

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Análisis y comparación de la eficiencia aerodinámica entre hélices toroidales y
convencionales mediante simulaciones

INGE-2581

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Nombre de la titulación

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Carlos Leonardo Mendoza Alava

Jean Pierre Bustamante Franco

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

El presente trabajo está dedicado a todas las personas que buscan enfocarse en la optimización de energías renovables. A las personas que tienen una mente creativa e innovadora, que quieren ir más allá de lo tradicional.

Agradecimientos

Agradezco a Dios, pues me brindo la sabiduría y la resiliencia en mi vida universitaria. A mis padres Liz Franco y Pedro Bustamante, por su apoyo en cada momento, al igual que mi hermana Maily Bustamante. De igual manera a las personas que conocí en el camino que aportaron en mi formación universitaria.

Jean Pierre Bustamante Franco

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la fuerza para realizar mis estudios. A mis padres y hermano por siempre darme toda la ayuda necesaria, desde lo económico hasta la espiritual, gracias a mi familia por hacer este sueño posible, por heredarme valores que fui aplicando en mi vida. A mi pareja Raquel Ruiz por apoyarme en mi tramo final de la carrera, a Gabriela Rodríguez que me acompañó en esta travesía Universitaria, y a mis amigos por darme enseñanzas y consejos en mi vida académica y social.

Carlos Leonardo Mendoza Alava

Declaración Expresa

Nosotros Jean Pierre Bustamante Franco y Carlos Leonardo Mendoza Alava acuerdo/acordamos y reconozco/reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 5 de mayo del 2024.


Jean Pierre Bustamante

Franco



Carlos Leonardo

Mendoza Alava

Evaluadores

José Macías Zambrano, MSc

Profesor de Materia

Carlos Cuenca Cabrera, MSc

Tutor de proyecto

Resumen

En la búsqueda de energías renovables que sean resilientes al cambio climático, se evalúan alternativas para la compensación del consumo energético, con un enfoque en los aerogeneradores con álabes más eficientes. Se analiza y compara el diseño innovador de la hélice toroidal con la hélice tradicional de 3 palas, teniendo como referencia las velocidades de viento en Loja y simulando el aerogenerador de manera estática e ideal.

En el modelamiento de la hélice toroidal, se escogió el perfil NACA 1412 debido a su equilibrio entre eficiencia y estabilidad. Se emplearon ecuaciones para diseñar la hélice toroidal, estructurar el mallado y definir el volumen de control para la simulación CFD.

Se desarrollaron simulaciones estáticas exponiendo a la hélice contra el viento, evaluando las cargas para obtener la potencia mecánica captada por las palas. Se tuvo en consideración la ley de Betz para equiparar con la tradicional. La hélice toroidal fue un 28.5% más eficiente en la producción de potencia mecánica que la convencional, a partir de una velocidad de viento de 13m/s, siendo un 22% más pequeña.

En definitiva, la hélice toroidal resulta ser una gran alternativa para futuras investigaciones, e implementarla no solo en Loja si no en otros lugares.

Palabras Clave: NACA, Potencia mecánica, velocidad de viento, álabes.

Abstract

En la búsqueda de energías renovables que sean resilientes al cambio climático, se evalúan alternativas para la compensación del consumo energético, con un enfoque en los aerogeneradores con álabes más eficientes. Se analiza y compara el diseño innovador de la hélice toroidal con la hélice tradicional de 3 palas, teniendo como referencia las velocidades de viento en Loja y simulando el aerogenerador de manera estática e ideal.

En el modelamiento de la hélice toroidal, se escogió el perfil NACA 1412 debido a su equilibrio entre eficiencia y estabilidad. Se emplearon ecuaciones para diseñar la hélice toroidal, estructurar el mallado y definir el volumen de control para la simulación CFD.

Se desarrollaron simulaciones estáticas exponiendo a la hélice contra el viento, evaluando las cargas para obtener la potencia mecánica captada por las palas. Se tuvo en consideración la ley de Betz para equiparar con la tradicional. La hélice toroidal fue un 28.5% más eficiente en la producción de potencia mecánica que la convencional, a partir de una velocidad de viento de 13m/s, siendo un 22% más pequeña.

En definitiva, la hélice toroidal resulta ser una gran alternativa para futuras investigaciones, e implementarla no solo en Loja si no en otros lugares.

Keywords: *NACA, Mechanical power, wind speed, blades.*

Índice General

Resumen	I
Abstract.....	II
Índice General	III
Índices de figuras	IX
Índice de tablas	X
Índice de Planos.....	XI
Capítulo 1	1
1.1. Introducción	2
1.1. Descripción del problema	7
1.2. Justificación del problema	8
1.3. Objetivos	8
1.3.1. Objetivos generales.....	8
1.3.2. Objetivos específicos	9
1.4. Marco Teórico	9
1.4.1. Ley de Betz	9
1.4.2. Perfiles NACA	10
1.4.3. Coeficiente de arrastre y sustentación	12
1.4.4. Método de volúmenes finitos.....	13
Capítulo 2.....	14
2.1. Metodología	15
2.2. Criterios de diseño	17
2.3. Alternativas de solución	18
2.4. Matriz de decisión	19
2.5. Diseño de la hélice toroidal	20
2.5.1. Selección del perfil	20
2.5.2. Factor de la velocidad punta.....	21
2.5.4. Velocidad de rotación de las palas del rotor del aerogenerador	22

2.5.5.	Ángulo óptimo del viento	23
2.5.6.	Factor de perdida	23
2.5.7.	Cuerda del perfil	23
2.5.8.	Fuerza ejercida del viento sobre los álabes.....	24
2.5.9.	Trayectoria de la hélice	24
2.6.	Potencia	26
2.7.	Momento torsional	26
2.8.	Proceso del diseño de la hélice toroidal	27
2.9.	Parámetros utilizados en ANSYS	29
2.9.1.	Tipo de elemento	29
2.9.2.	Volumen de control.....	30
2.9.3.	Mallado	32
2.9.4.	Independencia de malla	34
2.9.5.	Simulación de las hélices toroidales	35
Capítulo 3.....		37
3.1.	Trayectorias toroidales	38
3.2.	Diseño CAD	39
3.3.	Resultados obtenidos de la simulación.....	40
3.4.	Fuerzas obtenidas por cada ángulo de ataque	40
3.5.	Potencia producida por la hélice toroidal.....	41
3.6.	Velocidad de rotación y torque	43
3.7.	Presiones.....	44
3.8.	Análisis de resultados	45
3.8.1.	Costo de material para estructura.....	45
3.8.2.	Comparación de potencia entre hélice toroidal y convencional	48
Capítulo 4.....		49
4.1.	Conclusiones.....	50
4.2.	Recomendaciones.....	50
Referencias		51

APÉNDICE	53
ANEXOS.....	67

Abreviatura

ANSYS Analysis System

CAD Computational Aided

CAE Computer Aided Engineering

CFD Computational Fluid Dynamics

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

FVM Finite Volume Method

NACA National Advisory Committee for Aeronautics

Simbología

A	Área transversal
A_p	Área de efecto
A_f	Área frontal de álabes
B	Número de álabes
C_l	Coefficiente de sustentación
C_d	Coefficiente de arrastre
F_i	Factor de pérdida
F_{ah}	Fuerza ejercida del viento sobre los álabes
kg	Kilogramos
kN	Kilo Newton
kPa	Kilo Pascales
kW	Kilo Watts
m	Metro
mm	Milímetro
N	Newton
P	Potencia
R	Radio del aerogenerador

rad	Radianes
s	Segundos
V	Velocidad del viento
V_{∞}	Velocidad del fluido
α	Ángulo de ataque
λ	Factor de la velocidad punta
ω	Velocidad de rotación
φ	Ángulo óptimo del viento
T	Momento Torsional
kNm	KiloNewton - metro

Índices de figuras

Figura 1.1 Modelo convencional de hélice y prototipo de hélice toroidal.....	4
Figura 1.2 .Aporte de Megavatios por Bloques de Energías Renovables.....	5
Figura 1.3. Partes de perfiles NACA.....	11
Figura 1.4. Mallado de tubería por el método de volúmenes finitos (FVM)	13
Figura 2.1. Diagrama de flujo	16
Figura 2.2. Hélice toroidal con ángulo de ataque 5° (Solución A).....	18
Figura 2.3. Hélice toroidal con ángulo de ataque 10° (Solución B)	18
Figura 2.4. Hélice toroidal con ángulo de ataque 15° (Solución C)	19
Figura 2.5. Gráfico con relación de radios para el aerogenerador	22
Figura 2.6. Perfil NACA con las variables geométricas para construcción de la trayectoria toroidal	25
Figura 2.7. Trayectoria representativa de hélice toroidal	25
Figura 2.8 Imagen demostrativa del perfil Naca 1412	27
Figura2.9 Vista 3d de la trayectoria toroidal con los perfiles NACA	29
Figura 2.10 Tipos de elementos para FVM	30
Figura 2.11 Dominio computacional de una turbina hidro cinética (Silva, 2014).....	31
Figura 2.12 Ejes referenciales utilizados en para la simulación.....	31
Figura 2.13 Volumen de control de la Hélice Toroidal.....	32
Figura 2.14 Gráficos de barras con la calidad de elementos y tipos de elementos	34
Figura 3.1. Trayectorias en el plano "XY" de las hélices toroidales	38
Figura 3.2. Vista isométrica y frontal de la hélice toroidal	39
Figura 3.3. Vista isométrica de la hélice toroidal con ángulo de ataque de 15°.....	40
Figura 3.4. Gráfica de Fuerza vs tiempo de simulación para la velocidad de 12m/s.....	41
Figura 3.5 Gráfica de Potencia vs la velocidad de viento, de las hélices toroidales con los distintos ángulos de ataque y el modelo tradicional de 3 palas.....	42
Figura 3.6 Imagen de las cargas ejercidas por el viento en la hélice toroidal de 15° a una velocidad de 20m/s.....	44
Figura 3.7 Vista en corte de la hélice toroidal de 15 grados	46
Figura 3.8 Gráfica de Potencia vs velocidad de viento entre la hélice toroidal vs el modelo convencional.....	48

Índice de tablas

Tabla 1.1. Presentación de las energías renovables no convencionales ventajas, desventajas y su eficiencia.	6
Tabla 2.1. Matriz de decisión de las soluciones propuestas.	19
Tabla 2.2. Relación entre la velocidad punta y el número de álabes	21
Tabla 2.3. Dimensiones de cuerdas del perfil aerodinámico con distintos ángulos de ataque....	28
Tabla 2.4. Dimensiones de las paredes del volumen de control para el aerogenerador de 15 grados	32
Tabla 2.5. Mallado de las hélices toroidales con diferentes ángulos de ataque	33
Tabla 2.6. Iteraciones de la calidad del mallado en ANSYS.....	33
Tabla 2.7. Relación porcentaje y fuerza de la hélice toroidal	35
Tabla 2.8. Tiempos de simulación con respecto a cada velocidad de viento	35
Tabla 2.9. Características y especificaciones de los ordenadores empleados	36
Tabla 3.1. Fuerzas obtenidas con respecto a cada ángulo de ataque de la hélice toroidal.....	41
Tabla 3.2. Potencia mecánica generada a diferentes velocidades de viento por cada hélice toroidal	42
Tabla 3.3. Torque y velocidad de rotación con respecto a las velocidades de viento de la hélice toroidal de 15 ⁰	43
Tabla 3.4. Torque y velocidad de rotación con respecto a las velocidades de viento de la hélice toroidal de 10 ⁰	43
Tabla 3.5. Torque y velocidad de rotación con respecto a las velocidades de viento de la hélice toroidal de 5 ⁰	43
Tabla 3.6. Presiones máximas y mínimas por cada ángulo de ataque de la hélice toroidal	44
Tabla 3.7. Precio estimado del material para la estructura de la hélice toroidal por cada ángulo de ataque	45
Tabla 3.8. Ventajas y desventajas de las hélices toroidales	47

Índice de Planos

PLANO 1	Hélice Toroidal De 5°
PLANO 2	Hélice Toroidal De 10°
PLANO 3	Hélice Toroidal De 15°

Capítulo 1

1.1. Introducción

En los últimos años se ha desarrollado tecnología para la producción de energía sostenible, en donde la concientización del correcto consumo por los distintos países está enfocada en la conservación de los recursos naturales del planeta. La investigación y desarrollo en los tipos de energías renovables como la solar, mareomotriz, geotérmica y eólica se han vuelto crucial, siendo esta última energía una de las menos aprovechadas por distintos factores, tales como: instalación, mantenimiento y corrientes de viento. Otros de los problemas presentados por el consumo de energía, es el abastecimiento de redes eléctricas en hogares que se encuentran en zonas rurales, de manera que el uso de energía solar o eólica terminan siendo un recurso necesario.

La energía que puede ser aprovechada por el viento, ha sido de gran interés en el desarrollo tecnológico del ser humano hace varios siglos, por esta razón se está buscando nuevos diseños y maneras de aprovechar este recurso casi inagotable. Sin embargo, el alemán Albert Betz (como se citó en Checa y Rosero, 2018) en 1919 demostró que solo se puede aprovechar el 59% de la energía cinética en mecánica para los aerogeneradores, de manera que, la eficiencia de un dispositivo eólico limita la propuesta de nuevas soluciones.

Por otro lado, se debe considerar dos tipos de aerogeneradores: *Onshore* y *Offshore*. La primera puede levantarse sobre la superficie terrestre y la segunda sobre el mar. Las instalaciones *Onshore* entrega una potencia nominal menor que la de *Offshore*, esto se debe a que la segunda alternativa se encuentra más expuesta a las corrientes de aire por su ubicación en zonas costeras; sin embargo, tiene un costo mayor en cada aspecto, desde su instalación hasta su mantenimiento (Araujo, 2022).

La energía eólica ha reducido los costos de producción de consumo a través del tiempo, de manera que se ha ido implementando aerogeneradores en diferentes partes del mundo como una solución a esta problemática, no solo para tener un buen impacto ambiental, sino también para mejorar el sector económico. En la actualidad se buscan otras formas de optimizar los costos, en donde se modifican y experimentan las variantes de hélices para tener el mayor rendimiento posible, empleando alternativas como el método de elementos finitos mediante simulaciones.

La implementación de las hélices toroidales es una de las alternativas con mayor proyección en el mercado de la tecnología sostenible, estos aerogeneradores aprovechan la energía cinética del viento o fluidos como el agua de forma más eficiente que las hélices de tipo convencional (BOATTEST, 2022), reduciendo los torbellinos que se generan detrás de las hélices al propulsarse. Se han realizado estudios sobre la importancia de querer implementar la hélice toroidal como nueva fuente de distribución de energía eólica, donde se evalúa la interacción entre el fluido y la estructura del aerogenerador a fin de analizar la potencia mecánica de la hélice de forma estática.

En la Figura 1.1. (b) se observa la geometría toroidal, con diseño de palas completamente diferentes con respecto a la hélice convencional, que en contraste a la Figura 1.1. (a) sigue una trayectoria más lineal.

Figura 1.1 Modelo convencional de hélice y prototipo de hélice toroidal

(a) Hélice convencional



(b) Hélice toroidal



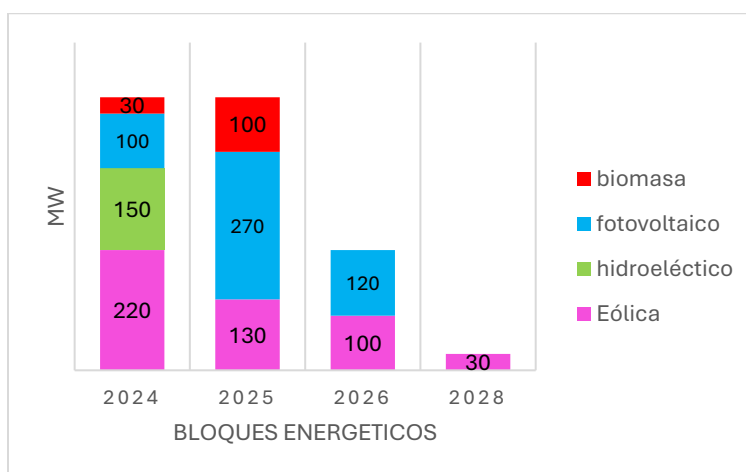
Nota: La Figura 1.1. (a) fue tomada del sitio web Printables (WindingMotor, 2022). Por otro lado, la Figura 1.1. (b) es de elaboración propia en el software INVENTOR.

Las corrientes de viento son variables en las distintas localidades del Ecuador, en la ciudad de Quito, las velocidades de vientos que se presentan en la capital del Ecuador se encuentran en un rango entre los 5 km/h a 19 Km/h (meteoblue, 2023), de manera que proyectos que promueven la energía eólica no sean viables en ciertas partes del territorio nacional. No obstante, en Ecuador se ha implementado a pequeña escala parques eólicos en la provincia de Loja y Galápagos, siendo la ciudad de Loja que puede llegar alcanzar velocidades de hasta 120 km/h en sus picos más altos (UTPL, 2023).

En Ecuador la producción de energía eléctrica depende completamente de la hidroeléctricas. No obstante, en la última década se han presentado nuevas propuestas como las energías renovables no convencionales existentes, las cuales se pueden llegar a implementar en el territorio ecuatoriano, tales como térmica, eólica, fotovoltaica y biomasa.

Cada una de las energías mencionadas anteriormente, son soluciones alternativas de producción energética en Ecuador. Si bien en el país ya se cuenta con un pequeño porcentaje de estas energías, se espera que para los próximos años cada una llegue a tener mayor presencia en el territorio nacional. En la Figura 1.2. se muestran las energías renovables no convencionales del Ecuador para los próximos 4 años.

Figura 1.2 .Aporte de Megavatios por Bloques de Energías Renovables no Convencionales



Nota: Datos tomados de la Corporación Eléctrica del Ecuador (2021).

A continuación, se presenta un cuadro comparativo de las energías renovables no convencionales:

Tabla 1.1. Presentación de las energías renovables no convencionales ventajas, desventajas y su eficiencia.

Energía Renovables No convencionales	Ventajas	Desventajas	Eficiencia
Eólica	<ul style="list-style-type: none"> • No contamina • Inagotable • Reduce el consumo de combustibles fósiles 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevados costos de producción. • Ineficiencia en caso de vientos que superen sus características o inexistencia de viento. 	Rendimiento hasta 59% respecto a lo establecido a la ley de Betz
Fotovoltaica	<ul style="list-style-type: none"> • Recurso ilimitado • Fácil mantenimiento • Reduce las emisiones de Co2 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependencia del clima • Zona para su ubicación • Coste de instalación 	95% de la energía de las celdas fotovoltaicas es aprovechado
Biomasa	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de emisiones de CO2 • Nuevas fuentes de empleo 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere grandes terrenos para su inversión • Pone en peligro determinados ambientes ecológicos 	Eficiencia del 85% en su producción de energía

Nota: La información de la Biomasa fue tomada del artículo “Energía de la Biomasa” (IDEA, 2007). Por otro lado, los datos de la Fotovoltaica fueron tomado del informe “Energía Solar Fotovoltaica” (Grupo NAP, 2007). Finalmente, la información de la energía eólica fue tomado del siguiente artículo “Eficiencia en los aerogeneradores de eje horizontal considerando el efecto del tamaño del eje” (Soto et al., 2019)

Si bien Ecuador cuenta con estas energías renovables no convencionales, es importante considerar cuál es más beneficiosa para el aprovechamiento de los recursos que cuenta el país, en este caso de estudio se enfocará en la energía eólica y con una nueva forma geométrica de hélice a la convencional.

1.1. Descripción del problema

La producción de energía eléctrica es cada vez más costosa, debido a varios factores como el cambio climático, provocando sequías que reducen los niveles de agua en las hidroeléctricas del Ecuador. En el 2023, las centrales de generación eléctrica bajaron en un 26% en el abastecimiento de la demanda nacional debido al estiaje, que produjeron pérdidas económicas en el país de hasta 164 millones (PRIMICIAS, 2023). El uso de dispositivos que generan energías como aerogeneradores de tipo rurales y/o domésticos pueden ser unas de las soluciones para solventar la situación descrita.

Una hélice de tipo toroidal es un diseño que ha sido objeto de investigación reciente como una alternativa a las hélices tradicionales, con el objetivo de estudiar su eficiencia en distintas aplicaciones. Esta investigación tiene como enfoque analizar y comparar la eficiencia de 2 tipos de aerogeneradores, uno con hélices de tipo toroidal y otro de tipo comercial.

El dispositivo con alabes toroidales será evaluado exponiéndolo a un flujo de aire a velocidades entre 30 km/h y 120 km/h, valores promedios para la velocidad del viento en Loja – Ecuador (UTPL, 2023). Esta acción se realizará para analizar las cargas aerodinámicas en los alabes de la hélice, a fin de determinar la potencia mecánica producida.

El estudio tendrá en consideración parámetros cruciales como el área de barrido del rotor, la presión atmosférica y la temperatura en las proximidades del aerogenerador. Datos que permitirán evaluar la densidad del aire y, por consecuencia, la energía cinética del viento disponible. La meta final es evaluar la efectividad técnica y la viabilidad de implementar el diseño toroidal para la producción de energía eólica.

1.2. Justificación del problema

La producción de energía a nivel mundial es un reto conforme pasan los años, debido a que se deben mejorar los sistemas de generación de energía eléctrica para abastecer el consumo de la demanda global. Por ello, se realizan investigaciones que no solo buscan nuevas soluciones energéticas, sino que a su vez mejorar las ya existentes, siendo este un reto para los ingenieros mecánicos realizando ensayos de prueba y error, como el cambio el material de un determinado componente para evaluar el funcionamiento de una máquina. Hoy en día existen varias herramientas para solventar estas experimentaciones, como las simulaciones por computadora, que se encargan de evaluar nuevos diseños y modificaciones sin invertir en prototipos, esto generaría grandes costos de producción y no serían viables para las empresas. La investigación mediante el software de ANSYS fluent es una opción que permite analizar y comparar dos hélices con geometrías distintas sin tener que hacer inversiones en prototipos que llevarían mucho tiempo de producción y gastos en materia prima.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos generales

Evaluar las cargas generadas por la incidencia de un flujo de aire en una hélice de diseño toroidal, considerando condiciones representativas de entornos urbanos para análisis de eficiencia en función de la potencia mecánica, comparándolo con una hélice convencional mediante el método de volúmenes finitos a través del análisis por simulación.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Analizar las cargas generadas por el viento en hélices toroidales mediante simulaciones para interpretación del comportamiento aerodinámico y sus fuerzas involucradas.
2. Cuantificar la eficiencia de las hélices toroidales frente a las convencionales en la conversión de energía cinética del viento a energía mecánica, evaluando sustentación, resistencia y momento para compararlo con las hélices convencionales.
3. Parametrizar la ecuación de la trayectoria de una hélice toroidal, mediante la definición de variables y constantes, para el modelamiento de un alabe en tres dimensiones.

1.4. Marco Teórico

En el desarrollo del presente proyecto se consideran varios conceptos y principios teóricos para el diseño y simulación de una hélice toroidal, desde la parte estructural como el perfil de las hélices hasta el entorno en donde se desarrolla. A continuación, se presentan los siguientes fundamentos teóricos:

1.4.1. Ley de Betz

Una de las limitaciones que se presentó en los primeros años de la generación de energía eléctrica mediante el viento, fue la cantidad de energía cinética que se podía transformar en mecánica para la obtención de electricidad. El alemán Albert Betz, en el año de 1919 sustentó que solo se puede aprovechar un 59% de la energía cinética del viento en mecánica. La potencia máxima que es posible alcanzar por generación está definida por la densidad (ρ), velocidad del viento (V_1) y el área transversal ocupada por las hélices (A), y se define mediante la ecuación 1 (Ragheb, 2021)

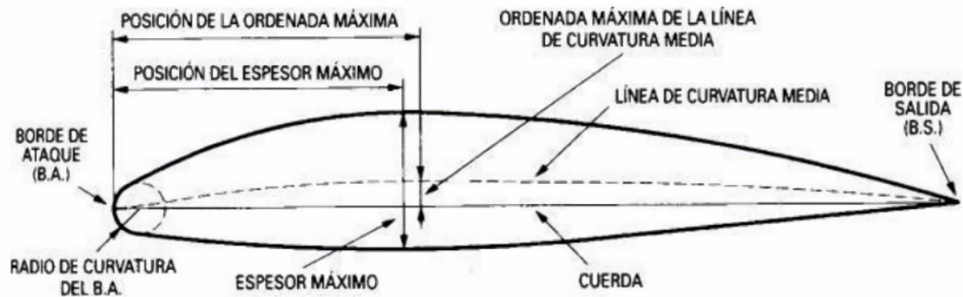
$$P_{eo-max} = \frac{16}{27} \rho (V_1)^3 A \quad (1.1)$$

1.4.2. Perfiles NACA

Los perfiles NACA surgieron para indicar la geometría que tiene un perfil aerodinámico, ya sea el ala de un avión o la pala de un aerogenerador. El perfil influye en el comportamiento de los dispositivos o máquinas que utilicen perfiles aerodinámicos como los ya antes mencionados, por ejemplo, la velocidad de un avión, que varía dependiendo de los parámetros geométricos de su perfil aerodinámico, por lo que hay que tener en cuenta las condiciones en las que se trabaja y cuál será la función que realizará estos tipos dispositivos que utilizan un perfil aerodinámico.

Los perfiles NACA consta de varias partes que ayudan a definir la geometría de estos. Cada perfil cuenta con dos curvas superior (Extradós) e inferior (Intradós), como se ilustra en la Figura 1.3., dichas curvas se forman a partir de los parámetros y partes que conforman todo el perfil. El borde de ataque es la curva que une el intradós y el extradós, que tiene un radio tangente a la parte superior e inferior del perfil, por otro lado, se encuentra el borde de salida que es el punto posterior del perfil aerodinámico. La “cuerda” es la línea recta que uno los dos bordes previamente mencionados, del mismo modo se encuentra la línea de curvatura media también denominada “*camber*”, que es equidistante a la parte superior e inferior del perfil, la máxima distancia entre la línea y la cuerda es la ordenada máxima de la línea de curvatura media. Finalmente, el espesor del perfil es la distancia que se genera entre el intradós y el extradós (Paz, 2013).

Figura 1.3. Partes de perfiles NACA



Nota: Figura tomada del libro Aerodinámica y actuaciones del avión, Carmona (2000)

Hay diferentes tipos de perfiles aerodinámicos, estos pueden tener de 4 a 5 dígitos, los cuales indican los parámetros necesarios para la geometría del perfil aerodinámico. Los perfiles de 4 dígitos indican 3 parámetros que determinan la forma del perfil. El primer dígito es el porcentaje de la longitud de la cuerda, mientras que el segundo dígito es la localización del camber máximo en la décima de la cuerda, finalmente los dos últimos dígitos representan el espesor máximo en porcentaje de la cuerda (Santiago Pinzón Paz, 2013).

Los perfiles de 4 dígitos se dividen en dos: Simétricos y asimétricos. Para identificar el primero solo se considera su nomenclatura, ya que como se ha descrito previamente, los dígitos indican la estructura del perfil aerodinámico. Los perfiles simétricos deben tener los primeros dos dígitos en cero, por ejemplo, el 0014 es un perfil NACA simétrico, por otro lado, los perfiles asimétricos deben tener definidos uno de los primeros dos dígitos diferente de cero.

1.4.3. Coeficiente de arrastre y sustentación

Los perfiles aerodinámicos tienen 2 variables adimensionales claves: Coeficiente de sustentación (C_l) y arrastre (C_d). Para poder determinar cada uno es necesario considerar diferentes aspectos, en el caso del coeficiente de sustentación este se produce por la influencia entre el ángulo de ataque y el número de Reynolds, la cual está definida por la fuerza de sustentación F_l , la densidad (ρ) del fluido, velocidad del fluido (v_∞) y el área de efecto A_p , siendo esta variable la que determina como decrece o no el coeficiente, a continuación, la ecuación:

$$C_l = \frac{F_l}{0.5\rho v_\infty^2 A_p} \quad (1.2)$$

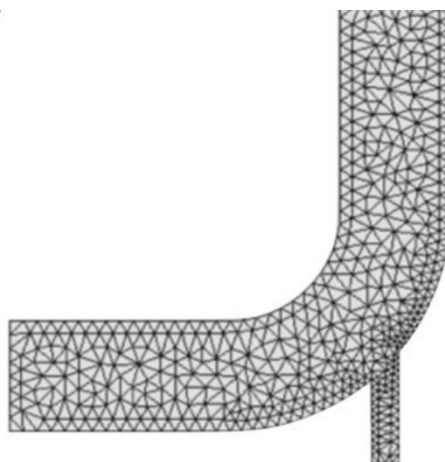
Por otro lado, el coeficiente de arrastre surge de la sumatoria en las fuerzas de arrastre por fricción y presión, las cuales llegan a producir un estancamiento en el perfil aerodinámico. A continuación, las variables que definen el coeficiente de arrastre: fuerza de sustentación F_D , densidad (ρ) del fluido, velocidad del fluido (v_∞) y el área de efecto A_p , siendo la última variable la que determina como decrece o no el coeficiente:

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho v_\infty^2 A_p} \quad (1.3)$$

1.4.4. Método de volúmenes finitos.

El método de volúmenes finitos (FVM) una técnica numérica que surge del análisis diferencial de un elemento, en donde se lo divide o discretiza en un número finito de partes con dimensiones específicas, de manera que entre mayor sea la cantidad de partes que divide un elemento, mayor será la precisión de los resultados. Este método es práctico al momento de realizar simulaciones de fluidos en computadora, debido a que permite hacer el mallado y obtener un resultado dependiente de la división de partes de un elemento. En la Figura 1.4., se puede observar la discretización de una tubería, en

Figura 1.4. Mallado de tubería por el método de volúmenes finitos (FVM)



donde cambia el tamaño de los elementos, a fin de obtener un resultado acorde a los esperados.

Nota: Figura tomada del libro “Fluid Mechanics and Its Applications The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics” (F. Moukalled, 2015)

Capítulo 2

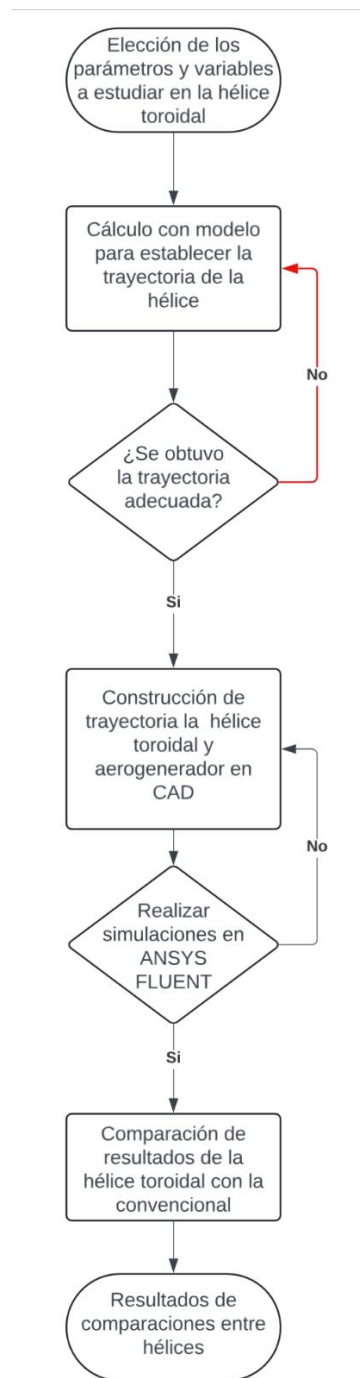
2.1. Metodología

En el presente capítulo se evalúan varios criterios a fin de realizar un análisis pertinente de la hélice toroidal. En primer lugar, se construyó la trayectoria de las palas de la hélice empleando un método matemático, en donde, se realizaron iteraciones con una ecuación y se considerarán parámetros como variables y factores que influyan en la construcción de la trayectoria. **Cabe recalcar que las ecuaciones para la obtención de las fuerzas, momentos y potencia que se obtendrán en la presente investigación es siguiendo el modelo de las hélices tradicionales.**

Posteriormente se usaron herramientas CAD para realizar la geometría 3D del prototipo a estudiar, una vez obtenido el modelo geométrico se realizan los cálculos teóricos de los coeficientes de sustentación y arrastre, el torque teórico necesario para el movimiento de las hélices y potencia que suministra la hélice. Con todo lo anteriormente mencionado, se pasa a desarrollar el modelo matemático en ANSYS Fluent.

Finalmente, se comparó la potencia mecánica obtenida de la hélice toroidal con una convencional, cabe destacar que gran parte de los parámetros electos para el diseño geométrico de la hélice se tomaron como referencia un dispositivo que ya se encuentra implementado en el mercado.

A continuación, en la Figura 2.1. se presenta el diagrama de flujo:

Figura 2.1. Diagrama de flujo

Nota: Figura generada por la herramienta online *Lucidchart*.

2.2. Criterios de diseño

El enfoque al que está siendo estudiado la turbina con palas toroidales, es para aprovechar la energía cinética que provee el viento, a fin de abastecer de energía eléctrica a una determinada comunidad. Debido a ello, es necesario establecer el rango de alcance de la turbina, por lo que se determinarían factores para la turbina:

1. **Potencia nominal:** En la comparación de rendimiento de hélices toroidales, la potencia nominal es una de las principales variables a considerar, debido a que es la potencia máxima que genera el dispositivo.
2. **Costo:** En la construcción del diseño es necesario evaluar los costos de fabricación e implementación del equipo con todos los componentes que estos conllevan, desde los pernos como repuestos hasta el proceso de creación.
3. **Ancho de las hélices:** Determina el ancho del arco de las palas y a su vez sería factor importante en la aerodinámica de la hélice.
4. **Radio del rotor:** Determina el equilibrio de los aerogeneradores, debido a que este cambia por el ancho de las hélices.
5. **Ángulo de ataque:** Se relaciona directamente con el coeficiente de sustentación y arrastre, indicadores que determinan la capacidad de la potencia mecánica del aerogenerador.
6. **Número de palas:** La cantidad de palas que contiene un aerogenerador, determina la eficiencia aerodinámica y si el flujo de aire es más uniforme alrededor del rotor.
7. **Peso:** Influye directamente en el costo de producción y la aerodinámica de las hélices toroidales.

2.3. Alternativas de solución

Se realizaron varios modelos en CAD, en donde se propuso 3 formas de hélices toroidales variando su ángulo de ataque, a continuación, se presenta cada una de las geometrías:

Figura 2.2. Hélice toroidal con ángulo de ataque 5° (Solución A)

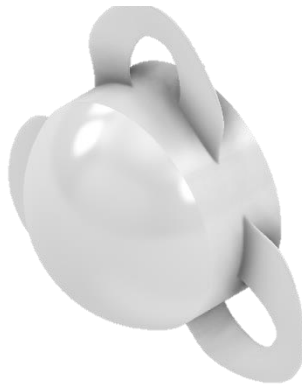


Figura 2.3. Hélice toroidal con ángulo de ataque 10° (Solución B)



Figura 2.4. Hélice toroidal con ángulo de ataque 15° (Solución C)



2.4. Matriz de decisión

Tabla 2.1. Matriz de decisión de las soluciones propuestas.

	Valor	Solución A 5 grados	Solución B 10 grados	Solución C 15 grados
Potencia nominal	7	5	5	5
Costo	1	2	4	6
Ancho de hélices	2	1	4	6
Longitud del rotor	3	3	6	4
Ángulo de ataque	6	3	5	7
Número de palas	5	5	5	5
Peso	4	1	5	7
Total de Puntos		95	140	160

De acuerdo con la matriz de decisión, se consideró la solución C (ángulo de ataque de 15 grados), principalmente porque aprovecha de mejor manera las corrientes de vientos, debido a que tiene un peso menor a las otras dos alternativas, además de que su ángulo de ataque es mayor y un mejor equilibrio aerodinámico.

2.5. Diseño de la hélice toroidal

Un aspecto importante en un aerogenerador es el diseño de los álabes, debido a su interacción con el flujo de aire. Al momento de elegir la geometría y el perfil, se puede llegar a prevenir diferentes fenómenos físicos, como vibraciones, torbellinos detrás de las aspas, entre otros, de tal manera poder tener una estructura durable y resistente, acorde a las especificaciones de diseño es importante.

2.5.1. Selección del perfil

Al momento de diseñar la hélice, el tipo de perfil aerodinámico es valioso a fin de obtener una mayor eficiencia con el fluido. Teniendo en consideración lo previamente mencionado, se hizo una evaluación de 4 perfiles, entre ellos 2 simétricos y 2 asimétricos: NACA 0012, 0021, 1412 y 2412.

Mediante el programa *Qblade* evaluamos cada uno de los perfiles seleccionados, donde la gráfica del Apéndice 13 demuestra que los perfiles simétricos presentan menor coeficiente de sustentación con respecto a los asimétricos, eso se debe a la distribución de presión que se genera en la parte superior de los perfiles por la aceleración del fluido en el extradós.

Cada perfil tiene aspectos que los hace distintos y determina su aplicación, entre las variables tenemos, el coeficiente de sustentación y la robustez. Este último parámetro permitió hacer la elección del perfil, el cual debido a la dimensión del *camber* se genera una mayor robustez en los perfiles, haciendo que el flujo del aire tenga un incremento en su velocidad en el extradós y por consiguiente obtener una elevación en el coeficiente de sustentación.

Teniendo los parámetros mencionados, el perfil seleccionado es el NACA 1412. Esto se debe a que es un perfil asimétrico y versátil, por ende, tendrá un mayor

coeficiente de sustentación que el 0012 y 0021, de manera que su aplicación esta más orientada al uso en aerogeneradores. Por otro lado, el perfil 2412, si bien su coeficiente de sustentación es mayor que el 1412, la dimensión de su *camber* se incrementa, por lo tanto, tiene un aumento en la robustez del perfil. Este último parámetro puede generar mayor costo de producción debido al material que se necesita para su fabricación, por lo que se eligió el perfil NACA 1412 gracias a su equilibrio entre el coeficiente de sustentación y resistencia.

2.5.2. Factor de la velocidad punta

El factor de la velocidad punta (λ) está relacionado con el tipo de enfoque ya sea para propulsión o generación de energía. Ahora bien, para elegir este factor dependerá del número de álabes (B) que poseerá la turbina, en la siguiente tabla se presenta la relación:

Tabla 2.2. Relación entre la velocidad punta y el número de álabes

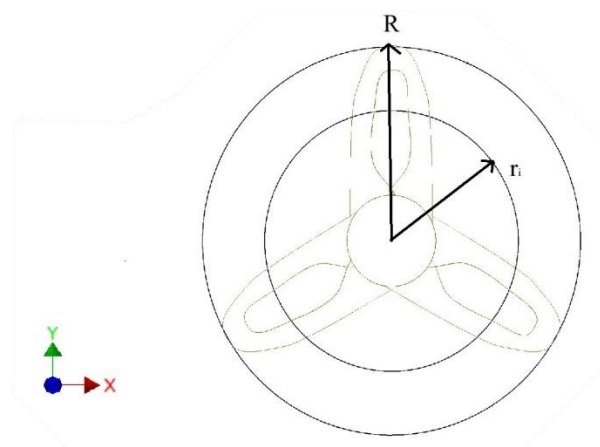
λ	B
1	8 a 24
2	6 a 12
3	3 a 6
4	3 a 4
Mayores a 4	1 a 3

2.5.3. Relación de la Velocidad punta

A continuación, se presenta la relación de la velocidad punta en los álabes, donde se observa una relación inversamente proporcional entre el radio de ubicación de los perfiles (r_i) y el radio total de la turbina (R) y el factor relación de radio (λ):

$$\lambda_r = \lambda \times \frac{r_i}{R} \quad (2.1)$$

Figura 2.5. Gráfico con relación de radios para el aerogenerador



Nota: Imagen generada en AUTODESK INVENTOR. Elaboración propia.

2.5.4. Velocidad de rotación de las palas del rotor del aerogenerador

Dentro del diseño de un dispositivo eólico, se debe considerar la velocidad de rotación de las palas, debido a que se relacionan directamente con la velocidad del viento. La velocidad de rotación está definida como el producto entre factor de relación de radio (λ) y velocidad del viento (v), y el cociente del radio de la circunferencia de barrido por el aerogenerador (R). (Montaño, 2013)

$$\omega = \frac{\lambda \cdot v}{R} \quad (2.2)$$

2.5.5. Ángulo óptimo del viento

La ecuación permite definir el ángulo de viento óptimo para los alabes tiene una relación directa con la relación de la velocidad punta (λ_r), y está definida por:

$$\varphi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_r} \right) \quad (2.3)$$

2.5.6. Factor de perdida

El factor de perdida determina el decrecimiento de eficiencia en cada uno de los perfiles de las hélices a un radio determinado, que está restringida por el número de álabes (B), el radio de ubicación de los perfiles (r_i), el radio de la hélice (R) y el ángulo óptimo del viento (φ):

$$F_i = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[e^{\left[\left[\frac{-B}{2} \left[1 - \frac{r_i}{2} \right] \right] \right] \left[\frac{r_i}{R} \sin \varphi \right] \right]} \quad (2.4)$$

2.5.7. Cuerda del perfil

A fin de poder determinar la longitud de la cuerda de cada uno de los perfiles, para el modelado de las hélices, es necesario emplear el radio de ubicación de los perfiles (r_i), el factor de perdida (F_i), coeficiente de sustentación (C_l), número de álabes (B), el factor de velocidad (λ_r) y el ángulo óptimo del viento (φ), a continuación de muestra la ecuación:

$$c = \frac{8\pi r_i F_i \sin \varphi}{B C_l} \left[\frac{\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi}{\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi} \right] \quad (2.5)$$

2.5.8. Fuerza ejercida del viento sobre los álabes

A fin de poder realizar un estudio determinado de los alabes, es necesario definir la fuerza que ejerce el viento sobre los alabes (F_{ah}), la cual está relacionada con la velocidad del viento (V), la densidad del aire (ρ), el área frontal de los alabes (A_f) y un factor de corrección para la velocidad del viento (a) (Bastianon R, 2008):

$$F_{ah} = \rho A_f V (V_1 - V_4) \quad (2.6)$$

$$V = V_1 (1 - a) \quad (2.7)$$

$$V_4 = V_1 (1 - 2a) \quad (2.8)$$

El máximo valor de a se produce cuando este es $1/3$ (Bastianon R, 2008).

2.5.9. Trayectoria de la hélice

Las siguientes ecuaciones permitirán ubicar geométricamente en el espacio cada uno de los perfiles NACA, permitiendo obtener la hélice toroidal, la cual está restringida por la distancia entre el centro de la hélice y la ubicación del centro de la cuerda del perfil (l), la pendiente (x_l) que forma la cuerda del perfil a un ángulo de inclinación determinado (ψ), la longitud de la cuerda(s), ángulo de ataque del perfil (α), ángulo complemento de posición del perfil (β), el espesor máximo del perfil desde la línea central de la cuerda (y_b), el espesor mínimo del perfil desde la línea central de la cuerda (y_f), radio de ubicación de los perfiles (r_i), inclinación lateral de las palas en el plano “yz” (θ) y la longitud de la cuerda de manera tangencial (b) (Liyu et al., n.d.):

Figura 2.6. Perfil NACA con las variables geométricas para construcción de la trayectoria toroidal

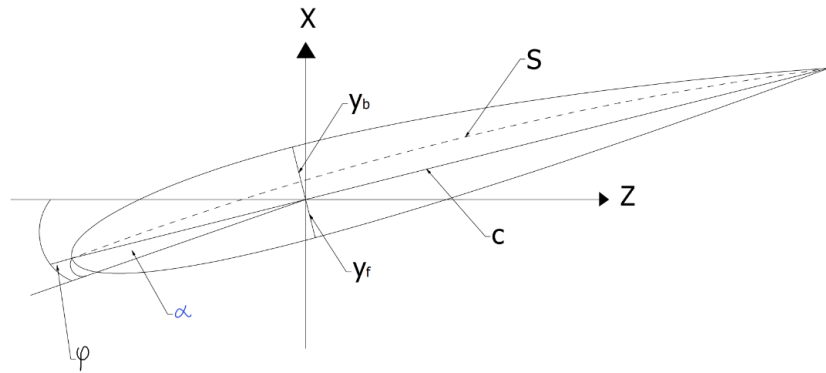
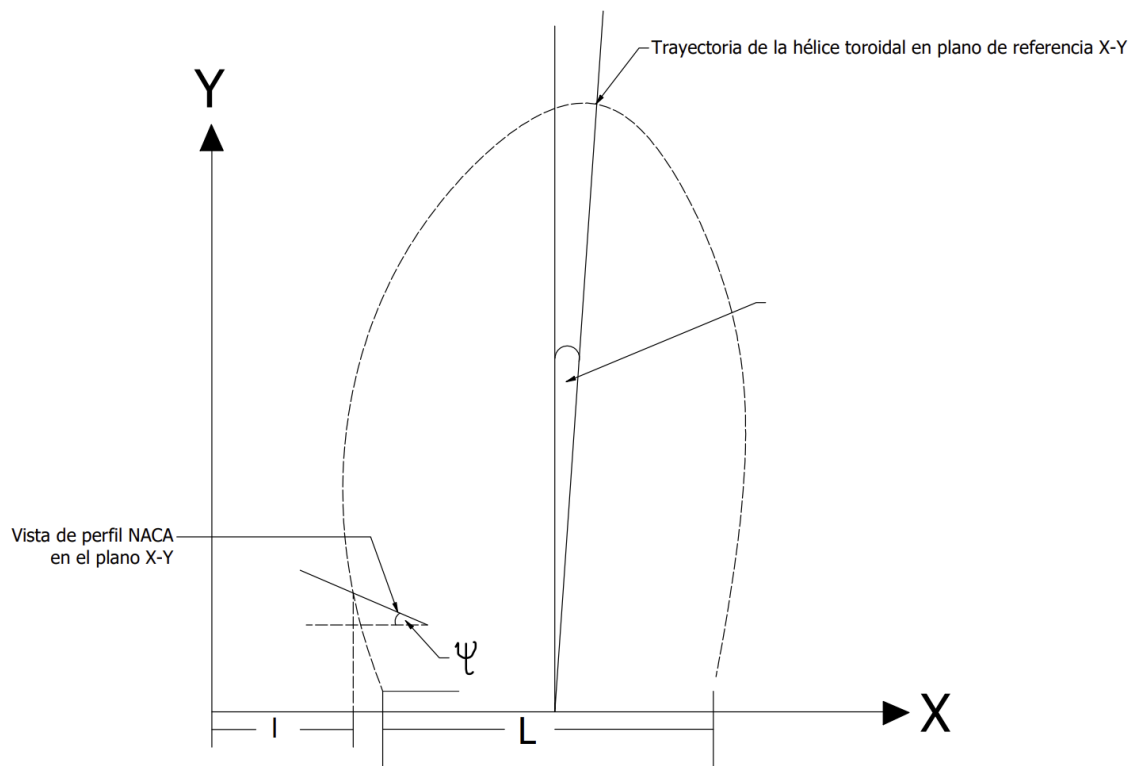


Figura 2.7. Trayectoria representativa de hélice toroidal



$$x = l + x_l + [(-c_1 + s)\cos\alpha]\sin\beta - \left[\left(\frac{y_b}{y_f}\cos\psi\right)\right]\cos\beta \tag{2.9}$$

$$y = r_i\cos\theta \tag{2.10}$$

$$z = r_i \sin \theta \quad (2.11)$$

$$c_1 = \frac{b}{2} - \frac{r \theta_s}{\cos \beta \cos \alpha} \quad (2.12)$$

2.6. Potencia

La potencia en un aerogenerador está directamente relacionada a la densidad (ρ), la velocidad del viento (V), el área total de aerogenerador (A_t), y el factor de potencia (C_p), pero para este estudio se considera la potencia total disponible (P_{td}) y la potencia captada (P_c) (Biadgo y Atnekulu, 2017):

$$P_{td} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.13)$$

$$P_c = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (2.14)$$

La siguiente ecuación es la forma en obtener la potencia en función de la fuerza:

$$P_c = \frac{1}{2} F_{ah} V \quad (2.15)$$

2.7. Momento torsional

Debido a la interacción entre el fluido y las aspas del aerogenerador se produce el momento torsional o torque (τ), el cual es generado por la fuerza del viento. El torque se encuentra definido como el cociente entre la potencia captada (P) y la velocidad de rotación de las palas (ω). **Cabe destacar que a la ecuación es siguiendo el modelo**

para la hélice tradicional, por lo que es la referencia para hallar el torque en las hélices toroidales. (Montaño, 2013)

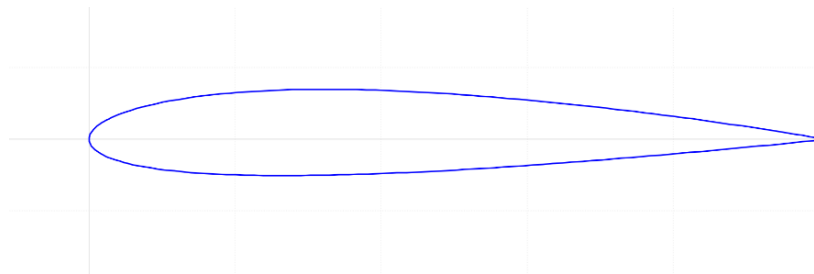
$$\tau = \frac{P}{\omega} \quad (2.16)$$

2.8. Proceso del diseño de la hélice toroidal

En primer lugar, se requirió las dimensiones generales del aerogenerador. Las medidas se basan en un aerogenerador convencional que ya se encuentra en catalogo (Ryse Energy, s.f.). El dispositivo elegido fue el *E-3 HAWT* de la compañía *Ryse Energy*, este aerogenerador tiene un diámetro de rotor de 3.8 metros y soporta alrededor de 70 m/s en su *Survival Speed*, generando una potencia máxima de 3 kW. Para el dispositivo toroidal las principales características son: 3 metros de diámetro de aerogenerador y se va a experimentar hasta 41.6 m/s para el dispositivo con un ángulo de ataque de 15 grados, debido a que se diseñó con respecto a la ubicación de Loja, el cual tenía picos máximos de hasta 33.33 m/s.

Luego se construyeron los perfiles NACA 1412 con la ecuación 2.5 obteniendo cada una de las cuerdas, para proceder a ubicarlos en la trayectoria.

Figura 2.8 Imagen demostrativa del perfil Naca 1412



Nota: Imagen obtenida mediante el software *Qblade*

Al momento de esquematizar el perfil NACA1412, una de sus principales características es la longitud de la cuerda, el cual guarda una relación directa con el ángulo de ataque, el coeficiente de sustentación y el radio de ubicación de los perfiles. A continuación, se presenta una tabla con los resultados obtenidos para cada una de las cuerdas:

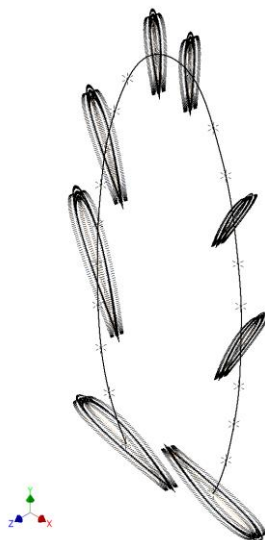
Tabla 2.3. Dimensiones de cuerdas del perfil aerodinámico con distintos ángulos de ataque.

Cuerda 5°[mm]	Cuerda 10°[mm]	Cuerda 15°[mm]
817.768	455.987	390.400
831.208	463.481	396.816
797.111	444.469	380.539
744.661	415.223	355.499
687.830	383.534	328.368
632.613	352.745	302.008
581.134	324.040	277.432
533.706	297.594	254.790
489.796	273.110	233.827
448.446	250.054	214.087
408.414	227.732	194.976

Por otro lado, se utilizaron las ecuaciones [2.9,2.11], que indica la trayectoria de la pala y permitió obtener cada uno de los puntos en las coordenadas en el plano tridimensional para ubicar los perfiles obtenidos previamente.

El programa seleccionado fue INVENTOR, en donde el método para realizar el modelo se basó en elevación, utilizando varios perfiles NACA 1412 de diferentes dimensiones de cuerda mediante planos relativos.

Figura2.9 Vista 3d de la trayectoria toroidal con los perfiles NACA



Nota: Imagen tomada en el software. Realización propia.

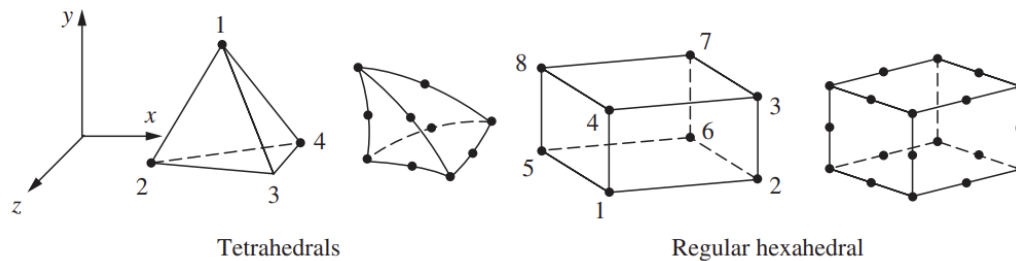
2.9. Parámetros utilizados en ANSYS

En este apartado, se explica cada uno de los criterios utilizados para el desarrollo de mallado y simulación mediante el software de ANSYS Fluent, en donde se escoge el tipo de elemento, se realiza el volumen de control y se considera la calidad de la malla para finalmente proceder con la simulación.

2.9.1. Tipo de elemento

Uno de los criterios utilizados se basa en elementos tetraédricos para el mallado de la hélice y hexaédricos para el volumen de control. La razón de la elección de estos tipos elementos se debe a la mejora de la calidad de malla sin la necesidad de utilizar tantos recursos computacionales

Figura 2.10 Tipos de elementos para FVM



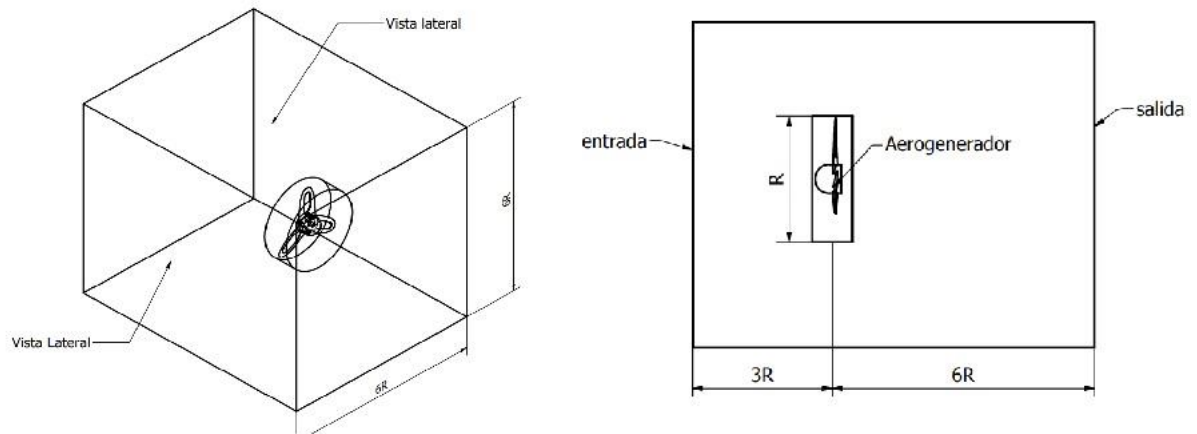
Nota: Figura tomada del libro *A first course in the Finite Element Method* (Logan, 2017, p.11)

2.9.2. Volumen de control

En el proceso de simulación de la hélice toroidal, se consideran varios parámetros y condiciones para la obtención de resultados, el volumen de control es parte de estas condiciones importantes en la simulación.

El volumen de control define los límites de entrada y salida de masa y energía. En ANSYS el volumen de control delimita el área en donde se va a llevar cabo la simulación aerodinámica de las hélices toroidales. Las dimensiones referenciales de los límites del volumen de control están dadas en la Figura 2.11, que presenta el dominio computacional de una turbina hidro cinética.

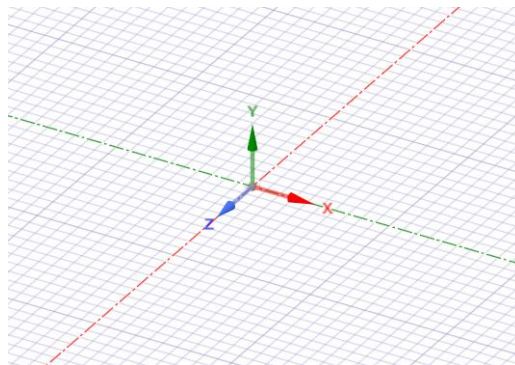
Figura 2.11 Dominio computacional de una turbina hidro cinética (Silva, 2014)



En la Figura 2.11, se aprecian las dimensiones referenciales para realizar el volumen de control de la hélice toroidal, en donde las longitudes de cada arista están relacionadas directamente al radio del aerogenerador R .

Para el desarrollo del volumen de control de la hélice toroidal, se considera el radio del aerogenerador R_t , y se obtienen las dimensiones en los ejes X , Y y Z mediante la extensión del programa de ANSYS: Fluid Flow (Fluent), considerando la referencia de la Figura 2.12.

Figura 2.12 Ejes referenciales utilizados en para la simulación



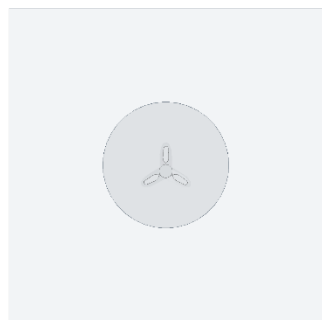
Para la construcción del volumen de control se utiliza el sistema de referencia de la Figura 2.12, en donde mediante la relación de las longitudes con el radio del aerogenerador determinar el volumen de control, dimensiones que se encuentran en la Tabla 2.4 y están reflejadas en las Figura 2.13.

Tabla 2.4. Dimensiones de las paredes del volumen de control para el aerogenerador de 15 grados

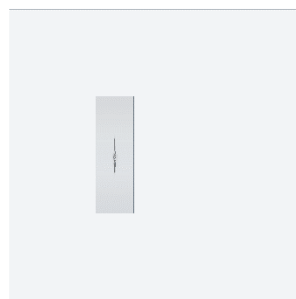
Ejes	Dimensiones [mm]
+x	4923
-x	4923
+y	4923
-y	4923
+z	4923
-z	9846

Figura 2.13 Volumen de control de la Hélice Toroidal

(a) Vista frontal



(b) Vista Lateral



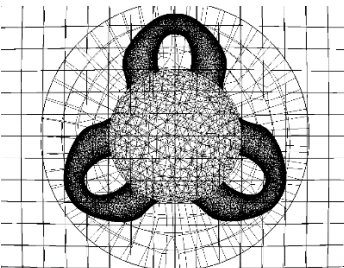
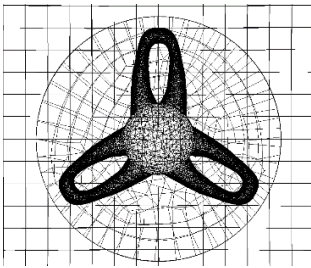
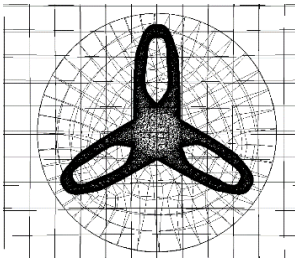
2.9.3. Mallado

El mallado fue realizado acorde a las necesidades computacionales que se requirieron. El tipo de mallado escogido fue el CFD, esto es debido a que se va a trabajar

con un fluido como el viento. Para esta parte, se consideró el tamaño y tipo de elementos por la parábola que se forma en la hélice, pues a diferencia de otros aerogeneradores esta no es lineal a lo largo de su trayectoria.

En la Tabla 2.5. se muestra el mallado obtenido para cada una de las geometrías estudiadas durante la investigación.

Tabla 2.5. Mallado de las hélices toroidales con diferentes ángulos de ataque

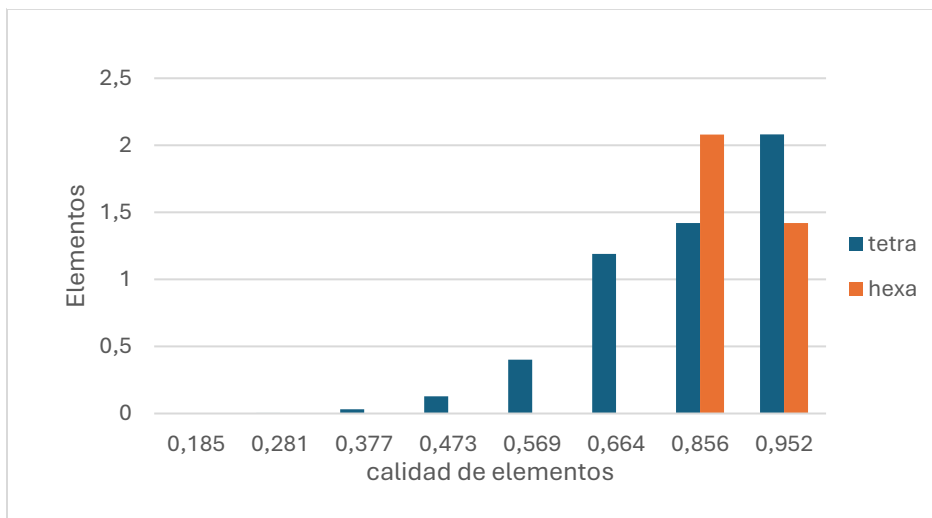
Mallado ($\alpha=5^{\circ}$)	Mallado ($\alpha=10^{\circ}$)	Mallado ($\alpha=15^{\circ}$)
		

Se procedió a realizar iteraciones con modificaciones en el tamaño de elemento, tanto del volumen de control como de la geometría toroidal, reflejadas en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Iteraciones de la calidad del mallado en ANSYS

Tamaño mínimo de elemento [mm]	Calidad	Nodos	Elementos	Tiempo de mallado [minutos]
0.5	0.83511	972613	5383103	33
0.8	0.83495	971724	5381259	28
0.9	0.83498	966484	5362923	25
1.0	0.83495	966091	5358258	22
1.1	0.83506	965537	5352880	17
1.2	0.83506	962286	5324833	13
1.3	0.83525	952623	5283866	10

Figura 2.14 Gráficos de barras con la calidad de elementos y tipos de elementos



De estas iteraciones de la Tabla 2.6 se escogió la que se encontraba entre el 83.52% de calidad, debido a que no ocupa demasiados recursos computacionales, se obtenía una mayor precisión en los resultados con respecto a los valores teóricos y el tiempo de mallado es menor.

2.9.4. Independencia de malla

Luego de haber realizado el mallado, se buscó el refinamiento de la misma, con el objetivo de acercarse al resultado deseado sin necesidad de gastar demasiado recursos computacionales. En la Tabla 2.6 se muestran las iteraciones que se realizaron para mejorar el mallado, donde la **última opción** tiene la mayor calidad presentando un valor de 0.83525 que se encuentra en el rango que permite obtener un correcto valor para el estudio.

Una vez hecho el correcto proceso de iteraciones y refinamiento de mallado, se analizó la fuerza experimental y teórica, para la velocidad de 8.33 m/s, con la finalidad de evaluar el error obtenido y estudiar la calidad de la malla obtenida, siendo la Tabla 2.7, el resultado de lo estudiado.

Tabla 2.7. *Relación porcentaje y fuerza de la hélice toroidal*

Fuerza[N]	Porcentaje
22.388	0.894%
22.392	0.876%
22.395	0.863%
22.42	0.753%

2.9.5. Simulación de las hélices toroidales

Una vez realizado la independencia de malla de las hélices toroidales, se procedió a la simulación en ANSYS Fluent considerando un análisis estático, en donde la hélice no rotaba e interactuaba con condiciones representativas del aire. En la Tabla 2.8, se presenta los tiempos de simulación para cada una de las iteraciones que se realizaron con respecto a la velocidad del viento.

Tabla 2.8. *Tiempos de simulación con respecto a cada velocidad de viento*

Velocidad del viento [m/s]	Ángulo de ataque [grados]	Tiempo de simulación [horas]
8.33	5	16
	10	20
	15	92
12	5	10
	10	14
	15	16
20	5	8
	10	10
	15	15

En la Tabla 2.8 presenta se presenta los tiempos que se dieron al momento de simular, sin embargo, esto puede variar dependiendo del tipo de Ordenador. Las especificaciones de las computadoras se encuentran en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. *Características y especificaciones de los ordenadores empleados*

Marca	Modelo	RAM	Tarjeta de video	Procesador	Tipo de Almacenamiento
ASUS	Zephyrus G16	16 GB	RTX-4090	Intel core ultra 9	1 TB-ssd M2
Venus	UM790 Pro	32 GB	INTEGRADO	AMD Ryzen™ 9 7940HS	1 TB-SSD

Capitulo 3

A continuación, se presenta los resultados que se obtuvieron de las iteraciones con las ecuaciones para la construcción de la hélice toroidal, como a su vez de los resultados obtenidos por las simulaciones. Adicionalmente, se presenta un análisis de los resultados obtenidos, considerando criterios pertinentes, que permitieron definir si lo obtenido es importante para el desarrollo de aerogeneradores.

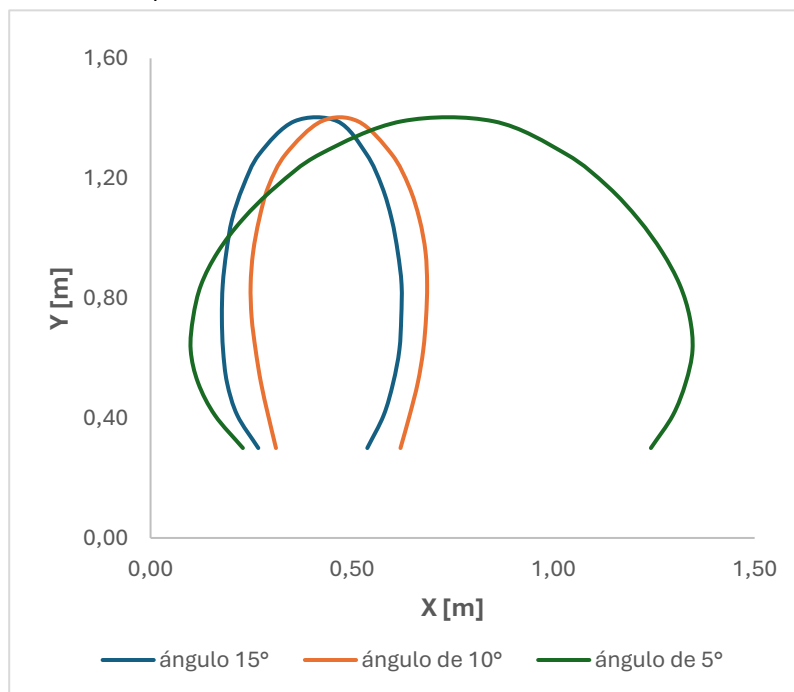
3.1. Trayectorias toroidales

Al haber parametrizado las ecuaciones 2.9, mediante las condiciones que se ubicaban cada una de las variables definidas para el modelamiento de la trayectoria se obtiene la **ecuación 2.17**, luego se realizaron varias iteraciones, las cuales permitieron modelar los tres ángulos de ataque del perfil NACA 1412.

$$x = l + x_l - \left(\sqrt{y_b^2 + y_f^2} \right) \cos \psi \quad (2.17)$$

A continuación, se muestra las trayectorias obtenidas para el modelamiento en el plano XY:

Figura 3.1. Trayectorias en el plano "XY" de las hélices toroidales

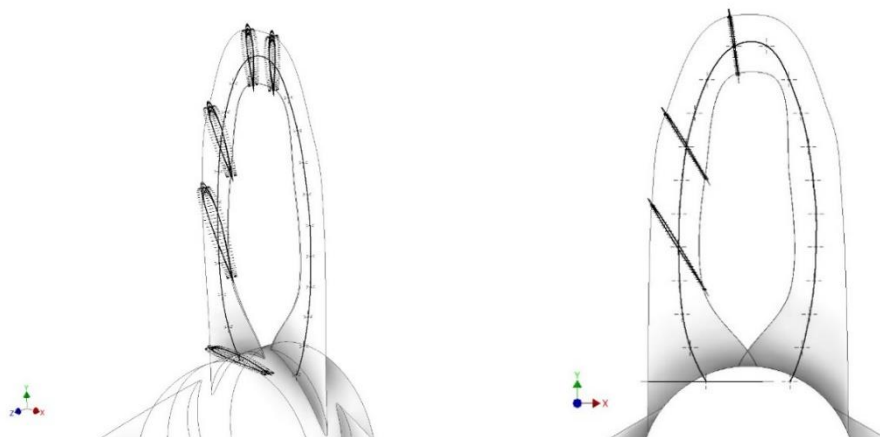


La Figura 3.1 muestra el comportamiento final de las trayectorias, una de las grandes diferencias radica en el ancho que tiene cada una, viéndose influenciado por el grosor de las cuerdas, que es proporcional al coeficiente de sustentación y al ángulo de ataque, como se muestra en el Apéndice 13. Se evidencia que a medida que el ángulo aumenta, la longitud de la cuerda también incrementa como se mostró en la Tabla 2.3, guardando una relación directamente proporcional, característica que resulta crítica al momento de diseñar las trayectorias toroidales y por consecuencia los aerogeneradores, ya que influye en la robustez del diseño. Por lo tanto, una de las mejores opciones para la trayectoria toroidal es el que tiene un ángulo de ataque de 15° .

3.2.Diseño CAD

Mediante la Ecuación 2.9, se obtuvieron los puntos en la coordenada de X, con las ecuaciones 2.10 y 2.11, se generaron los puntos en el plano Y y Z. Como resultado se generaron las trayectorias que permitieron modelar cada una de las hélices toroidales con su respectivo ángulo de ataque, como se muestra en la Figura 3.2.

Figura 3.2. Vista isométrica y frontal de la hélice toroidal
 (a) Vista isométrica de hélice toroidal (b) Vista frontal de hélice toroidal



Para cada uno de los ángulos de ataque, el cambio en las coordenadas X-Y es drástico con respecto al plano Z, esto se debe a que en este eje la función trigonométrica es diferente. En la Figura 3.3 se muestra el CAD final de uno de los aerogeneradores.

Figura 3.3. Vista isométrica de la hélice toroidal con ángulo de ataque de 15°



3.3.Resultados obtenidos de la simulación

En esta sección, se analiza cada uno de los resultados que se obtuvieron en ANSYS Fluent con cada uno de los parámetros escogidos para comparar la hélice convencional con la tradicional.

3.4.Fuerzas obtenidas por cada ángulo de ataque

En la Tabla 3.1. se observan las fuerzas obtenidas de cada ángulo de ataque con las 3 velocidades evaluadas para la comparación. En la quinta columna, se aprecia que a una velocidad de 8.33 m/s la fuerza es mayor con un ángulo de ataque de 5 grados en relación con los otros ángulos de ataque, secuencia que se va repitiendo para las otras dos velocidades. Esto se debe a que el área de incidencia entre el viento y la hélice toroidal es

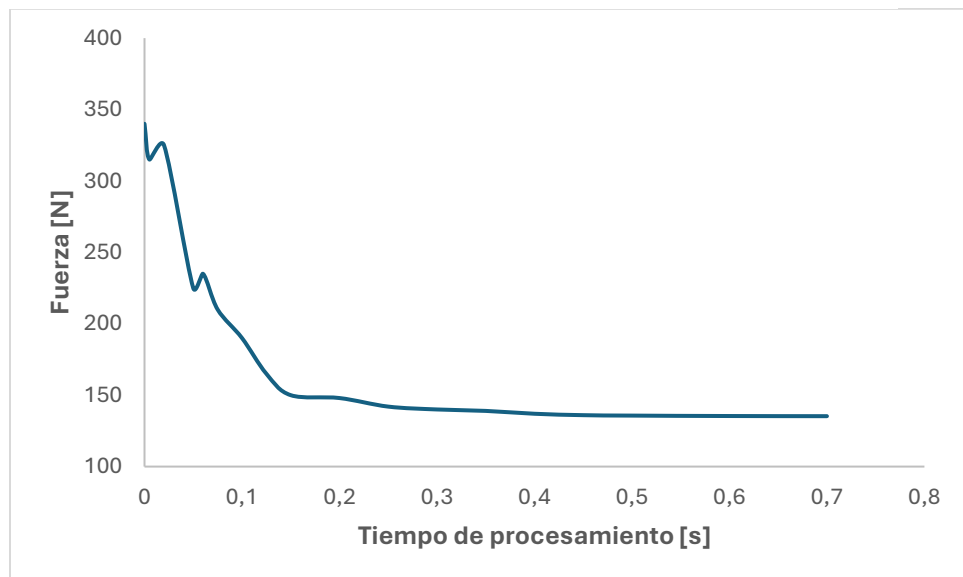
directamente proporcional a la fuerza producida por el fluido, fenómeno que esta respaldado por la ecuación 2.6

Tabla 3.1. Fuerzas obtenidas con respecto a cada ángulo de ataque de la hélice toroidal

V[m/s]	A[m ²]-5°	A[m ²]-10°	A[m ²]-15°	Fz[N]-5°	Fz[N]-10°	Fz[N]-15°
8.33	1.478	0.516	0.488	68.402	23.876	20.110
12	1.478	0.516	0.488	141.975	49.543	45.080
20	1.478	0.516	0.488	394.398	140.322	115.750

Por otro lado, tenemos la Figura 3.4, muestra la interacción del fluido con la estructura de la hélice toroidal de manera estática y a una velocidad de viento de 12 m/s, curva que se va estabilizando conforme el tiempo de simulación va aumentando. Este resultado permite obtener la fuerza experimental producida sobre las hélices.

Figura 3.4. Gráfica de Fuerza vs tiempo de simulación para la velocidad de 12m/s



3.5. Potencia producida por la hélice toroidal.

Luego de haber realizado las distintas simulaciones, mediante la ecuación 2.15 se obtuvieron las potencias para cada hélice toroidal (5°, 10°, 15°) y la convencional. A continuación, se presencia en la Figura 3.5, la potencia generada en kW con respecto a la velocidad de viento.

Figura 3.5 Gráfica de Potencia vs la velocidad de viento, de las hélices toroidales con los distintos ángulos de ataque y el modelo tradicional de 3 palas

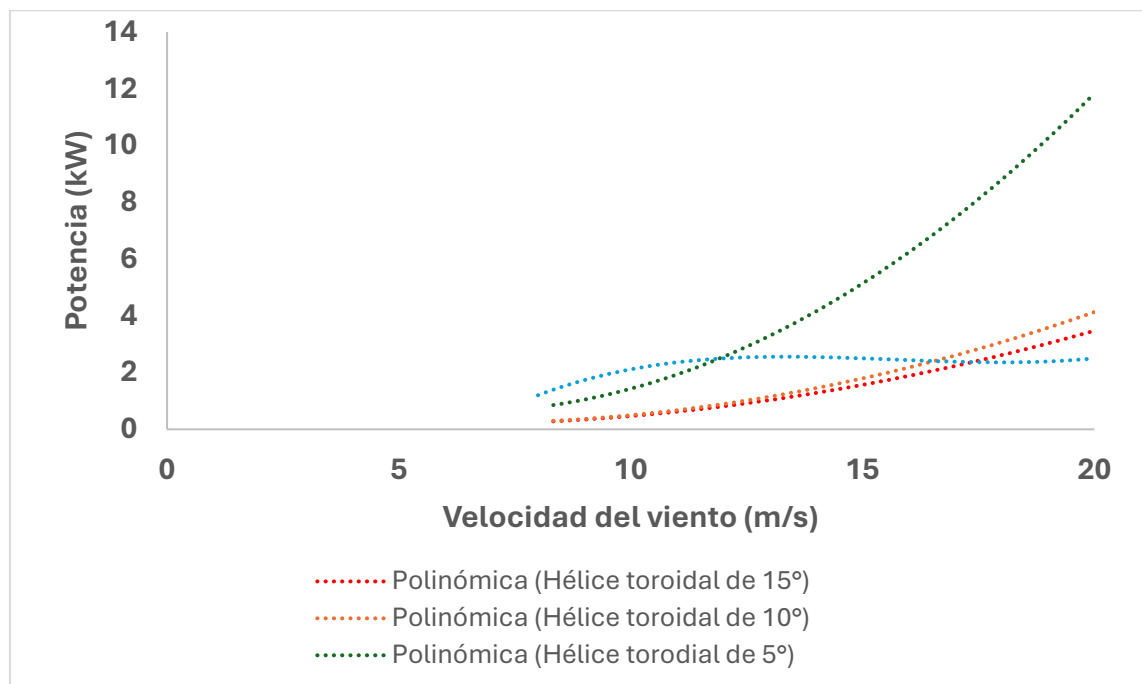


Tabla 3.2. Potencia mecánica generada a diferentes velocidades de viento por cada hélice toroidal

V[m/s]	P[kW]- cad 5°	P[kW]- cad 10°	P[kW]- cad 15°
8.33	0.855	0.298	0.251
12	2.556	0.892	0.811
20	11.832	4.131	3.473

En la Tabla 3.2 se evidencia que la potencia generada por la hélice toroidal con ángulo de 5° es mayor con respecto a las de 10° y 15°. Del mismo modo, la Figura 3.5 muestra el crecimiento del diagrama de la hélice toroidal de 5°, el cual nuevamente demuestra que la potencia que genera es mayor a los otros dos aerogeneradores.

No obstante, la hélice de modelo convencional entrega menor potencia en un rango de velocidades de entre aproximadamente 17 m/s a 20 m/s, indicando que el cambio de geometría a toroidal permite generar más potencia.

Si bien, el aerogenerador toroidal de 5 grados es el que más potencia genera, hay que tener en cuenta que la robustez de esta es mayor, lo cual produce un mayor costo en la producción de esta por el incremento de peso, hecho que se analizara más adelante.

3.6. Velocidad de rotación y torque

Una vez evaluado las velocidades del viento en los aerogeneradores toroidales se obtuvieron las velocidades angulares. Posteriormente junto a la potencia generada se calculó el torque.

Tabla 3.3. Torque y velocidad de rotación con respecto a las velocidades de viento de la hélice toroidal de 15°

v[m/s]	w[rad/s]	T[kNm]
8.33	16.77	0.030
12	24.16	0.067
20	40.27	0.172

Tabla 3.4. Torque y velocidad de rotación con respecto a las velocidades de viento de la hélice toroidal de 10°

v[m/s]	w[rad/s]	T[kNm]
8.33	16.60	0.018
12	23.92	0.037
20	39.87	0.104

Tabla 3.5. Torque y velocidad de rotación con respecto a las velocidades de viento de la hélice toroidal de 5°

v[m/s]	w[rad/s]	T[kNm]
8.33	10.86	0.079
12	15.65	0.163
20	26.08	0.454

Al momento de analizar los torques y las velocidades angulares, que se obtuvieron de cada una de las hélices, se aprecia que la que genera mayor torque es la que posee un ángulo de ataque de 5° , pero a su vez es la que gira menos. No obstante, esto nos demuestra que esta es más efectiva para poder trabajar a baja velocidades, no obstante no es la más eficiente, pues por cuestiones de producción la mejor opción sería la de 15° .

3.7.Presiones

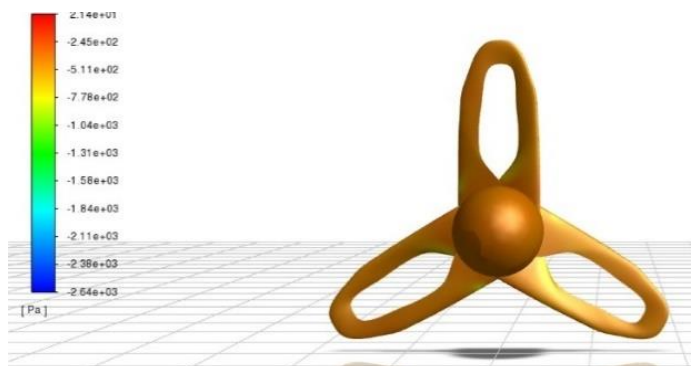
Una vez simulado los modelos se obtuvo las presiones de los aerogeneradores toroidales, como se muestra en la Tabla 3.4, cabe destacar que estas presiones son para la velocidad de 20m/s a fin de mostrar el cambio.

Tabla 3.6. Presiones máximas y mínimas por cada ángulo de ataque de la hélice toroidal

Ángulo(α)	Pamax[kPa]	Pamin[kPa]
5	0.0322	-1.8
10	0.0116	-1.52
15	0.02	-2.64

La Figura 3.6 permite apreciar que las cargas se distribuyen de manera uniforme en la hélice toroidal con ángulo de ataque de 15° ,

Figura 3.6 Imagen de las cargas ejercidas por el viento en la hélice toroidal de 15° a una velocidad de 20m/s



3.8. Análisis de resultados

La Figura 3.5 indica que el aerogenerador de 5° es un buen dispositivo para la producción de potencia, además de comprobar que el modelo convencional esta por detrás de las hélices toroidales, sin embargo, al momento de llevarlo a la escala de producción se debe tener en cuenta la aerodinámica y a su vez el peso de la estructura.

La robustez de la hélice de 5° es mucho mayor que el de 10° y 15°, lo cual se debe al tamaño de la cuerda que se encuentra calculada en la Tabla 2.3. Dicha robustez produce un menor coeficiente de sustentación, determinando que no es viable realizar un aerogenerador con ángulo de ataque de 5°, y que la mejor alternativa para una hélice toroidal con perfil NACA 1412 es mejor emplear un ángulo de ataque de 15°.

3.8.1. Costo de material para estructura

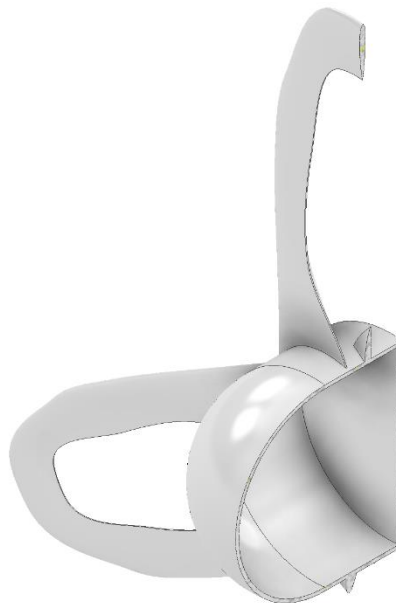
Si bien la investigación no se encuentra enfocada en el diseño y producción de la hélice toroidal, al momento de comparar con un aerogenerador convencional se deben considerar aspectos como el peso, costos y demás parámetros que permita que un dispositivo con un alabe de forma toroidal sea competitivo en el mercado.

Tabla 3.7. Precio estimado del material para la estructura de la hélice toroidal por cada ángulo de ataque

ángulo de ataque	Peso[kg]	Precio \$/Kg	total
15	98.176	0.7	68.7232
10	157.334	0.7	110.1338
5	757.321	0.7	530.1247

En la Tabla 3.5 se presenta el peso de las hélices toroidales con respecto a cada ángulo de ataque, y a su vez el precio que se encuentra relacionado directamente al valor del mercado de la fibra de vidrio (Made-in-China, s.f.). El precio de la hélice toroidal con un ángulo de ataque de 15 grados es el menor con un total de \$68.72. Sin embargo, este valor no es exacto, solo recalca la parte estructural de la hélice y no considera los otros componentes que se encuentran en el interior del aerogenerador, tal como se muestra en la Figura 3.11

Figura 3.7 Vista en corte de la hélice toroidal de 15 grados



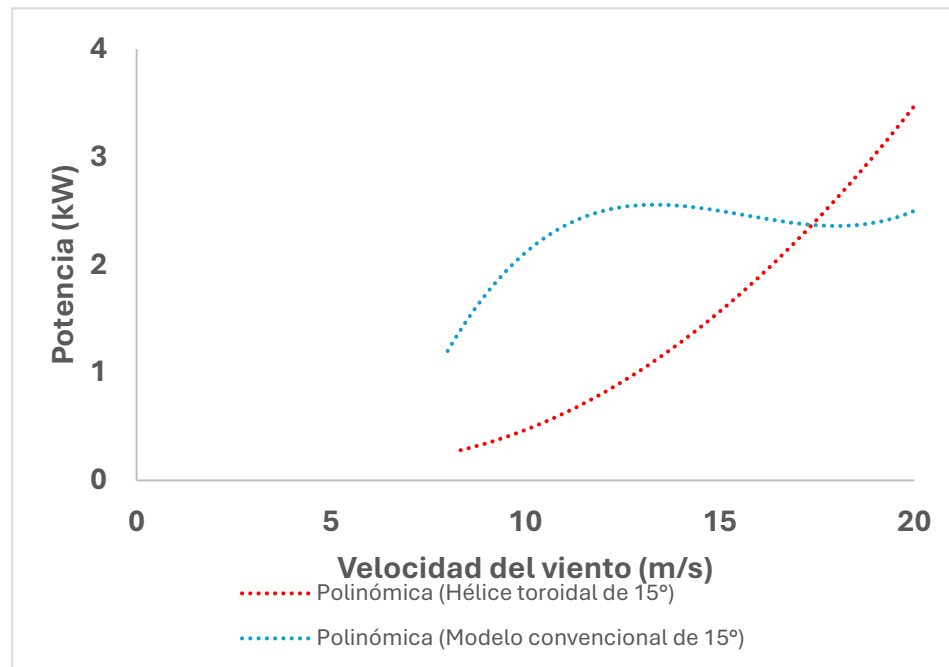
Finalmente, después de haber realizado simulaciones con cada una de las hélices toroidales, se presenta las ventajas y desventajas que tiene cada una cambiando su configuración de ángulo de ataque en la Tabla 3.6.

Tabla 3.8. *Ventajas y desventajas de las hélices toroidales*

Ángulo de ataque de las Hélices toroidales	Ventajas	Desventajas
5	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor producción de potencia mecánica a velocidades bajas 	<ul style="list-style-type: none"> • Diámetro de rotor fuera de los criterios de diseño • Bajo coeficiente de sustentación
10	<ul style="list-style-type: none"> • Mejor coeficiente sustentación que el de 5 grados 	<ul style="list-style-type: none"> • Peso mayor que el de 15 grados
15	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor coeficiente de sustentación que las demás configuraciones de ángulo de ataque • Mayor equilibrio aerodinámico • Se necesita menos cantidad de materia prima para su producción 	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia mecánica altas velocidades

3.8.2. Comparación de potencia entre hélice toroidal y convencional

Figura 3.8 Gráfica de Potencia vs velocidad de viento entre la hélice toroidal vs el modelo convencional



En la Figura 3.7 se observa que en un rango de entre 8.33 m/s y aproximadamente 13 m/s la operación del aerogenerador convencional genera mayor cantidad de potencia. Sin embargo, cuando llega a los 15 m/s la hélice toroidal incrementa en un 28.5% aproximadamente con respecto al modelo tradicional, por lo que, los dispositivos con álabes lineales se les complica generar más de 3 kW cuando las corrientes de viento superen los 20 m/s, considerando de que el área de incidencia es mayor al modelo tradicional y además que el tamaño del aerogenerador toroidal es menor en un 22%. No obstante, hay el análisis de la hélice toroidal es **estático e ideal**, de forma que al momento de que el dispositivo comience a rotar se obtendrán distintos resultados, debido a las pérdidas generadas por turbulencia y otros factores. Por ahora, se puede entender que el aerogenerador toroidal es mejor que el convencional a altas velocidades en un análisis estático.

Capítulo 4

4.1. Conclusiones

- Las cargas analizadas mediante la simulación CFD por el método de Volúmenes finitos, permitió estudiar la potencia del aerogenerador toroidal, resultando un mayor rendimiento a alta velocidades de viento con un 22% menor en tamaño que el aerogenerador comercial y produciendo un 28.5% más de energía mecánica.
- La caracterización en las ecuaciones de la trayectoria de la hélice toroidal permitió un modelo real para la conversión de la energía cinética en mecánica, tomando en consideración un perfil NACA 1412.
- El coeficiente de sustentación del aerogenerador toroidal es mayor cuando el ángulo de ataque es 15° , obteniendo un mejor equilibrio con respecto a los demás ángulos, además de la cuerda producen menos robustez, por lo que se consigue un mejor rendimiento aerodinámico que una hélice convencional.

4.2. Recomendaciones

- Realizar el estudio de manera dinámica, con el objetivo de obtener resultados mas cercanos a los aerogeneradores del mercado.
- Realizar un análisis de la hélice toroidal de forma Offshore, debido a que los resultados obtenidos muestran un buen comportamiento a altas velocidades.
- Realizar mas iteraciones de velocidades para obtener un comportamiento más preciso de la hélice toroidal

Referencias

- BOATTEST. (2022). *Sharrow Propeller™*. <https://boattest.com/Sharrow-Propeller>
- edp. (2023). *Energía eólica. Cómo el poder del viento puede hacer girar el mundo*.
- Eraso Checa, F., & Escobar Rosero, E. (2018). Metodología para la determinación de características del viento y evaluación del potencial de energía eólica en Túquerres-Nariño. *Revista Científica*, 1(31), 19–31.
<https://doi.org/10.14483/23448350.12304>
- Fermín Juan Araujo Cerezo. (2022). *Proyecto Fin de Máster INNOVACIÓN TECNOLÓGICA Producción de hidrógeno verde: comparativa de la viabilidad técnica y económica de energía eólica onshore y offshore* (Vol. 13).
www.tecnun.es
- CELEC. (2021, October 11). *Ecuador actualiza su Plan Maestro de Electricidad para impulsar inversiones en Energías Renovables No Convencionales por cerca de USD 2.200 Millones*. <https://www.celec.gob.ec/gensur/noticias/ecuador-actualiza-su-plan-maestro-de-electricidad-para-impulsar-inversiones-en-energias-renovables-no-convencionales-por-cerca-de-usd-2-200-millones/>
- Liyu, Y. E., Chao, W., Cong, S., & Chunyu, G. (n.d.). *Mathematical expression method for geometric shape of toroidal propeller*. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03419>
- meteoblue. (2023). *Archivo meteorológico Quito*.
- Ragheb, © M. (2021). *WIND ENERGY CONVERSION THEORY, BETZ EQUATION*.
- Santiago Pinzón Paz. (2013). *EL PERFIL ALAR Y SU NOMENCLATURA NACA*.
- UTPL. (2023). *Análisis del viento en Loja, periodo 2011 – 2023*.
- Augusto, P., Freitas, S., Orientador, S., Taygoara, :, & Oliveira, F. (n.d.). *ESTUDO NUMÉRICO DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS DE EIXO HORIZONTAL*.
<https://www.ecuavisa.com/noticias/economia/la-generacion-hidroelectrica-de-ecuador-bajara-a-menos-del-70-desde-octubre-por-el-estiaje-GC5501448>
- WindingMotor. (2022, August 29). *Experimental Wind Turbine*.
<https://www.printables.com/es/model/268125-experimental-wind-turbine/files>
- Daryl L. Logan. (2017). *A First Course in the Finite Element Method* (Sixth).

- Ryse Energy. (n.d.). *E-3 HAWT*. Retrieved August 26, 2024, from <https://www.ryse.energy/3kw-wind-turbines/>
- Montaño Tinoco, D. P. (2013). *Diseño de un aerogenerador de eje horizontal para el aprovechamiento de la energía eólica en el edificio multifamiliar número uno, de la ciudadela Julio Ordoñez, de la ciudad de Loja*.
- IDAE. (2007). *Energía de la Biomasa*.
- Grupo NAP. (2007). *Energía Solar Fotovoltaica*. www.coit.es
- Soto, J., Suárez, J., Hernández, I., Rodríguez, O., & López, J. (2019). Eficiencia en los aerogeneradores de eje horizontal considerando el efecto del tamaño del eje., 4.
- Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2015). *Fluid Mechanics and Its Applications The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*. <http://www.springer.com/series/5980>
- Bastianon, R. A. (2008). *CÁLCULO Y DISEÑO DE LA HÉLICE ÓPTIMA PARA TURBINAS EÓLICAS*. <http://Ricardo.Bastianon.googlepages.com/>
- Biadgo, A. M., & Aynekulu, G. (2017). Aerodynamic design of horizontal axis wind turbine blades. *FME Transactions*, 45(4), 647–660. <https://doi.org/10.5937/fmet1704647M>
- Mónica Orozco. (2023, September 21). *Esto le cuesta la sequía y los apagones de electricidad a Ecuador*. <https://www.primicias.ec/noticias/economia/costos-sequia-apagones-celec/>
- Made-in-China. (n.d.). *Virgin Natural PA 6/Nylon 6 Alta temperatura/fibra de vidrio 30%*. Retrieved August 28, 2024, from https://es.made-in-china.com/co_benjinxin/product_Virgin-Natural-PA-6-Nylon-6-High-Temperature-Glass-Fiber-30-_uoenegirog.html

APÉNDICE

Apéndice 1

Tabla de parámetros utilizados para la construcción de la trayectoria de la hélice toroidal de 15°

l[mm]	R[m]	r[m]	s[mm]	b[mm]	t[mm]	X _I	F _{II}
300	1.5	0.30	390.4	391.1	46.85	0.00	-27.6
205	1.5	0.41	396.8	397.5	47.62	-0.14	-25.5
165	1.5	0.52	380.5	381.2	45.66	-0.29	-23.4
205	1.5	0.63	355.5	356.1	42.66	-0.46	-21.3
185	1.5	0.74	328.4	329.0	39.40	-0.64	-18.9
155	1.5	0.85	302.0	302.5	36.24	-0.87	-16.3
210	1.5	0.95	277.4	277.9	33.29	-1.15	-13.3
220	1.5	1.06	254.8	255.2	30.57	-1.55	-9.3
215	1.5	1.17	233.8	234.2	28.06	-2.18	-6.6
270	1.5	1.28	214.1	214.5	25.69	-3.40	-4.6
380	1.5	1.39	195.0	195.3	23.40	-6.93	-1.9
450	1.5	1.39	195.0	195.3	23.40	6.93	-0.2
520	1.5	1.28	214.1	214.5	25.69	3.40	2.5
590	1.5	1.17	233.8	234.2	28.06	2.18	5.0
600	1.5	1.06	254.8	255.2	30.57	1.55	7.0
590	1.5	0.95	277.4	277.9	33.29	1.15	9.8
635	1.5	0.85	302.0	302.5	36.24	0.87	13.8
640	1.5	0.74	328.4	329.0	39.40	0.64	16.8
590	1.5	0.63	355.5	356.1	42.66	0.46	19.4
600	1.5	0.52	380.5	381.2	45.66	0.29	21.7
610	1.5	0.41	396.8	391.1	47.62	0.14	23.8
520	1.5	0.30	390.4	397.5	46.85	0.00	25.7

Apéndice 2*Tabla de parámetros utilizados para la construcción de la trayectoria de la hélice toroidal de 15°*

Θ_s [grad]	ψ [grad]	α [grad]	β [grad]	C_1 [mm]	y_b [mm]	y_f [mm]
1.26	0.0	15	0	195.19	18.75	26.56
0.94	8.2	15	0	198.40	19.06	27.00
0.71	16.4	15	0	190.26	18.28	25.89
0.55	24.5	15	0	177.74	17.08	24.19
0.43	32.7	15	0	164.18	16.05	22.34
0.35	40.9	15	0	151.00	14.51	20.55
0.28	49.8	15	0	138.71	13.33	18.87
0.23	57.3	15	0	127.39	12.24	17.33
0.19	65.4	15	0	116.91	11.23	15.91
0.16	73.6	15	0	107.04	10.28	14.57
0.14	81.8	15	0	97.48	9.37	13.26
0.14	90.0	15	0	97.48	9.37	13.26
0.16	98.2	15	0	107.04	10.28	14.57
0.19	106.4	15	0	116.91	11.23	15.91
0.23	114.5	15	0	127.39	12.24	17.33
0.28	122.7	15	0	138.71	13.33	18.87
0.35	130.9	15	0	151.00	14.51	20.55
0.43	139.1	15	0	164.18	16.05	22.34
0.55	147.3	15	0	177.74	17.08	24.19
0.71	155.4	15	0	190.26	18.28	25.89
0.94	163.6	15	0	198.40	18.75	26.56
1.26	171.8	15	0	195.19	19.06	27.00

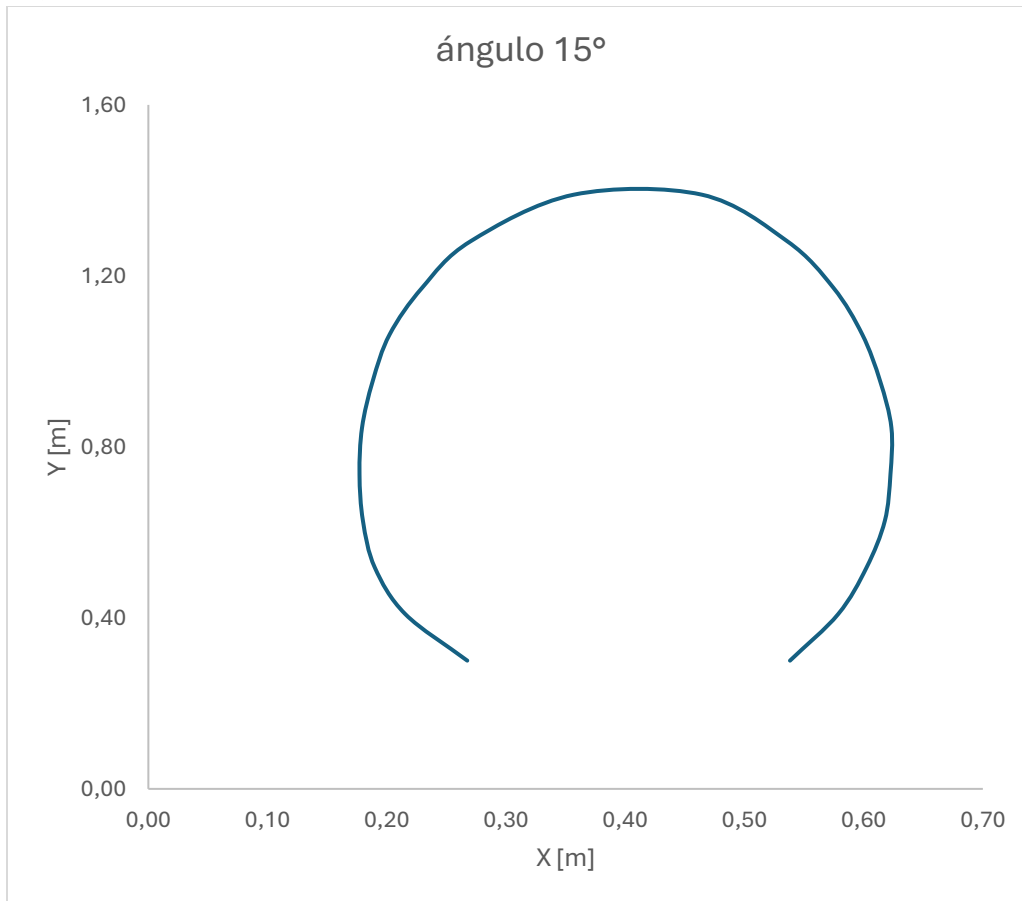
Apéndice 3

Coordenadas para la trayectoria de la hélice toroidal con ángulo de ataque de 15°

X	Y	Z
[mm]	[mm]	[mm]
267.5	300.0	6.6
215.4	409.0	6.7
189.9	518.0	6.4
180.0	627.0	6.0
177.1	736.0	5.5
179.2	845.0	5.1
188.2	954.0	4.7
202.4	1063.0	4.3
229.6	1172.0	3.9
270.3	1281.0	3.6
356.9	1390.0	3.3
464.2	1390.0	3.3
535.9	1281.0	3.6
574.7	1172.0	3.9
598.8	1063.0	4.3
613.8	954.0	4.7
623.3	845.0	5.1
622.5	736.0	5.5
617.8	627.0	6.0
602.5	518.0	6.4
578.7	409.0	6.7
538.2	300.0	6.6

Apéndice 4

Trayectoria en el plano XY de la hélice toroidal de 15°



Apéndice 5*Tabla de parámetros utilizados para la construcción de la trayectoria de la hélice toroidal de 10^0*

l[mm]	R[m]	r[m]	s[mm]	b[mm]	t[mm]	X _l	F _{il}
350	1.5	0.30	456.0	457.1	54.72	0.00	-27.6
280	1.5	0.41	463.5	464.7	55.62	-0.14	-25.5
245	1.5	0.52	444.5	445.6	53.34	-0.29	-23.4
290	1.5	0.63	415.2	416.3	49.83	-0.46	-21.3
260	1.5	0.74	383.5	384.5	46.02	-0.64	-18.9
220	1.5	0.85	352.7	353.6	42.33	-0.87	-16.3
280	1.5	0.95	324.0	324.9	38.88	-1.15	-13.3
290	1.5	1.06	297.6	298.3	35.71	-1.55	-9.3
275	1.5	1.17	273.1	273.8	32.77	-2.18	-6.6
335	1.5	1.28	250.1	250.7	30.01	-3.40	-4.6
450	1.5	1.39	227.7	228.3	27.33	-6.93	-1.9
500	1.5	1.39	227.7	228.3	27.33	6.93	-0.2
580	1.5	1.28	250.1	250.7	30.01	3.40	2.5
660	1.5	1.17	273.1	273.8	32.77	2.18	5.0
670	1.5	1.06	297.6	298.3	35.71	1.55	7.0
655	1.5	0.95	324.0	324.9	38.88	1.15	9.8
700	1.5	0.85	352.7	353.6	42.33	0.87	13.8
705	1.5	0.74	383.5	384.5	46.02	0.64	16.8
645	1.5	0.63	415.2	416.3	49.83	0.46	19.4
660	1.5	0.52	444.5	445.6	53.34	0.29	21.7
680	1.5	0.41	463.5	464.7	55.62	0.14	23.8
600	1.5	0.30	456.0	457.1	54.72	0.00	25.7

Apéndice 6

Tabla de parámetros utilizados para la construcción de la trayectoria de la hélice toroidal de 10^0

Θ_s [grad]	ψ [grad]	α [grad]	β [grad]	C_1 [mm]	y_b [mm]	y_f [mm]
1.50	0.0	10	0	227.99	22.26	31.53
1.12	8.2	10	0	231.73	21.90	31.02
0.85	16.4	10	0	222.23	21.25	30.24
0.65	24.5	10	0	207.60	19.94	28.25
0.51	32.7	10	0	191.76	18.42	26.09
0.41	40.9	10	0	176.37	16.94	24.00
0.33	49.8	10	0	162.01	15.56	22.04
0.28	57.3	10	0	148.79	14.29	20.25
0.23	65.4	10	0	136.55	13.19	18.58
0.19	73.6	10	0	125.02	12.01	17.01
0.16	81.8	10	0	113.86	10.94	15.49
0.16	90.0	10	0	113.86	10.94	15.49
0.19	98.2	10	0	125.02	12.01	17.01
0.23	106.3	10	0	136.55	13.19	18.58
0.28	114.5	10	0	148.79	14.29	20.25
0.33	122.7	10	0	162.01	15.56	22.04
0.41	130.9	10	0	176.37	16.94	24.00
0.51	139.1	10	0	191.76	18.42	26.09
0.65	147.2	10	0	207.60	19.94	28.25
0.85	155.4	10	0	222.23	21.25	30.24
1.12	163.6	10	0	231.73	21.90	31.02
1.50	171.8	10	0	227.99	22.26	31.53

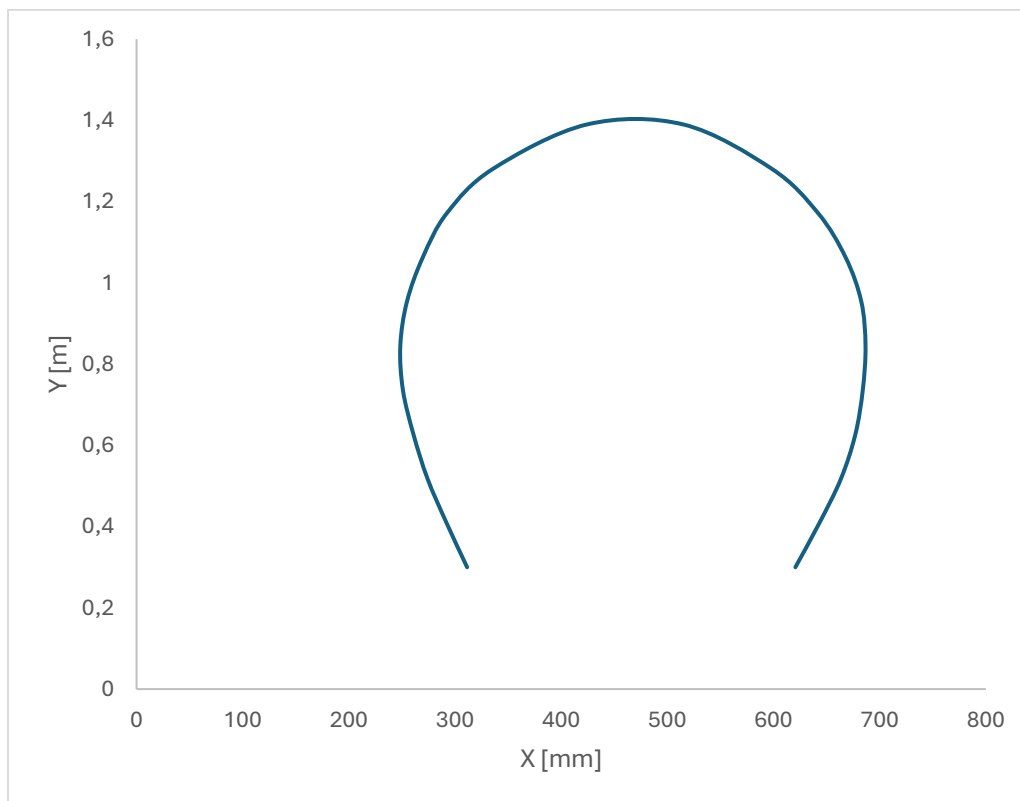
Apéndice 7

Coordenadas para la trayectoria de la hélice toroidal con ángulo de ataque de 10°

X	Y	Z
[mm]	[m]	[mm]
311.4	0.3	7.8
292.0	0.4	8.0
274.1	0.5	7.6
260.9	0.6	7.1
250.9	0.7	6.6
248.5	0.8	6.1
254.7	1.0	5.6
269.7	1.1	5.1
292.4	1.2	4.7
335.9	1.3	4.3
424.2	1.4	3.9
515.1	1.4	3.9
598.3	1.3	4.3
641.9	1.2	4.7
667.9	1.1	5.1
682.7	1.0	5.6
686.7	0.8	6.1
684.1	0.7	6.6
677.1	0.6	7.1
663.6	0.5	7.6
643.2	0.4	8.0
620.6	0.3	7.8

Apéndice 8

Trayectoria en el plano XY de la hélice toroidal de 10^0



Apéndice 9*Tabla de parámetros utilizados para la construcción de la trayectoria de la hélice toroidal de 5°*

l[mm]	R[m]	r[m]	s[mm]	b[mm]	t[mm]	X _l	F _{il}
300	1.5	0.300	817.77	819.84	98.13	0.00	-27.6
200	1.5	0.409	831.21	833.31	99.75	-0.09	-25.5
170	1.5	0.518	797.11	799.12	95.65	-0.12	-23.4
160	1.5	0.627	744.66	746.54	89.36	-0.22	-21.3
120	1.5	0.736	687.83	689.57	82.54	-0.25	-18.9
180	1.5	0.845	632.61	634.21	75.91	-0.34	-16.3
200	1.5	0.954	581.13	582.60	69.74	-0.49	-13.3
275	1.5	1.063	533.71	533.06	64.04	-0.47	-9.3
320	1.5	1.172	489.80	491.04	58.78	-2.18	-6.6
460	1.5	1.281	448.45	449.58	53.81	-1.19	-4.6
660	1.5	1.390	408.41	409.44	49.01	-1.73	-1.9
820	1.5	1.390	408.41	409.44	49.01	6.95	-0.2
1015	1.5	1.281	448.45	449.58	53.81	2.14	2.5
1095	1.5	1.172	489.80	491.04	58.78	1.19	5.0
1188	1.5	1.063	533.71	533.06	64.04	1.00	7.0
1245	1.5	0.954	581.13	582.60	69.74	0.78	9.8
1260	1.5	0.845	632.61	634.21	75.91	0.45	13.8
1386	1.5	0.736	687.83	689.57	82.54	0.27	16.8
1300	1.5	0.627	744.66	746.54	89.36	0.20	19.4
1370	1.5	0.518	797.11	799.12	95.65	0.05	21.7
1225	1.5	0.409	831.21	833.31	99.75	0.02	23.8
1200	1.5	0.300	817.77	819.84	98.13	0.00	25.7

Apéndice 10*Tabla de parámetros utilizados para la construcción de la trayectoria de la hélice toroidal de 5°*

Θ_s [grad]	ψ [grad]	α [grad]	β [grad]	C_1 [mm]	y_b [mm]	y_f [mm]
2.716	0.0	0	0	408.9	58.88	39.25
2.025	5.3	5	0	415.6	59.85	39.90
1.533	7.0	5	0	398.5	57.39	38.26
1.183	12.2	5	0	372.3	53.62	35.74
0.931	13.9	5	0	343.9	49.52	33.02
0.746	19.0	5	0	316.3	45.55	30.37
0.607	26.0	5	0	290.6	41.84	27.89
0.500	25.0	5	0	266.8	38.43	25.62
0.416	30.0	5	0	244.9	35.27	23.51
0.349	50.0	5	0	224.2	32.29	21.53
0.293	81.8	5	0	204.2	29.41	19.60
0.293	98.2	5	0	204.2	29.41	19.60
0.349	130.0	5	0	224.2	32.29	21.53
0.416	141.0	5	0	244.9	35.27	23.51
0.500	155.0	5	0	266.8	38.43	25.62
0.607	155.0	5	0	290.6	41.84	27.89
0.746	160.0	5	0	316.3	45.55	30.37
0.931	169.0	5	0	343.9	49.52	33.02
1.183	172.0	5	0	372.3	53.62	35.74
1.533	175.0	5	0	398.5	57.39	38.26
2.025	179.0	5	0	415.6	59.85	39.90
2.716	180.0	0	0	408.9	58.88	39.25

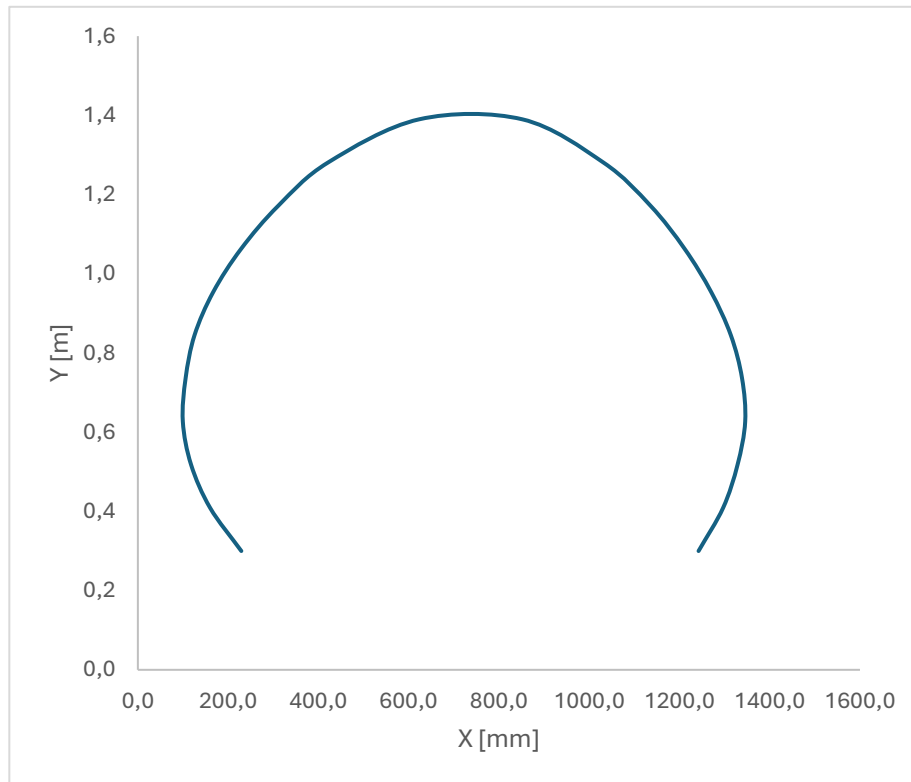
Apéndice 11

Coordenadas para la construcción de la trayectoria de la hélice toroidal de 5°

X	Y	Z
[mm]	[mm]	[mm]
229.2	300	14.2
160.0	400	14.4
117.9	500	13.9
99.6	600	12.9
105.8	700	12.0
125.5	800	11.0
167.0	1000	10.1
228.8	1100	9.3
311.3	1200	8.5
421.4	1300	7.8
623.3	1400	7.1
851.8	1400	7.1
1031.4	1300	7.8
1135.7	1200	8.5
1211.5	1100	9.3
1270.3	1000	10.1
1313.9	800	11.0
1338.7	700	12.0
1345.7	600	12.9
1328.8	500	13.9
1296.8	400	14.4
1242.3	300	14.2

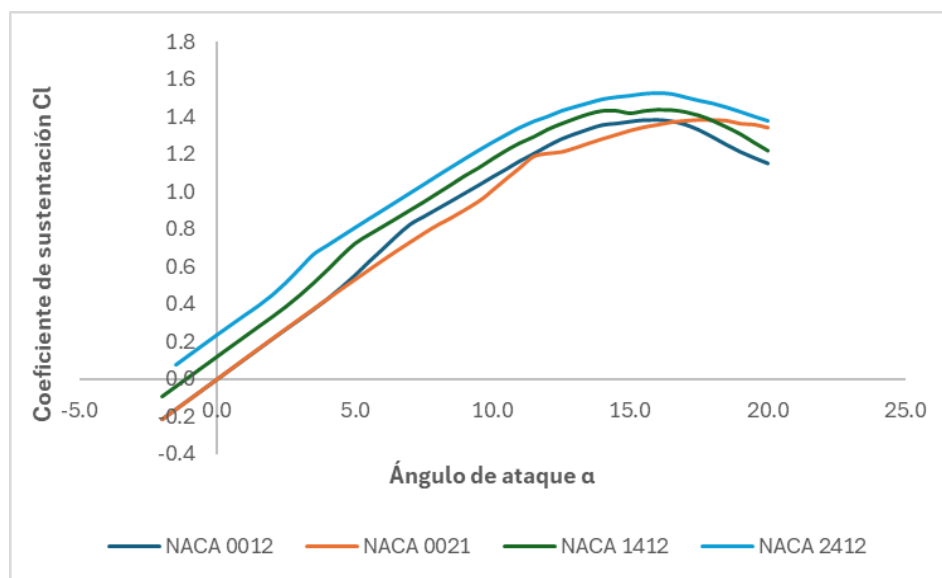
Apéndice 12

Coordenadas en el plano XY de la trayectoria de la hélice toroidal de 5°



Apéndice 13

Comparación de coeficiente de sustentación de cada perfil aerodinámico



Fuente: Datos tomados del software Qblade

Apéndice 14

Valores de cuerda de ángulo de ataque de 5°

<u>C</u>
<u>[m]</u>
0.818
0.831
0.797
0.745
0.688
0.633
0.581
0.534
0.490
0.448
0.408

Apéndice 15

Valor de cuerda de ángulo de ataque de 10°

<u>C</u>
<u>[m]</u>
0.456
0.463
0.444
0.415
0.384
0.353
0.324
0.298
0.273
0.250
0.228

Apéndice 16

Valor de cuerda de ángulo de ataque de 15°

<u>C[m]</u>
0.390
0.397
0.381
0.355
0.328
0.302
0.277
0.255
0.234
0.214
<u>0.195</u>

ANEXOS

Cálculos demostrativos

Cálculos utilizando como referencia el diseño CAD de 15 grados

Cálculo de relación de la velocidad punta

Como el número de alabes es 3, entonces según la **Tabla 4** $\lambda = 3$

$$\lambda_r = \lambda \times \frac{r_i}{R}$$

$$\lambda_r = 3 \times \frac{0.3}{1.5}$$

$$\lambda_r = 0.6$$

Cálculo del ángulo óptimo del viento

$$\varphi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{1}{0.6} \right)$$

$$\varphi = 39.36$$

Cálculo del factor de perdida

$$F_i = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[e^{\left[\frac{\left[\frac{-B}{2} \left[1 - \frac{r_i}{2} \right] \right]}{\frac{r_i}{R} \sin \varphi} \right]} \right]$$

$$F_i = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[e^{\left[\frac{\left[\frac{-3}{2} \left[1 - \frac{0.3}{2} \right] \right]}{\frac{0.3}{1.5} \sin 39.36} \right]} \right]$$

$$F_i = 0.9997$$

Cálculo de la cuerda del perfil

Mediante los datos calculados previamente, más el coeficiente de sustentación que fue obtenido mediante la grafica producido por el programa *Qblade*, indicando que a un ángulo de ataque de 15 grados el C_l es 1.42,

$$c = \frac{8\pi r_i F_i \sin \varphi}{BC_l} \left[\frac{\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi}{\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi} \right]$$

$$c = \frac{8\pi(0.3)(0.9997) \sin 39.36}{3 * 1.46} \left[\frac{\cos 39.36 - 0.8 \sin 39.36}{\sin 39.36 + 0.8 \cos 39.36} \right]$$

$$c = 0.3904$$

Cálculo de la velocidad del viento

$$V = V_1(1 - a)$$

$$V_4 = V_1(1 - 2a)$$

Cálculo de fuerza ejercida del viento sobre las alabes

$$F_{ah} = \rho A_t V (V_1 - V_4)$$

$$F_{ah} = 0.593 \times 1.125 \times 0.488 \times 8.33^2$$

$$F_{ah} = 22.590N$$

Cálculo de la trayectoria de la hélice toroidal

Para el obtener cada uno de los puntos de la trayectoria de la ecuación toroidal, se deben considerar los valores fijos y demás parámetros considerados previamente.

- En la coordenada X.

$$c_1 = \frac{b}{2} - \frac{r\theta_s}{\cos\beta\cos\alpha}$$

$$c_1 = \frac{391.1}{2} - \frac{0.3 * 2.716}{\cos 0 \cos 0}$$

$$c_1 = 195.19$$

Es importante tener en cuenta de que $\beta = 0$ y que los valores de y_b y y_f fue interpretado como la raíz de la suma de cuadrados.

$$x = l + x_l - \sqrt{y_b^2 + y_f^2} \cos \psi$$

$$x = 300 + 0 - \sqrt{18.75^2 + 26.56^2} \cos 0$$

$$x = 267.5 [mm] \equiv 0.268[m]$$

- En la coordenada Y

$$\begin{aligned}y &= r_i \cos \theta \\y &= 0.3 \cos 1.26 \\y &= 0.3 [m]\end{aligned}$$

- En la coordenada Z

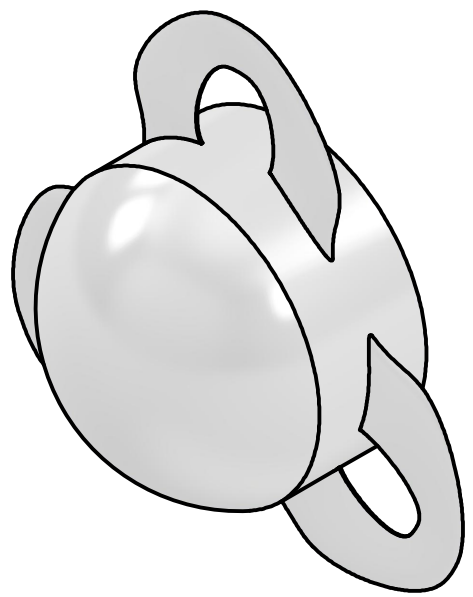
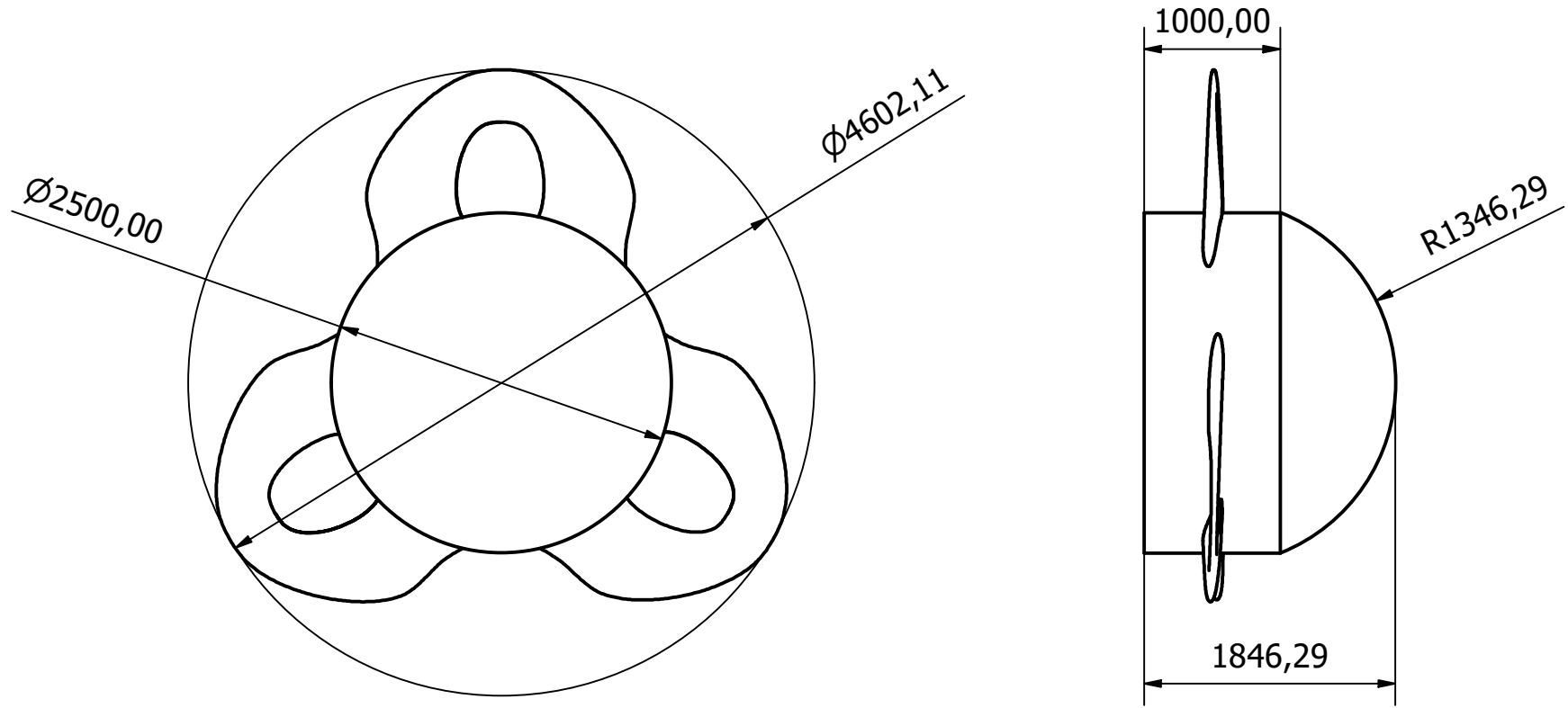
$$\begin{aligned}z &= 0.3 \sin 1.26 \\z &= 0.0066 [m]\end{aligned}$$

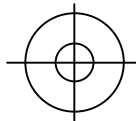
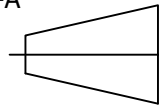
Cálculo de la potencia por las 3 palas por ello se multiplica 3 veces

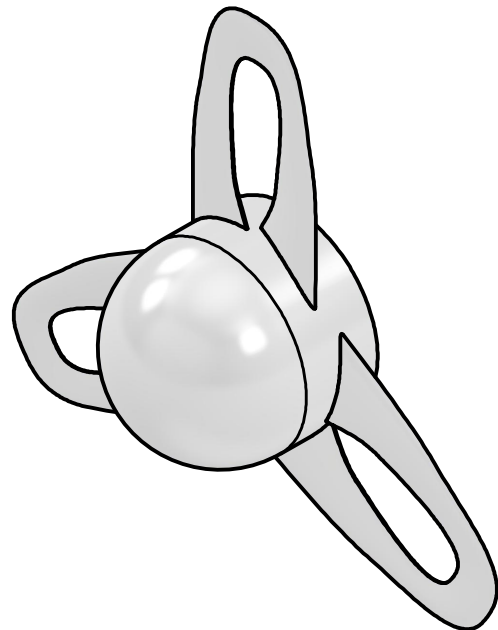
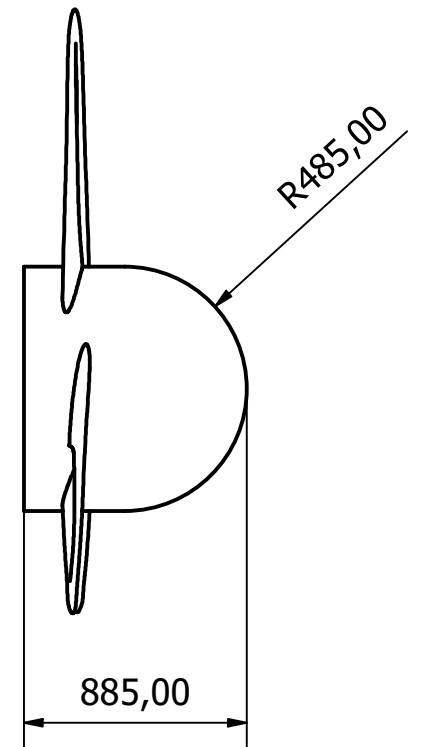
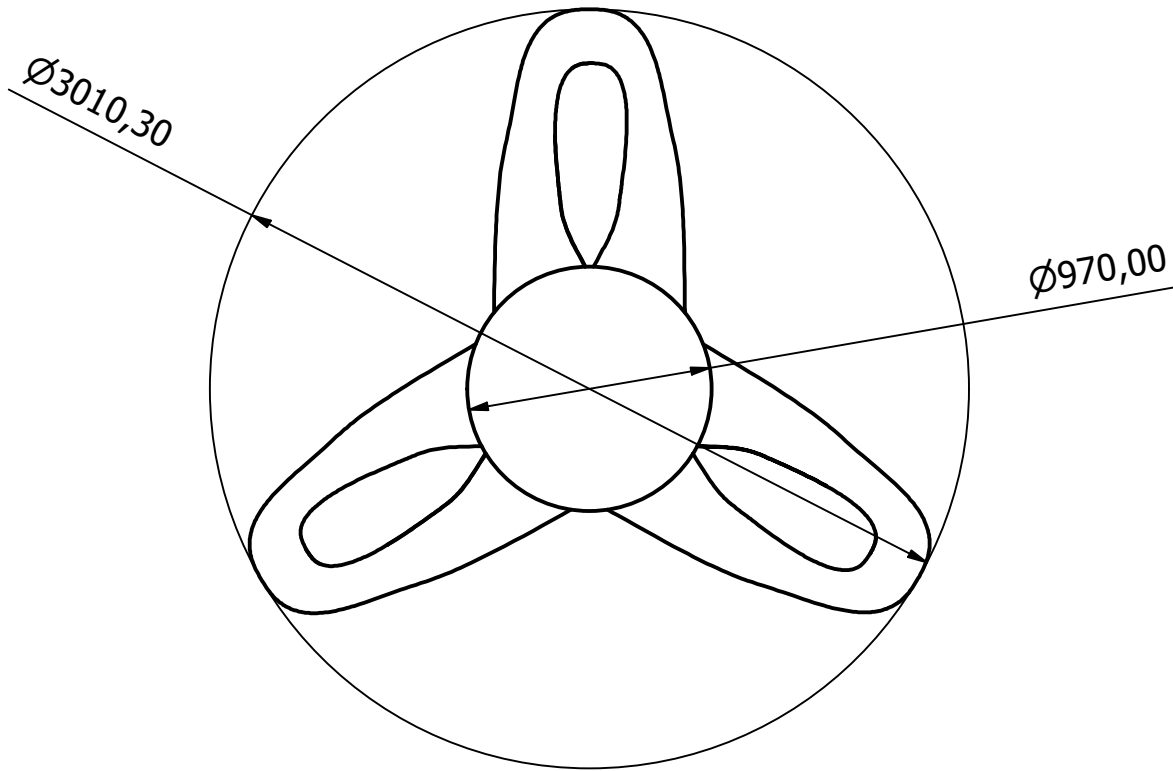
$$P_c = \frac{1}{2} F_{ah} V$$

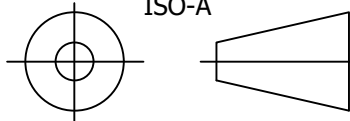
$$P_c = \frac{1}{2} \times 8.33 \times 22.42 \times 3$$

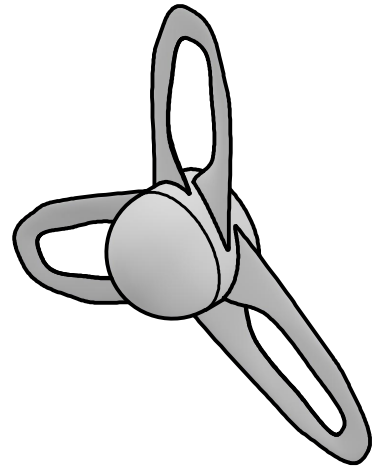
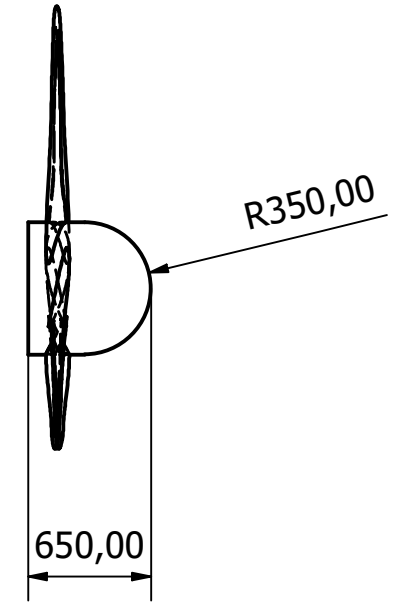
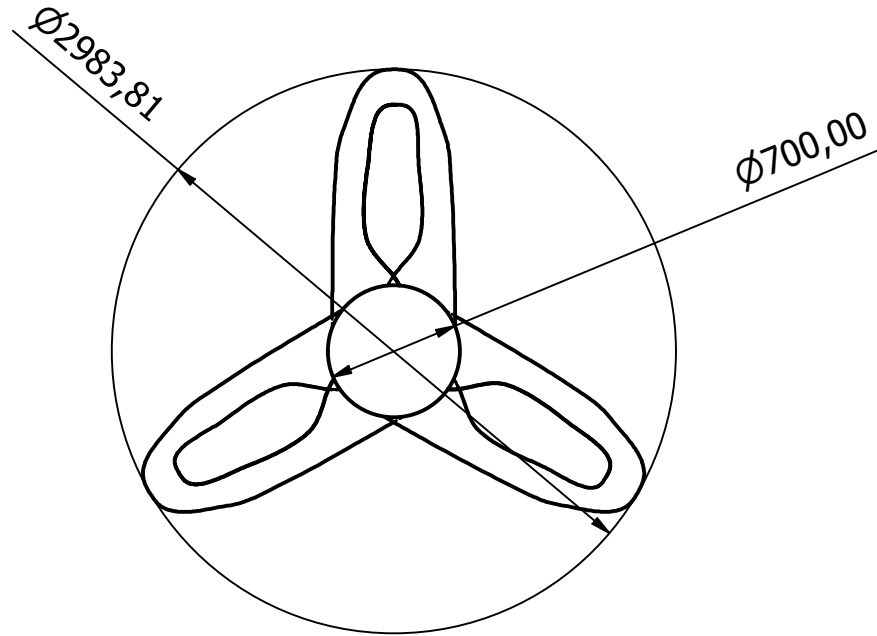
$$P_c = 298 [W] \equiv 0.298 [kW]$$



Escuela Superior Politécnica del Litoral Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción			Diseñado por:	J. Bustamante
			Revisado por:	C. Mendoza
			Aprobado por:	Ing. Cuenca
Escala:	1:50	Título	Fecha:	5/9/2024
Unidad:	mm		Hélice toroidal de 5°  	
Material:	Fibra de vidrio			



Escuela Superior Politécnica del Litoral Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción			Diseñado por:	J. Bustamante
			Revisado por:	C. Mendoza
			Aprobado por:	Ing. Cuenca
Escala:	1:30	Título	Fecha:	5/9/2024
Unidad:	mm		ISO-A 	
Material:	Fibra de vidrio	Hélice toroidal de 10°		



Escuela Superior Politécnica del Litoral Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción			Diseñado por:	J. Bustamante
			Revisado por:	C. Mendoza
			Aprobado por:	Ing. Cuenca
Escala:	1:40	Título	Fecha:	5/9/2024
Unidad:	mm		ISO-A 	
Material:	Fibra de vidrio	Hélice toroidal de 15°		