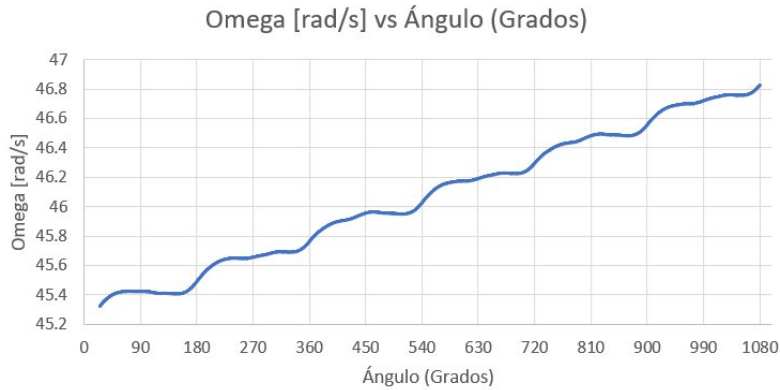


Figura 5.20: Curva de Omega [rad/s] vs Ángulo (grados)

Fuente: Elaboración propia.

La turbina presenta un momento con una forma periódica, con un máximo de 0,114 [Nm] y un mínimo de -0,0191 [Nm]. Se puede destacar, que el valor máximo de torque es mayor que en las otras dos turbinas, además la velocidad angular tiende a aumentar con una variación mayor que en el caso de la turbina Darrieus, con estos datos se construye el gráfico de Potencia [W] vs Ángulo (grados) que se presenta a continuación:

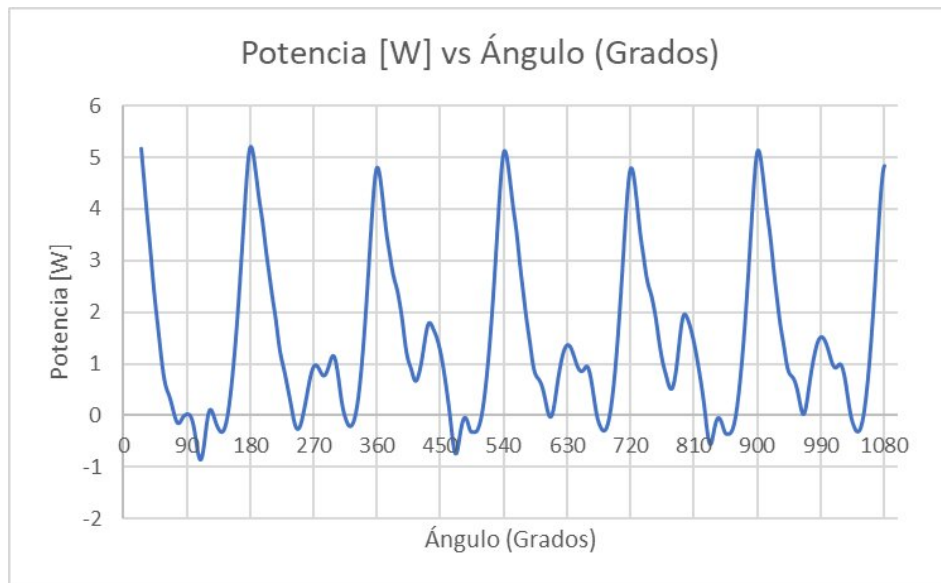
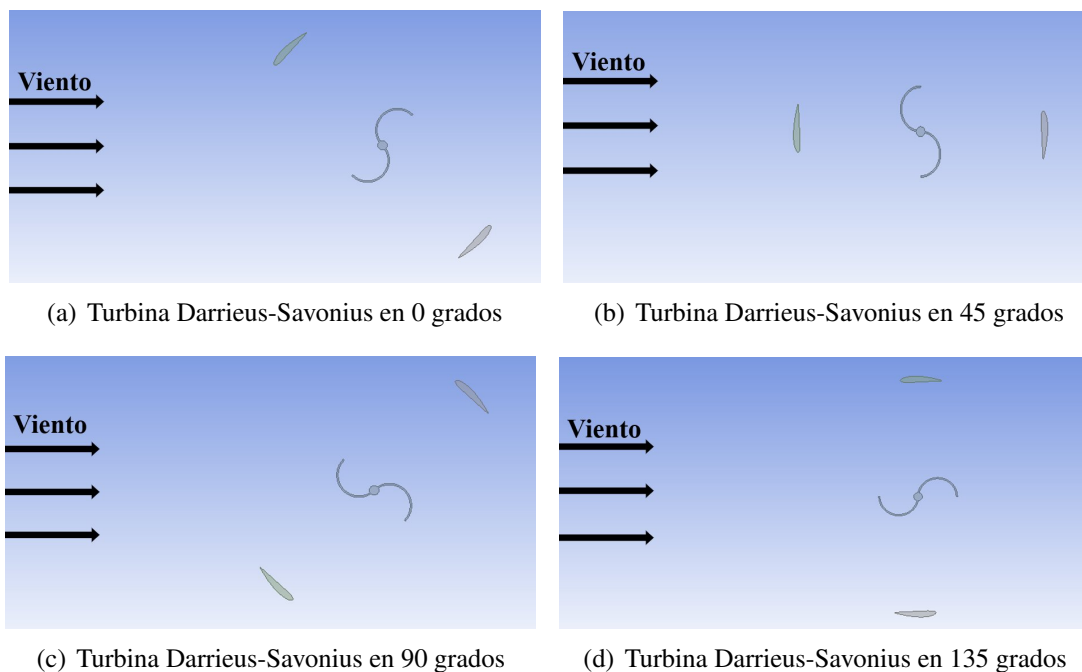


Figura 5.21: Potencia [W] vs Ángulo (grados)

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que la potencia mínima alcanzada por la turbina de -0.86 [W] y una potencia máxima de 5.196 [W] además, los peaks de potencia se logran cada 180° una vez comenzada la simulación desde la posición inicial. Las variaciones en la forma de la gráfica

dentro de una misma vuelta (360°) pueden explicarse de manera similar a las dos turbinas anteriores, con las fuerzas variables de sustentación y arrastre presentes en la estructura. Como en los casos anteriores, se muestra el posicionamiento de la turbina:



El gráfico de los residuales de la turbina Darrieus-Savonius presenta valores bajos, indicando una buena convergencia como se puede ver a continuación:

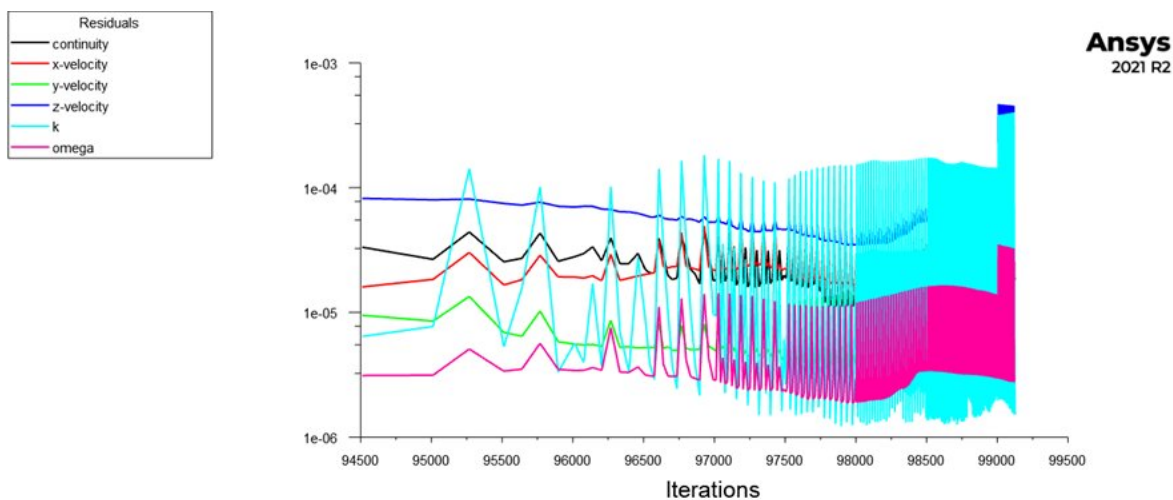


Figura 5.22: Residuales en simulación de turbina Darrieus-Savonius

Fuente: Elaboración propia.

Como último registro de la simulación, se muestra una gráfica de los contornos de velocidad del viento para la turbina Darrieus-Savonius.

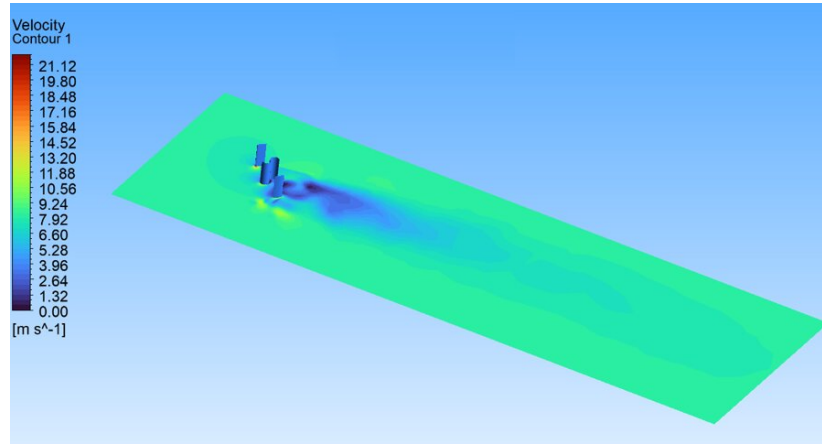


Figura 5.23: Velocidad del viento en [m/s] para turbina Darrieus-Savonius en instante final.
Fuente: Elaboración propia.

5.4 Resumen de los datos

A continuación, se presenta un resumen de los datos relevantes de la simulación, de los cuales, algunos pueden ser extraídos directamente de las gráficas, mientras que otros deben ser calculados. En el presente caso, para calcular el coeficiente de potencia y la eficiencia, se debe estudiar la relación entre la potencia producida por la turbina (P_t) y la potencia entregada por el viento (P_w). Para llevar esto a cabo se calcula la potencia entregada por el viento de la siguiente manera para cada turbina:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (5.1)$$

Turbina Savonius

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot 1,225[kg/m^3] \cdot (0,1108 \cdot 0,3)[m^2] \cdot (8[m/s])^3 = 10,42[W]$$

Turbinas Darrieus y Darrieus-Savonius

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot 1,225[kg/m^3] \cdot (0,354 \cdot 0,3)[m^2] \cdot (8[m/s])^3 = 33,30[W]$$

Dicho esto, se presenta un cuadro resumen de los parámetros relevantes calculados utilizando los gráficos de la simulación y datos del problema, todo esto utilizando las fórmulas de la sección (3.3.3 ecuaciones de potencia).

Tabla 5.1: Resumen de parámetros de las turbinas

Parámetro/Turbina	Savonius	Darrieus	Darrieus-Savonius
P_w	10,42 [W]	33,30 [W]	33,30 [W]
Pt_{max}	3,71 [W]	4,02 [W]	5,196 [W]
Pt_{prom}	0,027 [W]	0,558 [W]	1,52 [W]
Cp_{max}	0,356	0,121	0,156
Cp_{prom}	0,00259	0,016	0,0458
$\eta_{promedio}$	0,44%	2,83%	7,96%
Desviación estándar	2,52 [W]	1,41 [W]	1,78 [W]
Varianza	6,38 [W]	2,005 [W]	3,19 [W]

Con ello se puede observar que la turbina que llega a generar la mayor potencia es la Darrieus-Savonius con un máximo de 5,196 [W], la turbina Darrieus cuenta con una potencia máxima de 4,02 [W] siendo un 77% de la turbina híbrida, y la turbina Savonius genera 3,71 [W] como potencia máxima, siendo un 71% de la turbina Darrieus-Savonius. Respecto a los valores promedio, la turbina Darrieus-Savonius produce una potencia promedio de 1,52 [W] siendo esto 2,72 veces mayor a la potencia promedio producida por la turbina Darrieus y 56,29 veces mayor a la turbina Savonius, lo cual tiene sentido pues esta última es más pequeña y además en el tip speed ratio evaluado tiene muchos valores de torque negativo. Respecto a la eficiencia promedio, la Darrieus-Savonius resulta tener valores mayores a las demás, debido a que cuenta con mayores valores positivos de torque y por ende de potencia.

5.5 Tiempo de cálculo

Es importante conocer tiempos de cálculo en la modelación computacional. En este estudio, se emplea el mismo computador pero con distinto número de procesadores utilizados, los cuales son especificados en la tabla. El tiempo de cálculo está basado en el tiempo promedio de las últimas 100 iteraciones, con este se hace una proyección del tiempo total de cálculo, utilizando el número de iteraciones necesarias para conseguir el cálculo realizado.

Tabla 5.2: Resumen de características de la malla

Turbina	Nº de procesadores	Tiempo por iteración	Tiempo total
Savonius	28	2.176 [s]	3,6 [h]
Darrieus	10	6.623 [s]	182,25 [h]
Darrieus-Savonius	18	11.293 [s]	310,38 [h]

5.6 Perspectivas del trabajo

A pesar de los esfuerzos dedicados a realizar la modelación computacional lo mejor posible, como en cualquier campo de la ciencia y la tecnología, existen áreas en las que se puede profundizar, siempre que se cuente con los equipos y el tiempo necesario para lograrlo, ante esto, para futuros trabajos se recomienda lo siguiente:

- Comparar los resultados con otros modelos de turbulencia que se puedan adaptar al problema dado.
- Realizar las modelaciones para distintas velocidades de viento.
- Refinar la malla en mayor medida y verificar resultados.
- Realizar cálculos para distintos tip speed ratio y así tener un mayor rango de resultados.
- Proponer nuevas geometrías de turbinas y comparar con el caso estudiado.

Capítulo 6

Validación

6.1 Ejemplo N°1 de validación

Para la validación, se compara con datos extraídos de un estudio experimental llamado "Investigations on the Effect of Radius Rotor in Combined Darrieus-Savonius Wind Turbine" de Kaprawi Sahim, Dyos Santoso y Dewi Puspitasari. En estos experimentos se toman los datos de un generador Savonius, Darrieus, y Darrieus-Savonius de una escala similar a la simulada.

El objetivo de este estudio es llevar a cabo una medición del coeficiente de potencia máximo las turbinas mencionadas, considerando tres relaciones de diámetro diferentes entre las turbinas Darrieus y Savonius, las cuales son de 0,33, 0,52 y 0,76, siendo como es de esperarse, la turbina Darrieus de mayor diámetro conformando la zona exterior, y la turbina Savonius de menor diámetro conformando la zona interior. A continuación, se puede ver una imagen de las condiciones en las que se realiza el experimento y la medición:

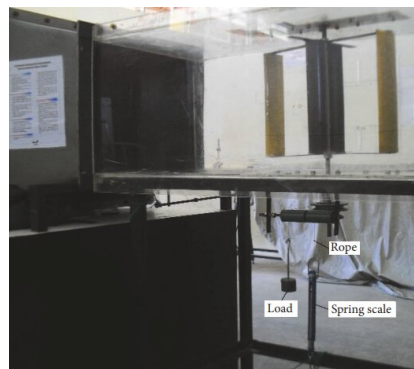


Figura 6.1: Túnel de viento del estudio para validación

Fuente: <https://www.hindawi.com/journals/ijrm/2018/3568542/>

La turbina Savonius tiene una razón de aspecto de 2.7 y una altura de 300 [mm], por lo que su radio es aproximadamente de 55,5 [mm]. En cuanto al álabe Darrieus, su longitud de cuerda es de 60 [mm] y el diámetro total de la turbina Darrieus es de 340 [mm]. Sin embargo, es importante destacar que no se especifica si este diámetro se mide hasta la cuerda o hasta el punto más exterior de la turbina. Esta falta de precisión podría generar diferencias menores al comparar los resultados.

A continuación se presenta el gráfico de Coeficiente de potencia vs Tip speed ratio con una velocidad del viento de 8 [m/s], además en la imagen se señalan los resultados de coeficiente de potencia para un TSR igual a uno, tal y como se hizo en la simulación.

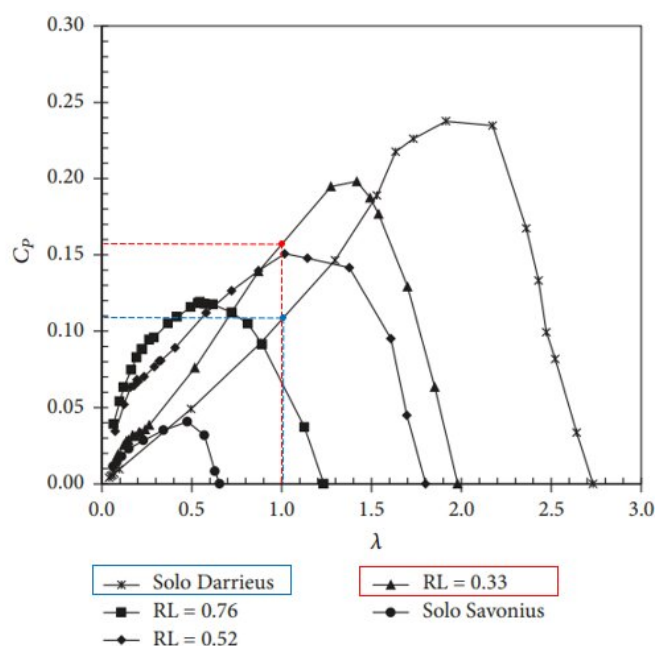


Figura 6.2: Comparación de coeficientes de potencia en caso de validación

Fuente: <https://www.hindawi.com/journals/ijrm/2018/3568542/>

En el análisis de la turbina Savonius, se observa que su coeficiente de potencia disminuye a medida que se acerca a un tip speed ratio cercano a 1, alcanzando su máximo rendimiento en torno a un tip speed ratio de 0,5. Por otro lado, tanto la turbina Darrieus como la Darrieus-Savonius superan en potencia a la turbina Savonius en todo su rango de velocidades cuando operan con un tip speed ratio igual a 1.

Además, al comparar la turbina Darrieus con la Darrieus-Savonius, se nota una ligera mejora en el coeficiente de potencia por parte de la turbina Darrieus-Savonius. en específico, para un tip speed ratio igual a 1, la turbina Darrieus alcanza un coeficiente de potencia aproximado de 0,11, mientras que la turbina Darrieus-Savonius logra un coeficiente de potencia de aproximadamente 0,155. Estos resultados se asemejan con las previas simulaciones real-

izadas en Ansys. Mientras que para la turbina Savonius no se tienen datos para este tip speed ratio, esto puede deberse a que a partir de un tip speed ratio de 0,7, esta turbina ya alcanza comienza a tener valores de coeficiente de potencia muy oscilantes, con un promedio cercano a cero.

6.2 Ejemplo N°2 de validación

Otro caso relevante que merece ser destacado es el estudio titulado "The Effect of Rotor Radius Ratio on The Performance of Hybrid Vertical Axis Wind Turbine Savonius-Darrieus NREL S809". Este estudio implica una simulación de diferentes configuraciones de turbinas, incluyendo Savonius, Darrieus y Darrieus-Savonius, a una velocidad del viento de 5.3 [m/s].

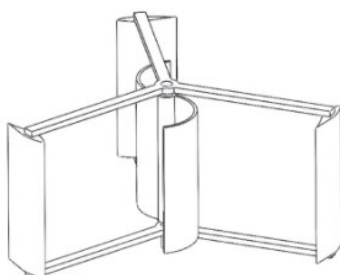


Figura 6.3: Turbina simulada en caso de validación

Fuente: <https://www.lidsen.com/journals/jept/jept-05-01-001>

Se observa una tendencia similar a la simulada en el presente trabajo cuando se evalúa el Tip Speed Ratio igual a 1. En este caso, se encuentra que el coeficiente de potencia es más bajo para la turbina Darrieus, mientras que la Darrieus-Savonius se encuentra en una posición intermedia y la Savonius posee el coeficiente de potencia más alto.

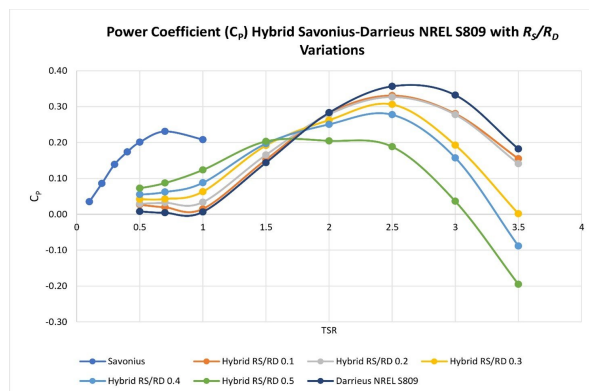


Figura 6.4: Cp vs TSR en ejemplo de simulación

Fuente: <https://www.lidsen.com/journals/jept/jept-05-01-001>

Para tener más datos con qué comparar, se simula un caso extra de la turbina Savonius del presente trabajo. Esta vez comenzando desde un tip speed ratio de 0,5 llegando hasta un TSR de 0,61 en su tercera vuelta (al alcanzar los 1080 grados), con ello se obtuvo el siguiente gráfico de potencia:

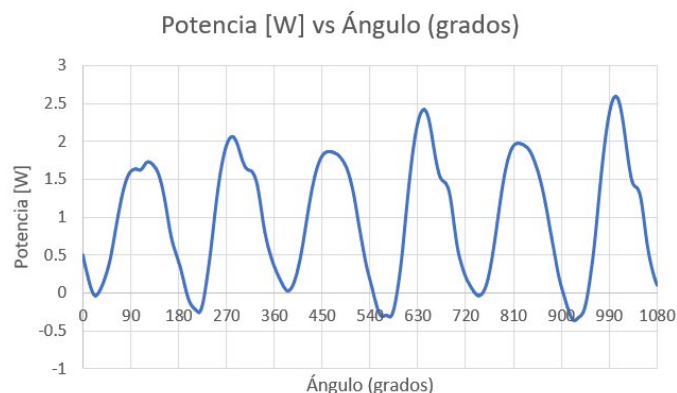


Figura 6.5: Curva de Potencia [W] vs Ángulo (grados)

Fuente: Elaboración propia

Además, se realiza un resumen de los datos calculados, obteniéndose la siguiente tabla:

Tabla 6.1: Resumen datos turbina Savonius con un TSR 0,5-0,61

Parámetro/Turbina	Savonius
P_w	10,42 [W]
Pt_{max}	2,599 [W]
Pt_{prom}	0,0979 [W]
Cp_{max}	0,249
Cp_{prom}	0,0939
$\eta_{promedio}$	15,92%

Se puede observar que se repite la tendencia de la turbina Savonius a tener un coeficiente de potencia máximo mayor a las demás turbinas disminuyendo el TSR evaluado, lo cual coincide con el la tentencia del último ejemplo de validación, además hay una mejora en la eficiencia promedio de la turbina Savonius para un TSR bajo, lo cual confirma que esta turbina tiene mejores resultados a velocidades bajas.

Capítulo 7

Conclusión

A modo de conclusión, las turbinas eólicas de eje vertical resultan ser una buena alternativa para la generación de potencia, siempre y cuando se utilicen en situaciones favorables de acuerdo a sus características, si bien, pueden tener menor potencia que las turbinas de eje horizontal, es importante evaluar las condiciones que se tienen para su utilización, puesto que cuando se tienen espacios reducidos y se busca tener menores costos en cuanto a fabricación y mantención resultan ser una gran elección. Referente a la simulación, se logra dar con un método de construcción de la geometría y mallado adecuados, realizando buenas prácticas que favorecen la convergencia del modelo y gracias a ello obtener resultados para visualizar de forma clara el comportamiento de las tecnologías presentes en la modelación. Para las tres turbinas simuladas con un tip speed ratio igual a 1, se obtiene que la turbina Darrieus-Savonius logra una eficiencia promedio de 7.96% y un coeficiente de potencia máximo de 0.156 [-] coincidiendo con resultados experimentales de una turbina de similares características, la turbina Darrieus por su parte, logra una eficiencia promedio de 2.83% y consigue un coeficiente de potencia máximo de 0.121 [-] lo cual tiene un porcentaje de error bajo respecto al resultado experimental con el cual se compara, mientras que la turbina Savonius logra una eficiencia promedio de 0.44% y un coeficiente de potencia máximo de 0.356 [-], este resultado, no está evaluado en la parte experimental del ejemplo número 1 de validación, sin embargo, con el ejemplo 2, se puede observar una tendencia de la turbina Savonius a tener un mayor coeficiente de potencia para un tip speed ratio igual a 1, seguida por la turbina Darrieus-Savonius y por último la turbina Darrieus. Además, es importante mencionar, que las estructuras están sometidas a torques oscilantes debido a las fuerzas de arrastre que se generan en contra del sentido del movimiento de la turbina, afectando de esta manera su eficiencia promedio y una generación de potencia con valores positivos en todo su espectro de movimiento.

Referencias

- [1] Ministerio de Energía. ¿qué son las energías renovables? <https://energia.gob.cl/educacion/que-son-las-energias-renovables>, 2021, diciembre.
- [2] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. Wiley & Sons, 2nd edition, 2010.
- [3] BBVA. ¿qué es el calentamiento global y cuáles son las causas? <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-el-calentamiento-global/>, abril 2022.
- [4] Revista ElectroIndustria. El avance de la energía eólica en chile. <https://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2596&ni=el-avance-de-la-energia-eolica-en-chile>, 2018.
- [5] Gustavo Richmond Maximino Jiménez Emanuel Fallas, José Padilla. Principales túneles de viento en la investigación sobre energía eólica alrededor del mundo. https://www.researchgate.net/publication/351764251_Principales_tuneles_de_viento_en_la_investigacion_sobre_energia_eolica_alrededor_del_mundos, 2021, abril.
- [6] Dewi Puspitasari Kaprawi Sahim. Effect of savonius blade height on the performance of a hybrid darrieus-savonius wind turbine. https://www.researchgate.net/publication/338250968_Effect_of_Savonius_blade_height_on_the_performance_of_a_hybrid_Darrieus-Savonius_wind_turbine, 2019, diciembre.
- [7] E. Cortesi, S. Scozzoli, P. Agatensi, and M. Castelluzzo. *Hybrid type vertical shaft turbine for wind power generating devices*. US Patent and Trademark Office, Patent Núm. 20110025071:A1, 2011.
- [8] J. M. P. Artigas. *Turbina eólica híbrida*. Patent (ES:1078572:U), Patent Núm. ES:1078572:U, 2013.

- [9] A. Drappo. Turbina ds3000: Aerogeneradores híbridos con eje vertical. <https://www.etneo.com/turbina-ds3000/?lang=es>, 2017, 7 noviembre.
- [10] Smaraad Store. Turbina eólica maglev permanente de eje vertical. <https://es.aliexpress.com/item/1005004128900618.html?spm=a2g0o.detail.0.0.2c362244cTt6Q6>, 2020, abril.
- [11] CDT. Vertical sky a32: el aerogenerador de eje vertical silencioso que ahorra espacio. <https://www.cdt.cl/vertical-sky-a32>, 2023, febrero.
- [12] Superintendencia de electricidad y combustibles. Diseño y ejecución de las instalaciones de generación eólicas conectadas a redes de distribución. <https://www.sec.cl/sitio-web/wp-content/uploads/2020/11/RGR-N03-2020-2.pdf>, 2020.
- [13] Acciona. Aerogeneradores. <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-eolica/aerogeneradores/>, 2020.
- [14] Arcadia. Vertical axis wind turbines advantages disadvantages. <https://blog.arcadia.com/vertical-axis-wind-turbines-advantages-disadvantages/>, 2023.
- [15] Electronic projec focus. What is a darrieus wind turbine its working. <https://www.elprocus.com/darrieus-wind-turbine-working/>, 2023.
- [16] Structuralia. Aerogeneradores de eje vertical y horizontal: tipos, ventajas e inconvenientes. <https://blog.structuralia.com>, 2018, julio.
- [17] América Vuela. Perfil aerodinámico: Partes y nomenclatura naca 4 dígitos. <https://vuela.com.mx/am/articulos/articulos-de-actualidad/12643-perfil-aerodinamico-partes-y-nomenclatura-naca-4-digitos.html>, 2021, noviembre.
- [18] Robert W. Fox, Philip J. Pritchard, and Alan T. McDonald. *Introduction to Fluid Mechanics*. John Wiley & Sons, 2009.
- [19] ESSS. El método de volúmenes finitos. <https://www.esss.co/es/blog/el-metodo-de-volumenes-finitos/>, 2023.
- [20] ANSYS Inc. Introduction to cfd methodology. https://imechanica.org/files/fluent_13.0_lecture02-intro-to-cfd.pdf, 2010.

- [21] Cadence. The reynolds-averaged navier-stokes (rans) equations and models. <https://resources.system-analysis.cadence.com>, S.f.
- [22] CFD Online. Two equation turbulence models. https://www.cfd-online.com/Wiki/Two_equation_turbulence_models, 2016, octubre.
- [23] autodesk. Sst k-omega turbulence models. <https://help.autodesk.com/view/SCDSE/2019/FRA/?guid=GUID-0F5C4828-9F91-46B6-A16A-2578D72DCFCC>, 2019.
- [24] CFD Online. Rng k-epsilon model. https://www.cfd-online.com/Wiki/RNG_k-epsilon_model, 2010, junio.
- [25] comtessa. Large eddy simulation. <https://comtessa-turbulence.net/large-eddy-simulation/>, 2021.
- [26] ANSYS Inc. Choosing the pressure-velocity coupling method. <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node785.htm>, 2009, 29 enero.

Anexo A: Código Matlab utilizado para la creación de perfil alar

```
%Author : Divahar Jayaraman (j.divahar@yahoo.com)
function af = naca4gen(iaf)
t=str2num(iaf.designation(3:4))/100;
m=str2num(iaf.designation(1))/100;
p=str2num(iaf.designation(2))/10;

a0= 0.2969;
a1=-0.1260;
a2=-0.3516;
a3= 0.2843;

if iaf.is_finiteTE ==1
    a4=-0.1015; % For finite thick TE
else
    a4=-0.1036; % For zero thick TE
end

% % [[Giving x-spacing]]
if iaf.HalfCosineSpacing==1
    beta=linspace(0,pi,iaf.n+1)';
    x=(0.5*(1-cos(beta))); % Half cosine based spacing
    iaf.header=['NACA' iaf.designation ' :
    [' num2str(2*iaf.n) 'panels,Half cosine x-spacing']'];
else
    x=linspace(0,1,iaf.n+1)';
    iaf.header=['NACA' iaf.designation '
    : [' num2str(2*iaf.n) 'panels,Uniform x-spacing']'];
```

```

end

yt=(t/0.2)*(a0*sqrt(x)+a1*x+a2*x.^2+a3*x.^3+a4*x.^4);

xc1=x(find(x<=p));
xc2=x(find(x>p));
xc=[xc1 ; xc2];

if p==0
    xu=x;
    yu=yt;

    xl=x;
    yl=-yt;

    zc=zeros(size(xc));
else
    yc1=(m/p^2)*(2*p*xc1-xc1.^2);
    yc2=(m/(1-p)^2)*((1-2*p)+2*p*xc2-xc2.^2);
    zc=[yc1 ; yc2];

    dyc1_dx=(m/p^2)*(2*p-2*xc1);
    dyc2_dx=(m/(1-p)^2)*(2*p-2*xc2);
    dyc_dx=[dyc1_dx ; dyc2_dx];
    theta=atan(dyc_dx);

    xu=x-yt.*sin(theta);
    yu=zc+yt.*cos(theta);

    xl=x+yt.*sin(theta);
    yl=zc-yt.*cos(theta);
end

af.name=['NACA ' iaf.designation];

af.x=[flipud(xu) ; xl(2:end)];
af.z=[flipud(yu) ; yl(2:end)];

indx1=1:min( find(af.x==min(af.x)) ); % Upper surface indices

```

```

indx2=min( find(af.x==min(af.x)) ):length(af.x);
% Lower surface indices
af.xU=af.x(indx1); % Upper Surface x
af.zU=af.z(indx1); % Upper Surface z
af.xL=af.x(indx2); % Lower Surface x
af.zL=af.z(indx2); % Lower Surface z

af.xC=xc;
af.zC=zc;

lecirFactor=0.8;
af.rLE=0.5*(a0*t/0.2)^2;

le_offs=0.5/100;
dyc_dx_le=(m/p^2)*( 2*p-2*le_offs );
theta_le=atan(dyc_dx_le);
af.xLEcenter=af.rLE*cos(theta_le);
af.yLEcenter=af.rLE*sin(theta_le);

% % [[Writing iaf data into file]]
if iaf.wantFile==1
    F1=iaf.header;
    F2=num2str([af.x af.z]);
    F=strvcat(F1,F2);
    fileName=[iaf.datFilePath 'naca' iaf.designation '.dat'];
    dlmwrite(fileName,F,'delimiter','')
end

iaf.designation='4415';
% designation='0008';
iaf.n=50;
iaf.HalfCosineSpacing=1;
iaf.wantFile=1;
iaf.datFilePath='./'; % Current folder
iaf.is_finiteTE=0;

af = naca4gen(iaf);

```

```
% plot (af.x,af.z,'bo-')

plot (af.xU,af.zU,'bo-')
hold on
plot (af.xL,af.zL,'ro-')
a=[af.xU,af.zU]
b=[af.xL,af.zL]
axis equal
```