

DISEÑO Y ANÁLISIS CFD DE UN ROTOR PARA UNA TURBINA EÓLICA A PARTIR  
DE TÉCNICAS DE BIOMIMETISMO

SIK-LAD ORTIZ PEÑA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA  
2023

DISEÑO Y ANÁLISIS CFD DE UN ROTOR PARA UNA TURBINA EÓLICA A PARTIR  
DE TÉCNICAS DE BIOMIMETISMO

SIK-LAD ORTIZ PEÑA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

RICARDO ALFONSO JAIMES ROLÓN

MSC Ingeniero Mecánico

Codirector

CRISTIAN ANDRÉS HERNÁNDEZ SALAZAR

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2023

## **DEDICATORIA**

"El día en que los hombres seamos capaces de entender a la naturaleza, ese día nos entenderemos a nosotros mismos. Si existe la perfección, pero el ser humano aún no entiende el significado de esta palabra."

## **AGRADECIMIENTOS**

A todas aquellas personas que estuvieron para mí.  
Todas aquellas que influenciaron de forma positiva.

A mi familia.

A mi madre.

A la universidad industrial de Santander

A Tecnoparque nodo Bucaramanga

A Dios...

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	16
1. OBJETIVOS .....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. JUSTIFICACIÓN.....	19
2.1 DELIMITACIÓN .....	19
2.2. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN .....	20
3. MARCO TEÓRICO .....	21
3.1 MARCO REFERENCIAL .....	21
3.2 ANTECEDENTES.....	22
4. METODOLOGÍA.....	24
4.1 FASES DE LA INVESTIGACIÓN .....	24
4.2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES. ....	26
4.3 MEDICIÓN DE VARIABLES .....	27
4.4 EXPERIMENTO DE SELECCIÓN DE UN ÚNICO ÁRBOL. ....	29
4.4.1 Selección de muestra. ....	33
4.5 MEDICIÓN DE ÁNGULOS ENTRE LOS PÉTALOS. ....	34
4.6 MEDICIÓN DE ÁNGULOS DE INCLINACIÓN DE LOS PÉTALOS.....	35
4.7 MEDICIÓN DE LA CURVA LATERAL DE LOS PÉTALOS .....	37
4.8 MEDICIÓN DE LA GEOMETRÍA SUPERIOR DE LOS PÉTALOS.....	39
4.9 MEDICIÓN GEOMETRÍA BASE DE LA FLOR.....	40
4.10 MODELOS 3D INICIALES .....	41
4.11 METODOLOGÍA CFD.....	42

4.11.1 Primer grupo de análisis CFD .....	43
4.11.1.1 Volumen de control .....	43
4.11.1.2 Configuración análisis CFD Flow simulation. ....	43
4.11.1.3 Mallado .....	45
4.11.1.4 Región rotativa.....	46
4.11.1.5 Condiciones de contorno. ....	46
4.11.1.6 Goals. ....	47
4.11.2 Segundo grupo de análisis CFD .....	47
4.11.2.1 Volumen de control .....	49
4.11.2.2 Configuración análisis CFD Flow simulation. ....	49
4.11.2.3 Mallado .....	50
4.11.2.4 Región rotativa.....	51
4.11.2.5 Condiciones de contorno. ....	51
4.11.2.6 Goals. ....	51
4.11.3 Análisis CFD tercer grupo. ....	52
4.11.3.1 Mallado .....	52
4.11.3.2 Demás condiciones del análisis CFD .....	53
4.12 PROTOTIPO DE LA TURBINA Y PRUEBAS FÍSICAS. ....	53
4.12.1 Soporte de la turbina.....	54
4.12.2 Buje de la turbina. ....	55
4.12.3 Pruebas físicas. ....	55
4.12.3.1 Variables a medir. ....	56
4.12.3.2 Efectividad de rotación de los modelos. ....	56
4.12.3.3 RPM.....	56

4.12.3.4 Voltaje generado.....	57
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	58
5.1 RESULTADOS GEOMÉTRICOS.....	58
5.1.1 Configuraciones obtenidas de ángulos entre pétalos.....	58
5.1.2 Ángulos de inclinación de los pétalos obtenidos.....	61
5.1.3 Curvatura lateral obtenida.....	62
5.1.4 Geometría estándar superior de los pétalos .....	65
5.1.5 Geometría base de la flor.....	66
5.2 RESULTADOS ANALISIS CFD .....	67
5.2.1 Resultados primer grupo de análisis CFD .....	67
5.2.1.1 Mayor torque obtenido a los 20 grados de inclinación de los pétalos con su base.....	68
5.2.1.2 Mayor torque obtenido a los 30 grados de inclinación de los pétalos con su base.....	68
5.2.1.3 Mayor torque obtenido a los 45 grados de inclinación de los pétalos con su base.....	69
5.2.1.4 Mayor torque obtenido a los 70 grados de inclinación de los pétalos con su base.....	70
5.2.1.5 Mayores torques obtenidos en el primer grupo de análisis CFD. ....	71
5.2.2 Resultados segundo grupo de análisis CFD .....	71
5.2.3 Resultados tercer grupo de análisis CFD .....	74
5.3 Resultados pruebas físicas.....	76
5.3.1 Efectividad de rotación de las turbinas.....	77
5.3.2 Rpm medidas.....	77
5.3.3 Voltaje Generado.....	78

5.4 Aplicaciones de la turbina. ....	78
5.4.1 Energía eólica. ....	78
5.4.2 Industria aeroespacial. ....	80
5.5 Mejoras e investigaciones futuras. ....	82
6. CONCLUSIONES .....	83
REFERENCIAS .....	85
ANEXOS .....	88

## LISTAS DE TABLAS

Tabla 1. Experimento de selección de un árbol de <i>Pétrea Volubilis</i> .....	30
Tabla 2. Características de las muestras de flores recolectadas.....	32
Tabla 3. Dimensiones volumen de control primer grupo de análisis CFD. ....	43
Tabla 4. Parámetros iniciales del análisis CFD. ....	44
Tabla 5. Dimensiones volumen de control segundo grupo de análisis CFD.....	49
Tabla 6. Parámetros iniciales del análisis CFD. ....	49
Tabla 7. Ángulos entre pétalos según configuraciones obtenidas.....	61
Tabla 8. Ángulos de inclinación base pétalo medidos por un plano vertical. ....	61
Tabla 9. Valores promedio obtenidos Y (Max), X (Y Max) y R radio de curvatura .	63
Tabla 10. Valores promedio y estándar de la geometría superior de los pétalos. .	65
Tabla 11. Valores promedio, aproximado y estándar de la geometría de la base de la flor.....	66
Tabla 12. Variantes del primer grupo análisis CFD. ....	67
Tabla 13. Resultado primer grupo CFD, Valores de torque obtenidos con un ángulo de 20 grados de inclinación de los pétalos con su base. ....	68
Tabla 14. Resultado primer grupo CFD, Valores de torque obtenidos con un ángulo de 30 grados de inclinación de los pétalos con su base. ....	69
Tabla 15. Resultado primer grupo CFD. Valores de torque obtenidos con un ángulo de 45 grados de inclinación de los pétalos con su base. ....	69
Tabla 16. Resultado primer grupo CFD. Valores de torque obtenidos con un ángulo de 70 grados de inclinación de los pétalos con su base. ....	70
Tabla 17. Resultado primer grupo CFD. Mayores valores de torque obtenidos. ...	71
Tabla 18. Valores del ángulo de torsión implementados al pétalo.....	72
Tabla 19. Resultados del valor del troque con ángulos detorsión entre -50 y 50 grados. ....	72
Tabla 20. Resultados del valor del troque con ángulos detorsión entre -50 y -140 grados. ....	73

Tabla 21. Resultado torque modelos con ángulos de torsión de 0,-50 y -140 grados.  
.....74

Tabla 22. Resultado torque modelos con ángulos de torsión de 0,-50 y -140 grados  
con malla refinada. ....74

Tabla 23. Especificaciones de cómputo y mallado de la simulación tercer grupo. 76

Tabla 24. Resultados prueba de efectividad de rotación de las turbinas. ....77

Tabla 25. RPM medidas turbinas con flujo a un metro de distancia. ....77

Tabla 26. Resultados de voltaje generado por las turbinas. ....78

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aerogenerador Nordex en parque eólico Uruguay. ....	16
Figura 2. Pájaros muertos debido a un aerogenerador. ....	17
Figura 3. Flores del árbol <i>Pétrea Volubilis</i> . ....	19
Figura 4. Variables geométricas a determinar de la flor. ....	26
Figura 5. Banco de pruebas para toma de fotografías dela geometría de la flor. ..	27
Figura 6. Forma de sujeción del pétalo al banco de pruebas. ....	28
Figura 7. Toma de fotos con técnica de fondo infinito. ....	29
Figura 8. Muestras recolectadas ....	31
Figura 9. Primeras flores recolectadas.....	31
Figura 10. Muestra del árbol A.....	32
Figura 11. Cálculo de tamaño de la muestra en el programa G-Power .....	33
Figura 12. Proceso de medición de Ángulos entre pétalos .....	34
Figura 13. Proceso de toma de fotos para análisis de inclinación de los pétalos. .	35
Figura 14. Proceso de medición ángulo del pétalo respecto a su base.....	36
Figura 15. Curvatura lateral pétalos. ....	37
Figura 16. Proceso de trasladar curva lateral pétalo al origen. ....	38
Figura 17. Proceso de obtención puntos de la Spline. ....	38
Figura 18. Parámetros medidos vista superior de los pétalos. ....	39
Figura 19. Proceso captura geometría base de las flores. ....	40
Figura 20. Proceso de modelado en función de las variables. ....	41
Figura 21. Región estática y región móvil de los análisis CFD. ....	42
Figura 22. Crear nuevo proyecto en Flow Simulation.....	44
Figura 23. Mallado general primer grupo de análisis CFD. ....	45
Figura 24. Mallado región móvil o rotatoria primer grupo de análisis CFD. ....	46
Figura 25. Condiciones de contorno primer grupo de análisis CFD. ....	47
Figura 26. Proceso de ángulo de torsión de un pétalo. ....	48
Figura 27. Pétalo sin y con ángulo de torsión. ....	49
Figura 28. Mallado general segundo grupo de análisis CFD.....	50

Figura 29. Mallado región móvil o rotatoria segundo grupo de análisis CFD.....	50
Figura 30. Condiciones de contorno segundo grupo de análisis CFD. ....	51
Figura 31. Mallado general tercer grupo de análisis CFD. ....	52
Figura 32. Mallado región móvil o rotatoria tercer grupo de análisis CFD. ....	53
Figura 33. Turbina impresa tamaño flor. ....	53
Figura 34. Foto soporte turbina. ....	54
Figura 35. Acople motor turbina. ....	54
Figura 36. Rodamiento seleccionado para modelos de prueba. ....	55
Figura 37. Experimento de efectividad de rotación de la turbina. ....	56
Figura 38. Medición RPM tacómetro. ....	57
Figura 39. Medición de voltaje generado. ....	57
Figura 40. Flujos de aire sobre los modelos. ....	75
Figura 41. Diseño básico de un aerogenerador múltiples turbinas. ....	79
Figura 42. Posible dispositivo acelerador de aire. ....	80
Figura 43. Posible diseño nave no tripulada o satélite. ....	80
Figura 44. Posible uso del rotor en cohetes como anillo de generación de energía. .....	81

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Información árbol <i>pétrea volubilis</i> .....	88
Anexo B. Método de modelamiento pétalos.....	89
Anexo C. Análisis CFD.....	95
Anexo D. Obtención de la geometría entre petalos propuesta por el autor.....	99
Anexo E. Futuras investigaciones .....	102

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO Y ANÁLISIS CFD DE UN ROTOR PARA UNA TURBINA EÓLICA A PARTIR DE TÉCNICAS DE BIOMIMETISMO\*

**AUTOR:** SIK-LAD ORTIZ PEÑA\*\*

**PALABRAS CLAVE:** BIOMIMETISMO, TURBINA, ENERGÍA EÓLICA, ANÁLISIS CFD

### DESCRIPCIÓN:

La energía eólica es una fuente alterna a la energía tradicional. Aun así, esta es solo representa una pequeña parte de la demanda energética del país. Lo anterior deviene de factores, tales como, su elevado costo de producción, su ingente tamaño, la poca experiencia en el manejo de este tipo de energía y el poco acceso a ella. Con esta tesis, se busca diseñar una turbina, con base a técnicas de biomimetismo, inspiradas en las flores del árbol *Pétrea Volubilis*. Se busca absolver los cuestionamientos previamente planteados. El proceso de diseño de la turbina, se llevó a cabo capturando la geometría de la flor mediante fotos, luego con ayuda de un software para modelamiento 3D, se establecieron las medidas y posteriormente se realizó un análisis CFD, el cual permitió optimizar la turbina. Se encontró que este tipo de turbina, permite crear aerogeneradores de baja envergadura, lo que reduce el costo de fabricación y permite ser usado en zonas donde la velocidad del viento se incrementa debido al efecto Venturi, tal es el caso de locaciones cercanas a edificios y carreteras.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica

Director: Ricardo Alfonso Jaimes Rolón. MSC Ingeniero Mecánico.

Codirector: Cristian Andrés Hernández Salazar. Ingeniero Mecánico.

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN AND CFD ANALYSIS OF A WIND TURBINE ROTOR USING BIOMIMICRY TECHNIQUES \*

**AUTHOR:** SIK-LAD ORTIZ PEÑA\*\*

**KEY WORDS:** BIOMIMICRY, TURBINE, WIND ENERGY, CFD ANALYSIS.

### DESCRIPTION:

Wind energy is an alternative source to traditional energy. However, it represents only a small fraction of the country's energy demand. This is primarily due to factors such as its high production cost, large size, limited experience in handling this type of energy, and restricted accessibility. With this thesis, we aim to design a propeller based on biomimicry techniques inspired by the flowers of the Pétrea Volubilis tree. We seek to address the questions raised earlier. The propeller design process involved capturing the flower's geometry through photos. Subsequently, using 3D modeling software, we established the measurements, followed by a CFD analysis to optimize the propeller. Our findings indicate that this type of propeller allows for the development of low-span wind turbines, which reduces manufacturing costs and makes it feasible for use in areas where wind speeds increase due to the Venturi effect, such as locations near buildings and roads.

---

\*Degree work

\*\* Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica

Director: Ricardo Alfonso Jaimes Rolón. MSC mechanical Engineering.

Codirector: Cristian Andrés Hernández Salazar. mechanical Engineering

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, el ser humano está implementando el uso de energías renovables, esto con el fin de reducir el efecto ambiental causado en los últimos siglos, para ello se han buscado formas seguras y limpias de obtener la energía, que se provee de forma gratuita y casi ilimitada por el sol y la naturaleza.

La energía eólica esta poco a poco convirtiéndose en un medio rentable para la obtención de energía eléctrica, el descubrimiento de nuevos materiales y las continuas mejoras en los procesos de mecanizado, han permitido que este tipo de energía limpia compita en el mercado energético.

Figura 1. Aerogenerador Nordex en parque eólico Uruguay.



Fuente: Revista Eólica y del Vehículo eléctrico<sup>1</sup>.

Además, aunque en la actualidad se poseen materiales muy resistentes y livianos para mecanizar los aerogeneradores, el gran tamaño de estos encarece los costos de fabricación, y los hace casi inasequible a pequeñas comunidades con problemas de abastecimiento de energía eléctrica.

Pero aun así la cantidad de energía eólica que se puede aprovechar es sumamente baja, alrededor del 59% de la potencia eólica disponible, esto demostrado por el

---

<sup>1</sup> REVE. Eólica en Uruguay. Ewind. Disponible en línea, 01 febrero 2023 en: <https://www.ewind.com/2015/03/18/eolica-en-uruguay-ya-se-puede-invertir-en-el-parque-eolico-de-ute/>.

teorema de Betz y con un dispositivo captador de energía eólica ideal<sup>2</sup>. Por este motivo muchos países no han considerado el uso de este tipo de energía para suplir sus requerimientos energéticos.

Otro gran inconveniente de los aerogeneradores es el ruido producido, este impacta negativamente tanto a comunidades humanas como animales, y las aspas son sumamente peligrosas para animales aéreos.

Figura 2. Pájaros muertos debido a un aerogenerador.



Fuente: Blablanegocios.com<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> ENERGÍA EÓLICA. Disponible en línea, 01 febrero 2023 en: [https://fjarabo.webs.ull.es/VirtualDoc/Curso%202013-2014/Energ%C3%ADas%20renovables%20\(Tecnolog%C3%ADa%20Energ%C3%A9tica\)/3\\_Eolica/Eolica\\_Resumen.pdf](https://fjarabo.webs.ull.es/VirtualDoc/Curso%202013-2014/Energ%C3%ADas%20renovables%20(Tecnolog%C3%ADa%20Energ%C3%A9tica)/3_Eolica/Eolica_Resumen.pdf)

<sup>3</sup> NPICASSO. Impacto ambiental de la energía eólica. Blablanegocios. Disponible en línea, 25 septiembre 2018 en: <http://blablanegocios.com/impacto-ambiental-la-energia-eolica/>.

# 1. OBJETIVOS

## 1.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir con la misión de la escuela de ingeniería mecánica de la universidad industrial de Santander al diseñar y analizar el comportamiento aerodinámico de un rotor para una turbina eólica, en base a diseños presentes en la naturaleza.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Caracterizar las propiedades aerodinámicas de la flor del árbol *Petrea volubilis*.
  - Desarrollar un experimento que permita la selección de un número finito de flores a analizar.
  - Implementar una técnica efectiva que permita la réplica y modelamiento de estas flores en el software SolidWorks.
  - Analizar mediante un software de CFD las propiedades aerodinámicas de cada flor de *Petrea volubilis* seleccionada.
  - Optimizar las geometrías obtenidas.
  - Clasificar y analizar los resultados obtenidos.
  
- ✓ Proponer una geometría de los alabes del rotor en base a los resultados obtenidos
  - Caracterizar mediante un software de CFD las propiedades aerodinámicas de la propuesta de diseño y sus parámetros de funcionamiento.
  - Seleccionar el buje para el rotor.
  - Analizar los datos obtenidos.
  
- ✓ Realizar un diseño base para futuras investigaciones en el campo de la obtención de energía eléctrica a partir de la energía potencial de los objetos.

## 2. JUSTIFICACIÓN

Lo que se busca con la realización de este proyecto de grado, es diseñar una turbina para una turbina eólica (con posibles aplicaciones aeronáuticas e hidroeléctricas); en base al diseño presente en la flor del árbol *Pétrea Volubilis*.

Figura 3. Flores del árbol *Pétrea Volubilis*.



Fuente: Autor

Se espera que al replicar este diseño, sea posible obtener información valiosa, que permita optimizar el proceso de obtención de energía mediante un fluido o llegado el caso, mejorar el proceso de propulsión de las turbinas.

Esta flor, hace uso del principio de auto rotación de forma eficiente, ya que al caer de forma vertical, gira a gran velocidad, este proceso lo lleva a cabo para poder esparcir sus semillas<sup>4</sup>, al intentar conocer el cómo esta flor, lleva a cabo este proceso, permitirá definir turbinas más aerodinámicas.

### 2.1 DELIMITACIÓN

Es sabido que los procesos más eficientes conocidos por el hombre, son los desarrollados por la naturaleza, por ello, es un gran reto tratar de imitar aun el comportamiento de una pequeña flor, esta investigación desarrollada en pregrado,

---

<sup>4</sup> ROSEN, A y SETER, D. Vertical autorotation of a single winged samara. Transactions of the ASME, Vol. 58, 1991, pp. 1064-1070.

hace uso óptimo tanto de recursos, como de conocimientos, para obtener una geometría aerodinámica que cumpla con los objetivos de este proyecto, y que tal vez a futuro, permita estudios mucho más complejos que optimicen los procesos de captación de energía y propulsión.

## **2.2. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN**

Desde que se originó la vida, está ha luchado contra las adversidades de los fenómenos físicos para hacerle frente a la extinción, por ello cada ley física a la que se enfrenta la raza humana, ya ha sido estudiada y encarada por la naturaleza.

Al basar los diseños aerodinámicos de los aerogeneradores en técnicas de biomimetismo, el ser humano podría hacer uso de millones y millones de años de prueba y error. Y al complementar con técnicas de CFD el trabajo desarrollado por la naturaleza, se podría conseguir mejores resultados en la obtención de energía eléctrica, y a la vez mitigar el impacto ambiental. Estas técnicas consisten en el empleo de computadores y técnicas numéricas para resolver problemas físicos relacionados con el movimiento de fluidos<sup>5</sup>.

Por medio de esta investigación se desea contribuir al conocimiento científico y desarrollo tecnológico, de una forma amigable con las demás formas de vida del planeta.

---

<sup>5</sup> ORO, Jesús. Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos. Reverté, 2012.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 MARCO REFERENCIAL

La gran mayoría de los problemas a los que se enfrentan los seres humanos como especie, ya han sido abordados e inclusive solucionados por la naturaleza, esta es una diseñadora imponente, que prácticamente ha prosperado y dominado sobre todos los fenómenos y fuerzas existentes en el planeta tierra.

Los primeros científicos del mundo simplemente se dedicaron a observar la naturaleza, y se podría decir que muchas de las grandes invenciones humanas han sido inspiradas en técnicas de biomímesis, tal fue el caso Leonardo DaVinci, quien construyó maquinas voladoras estudiando la anatomía de los pájaros, describiéndolas en su libro "Código del Vuelo de las Aves"<sup>6</sup>. Así que cada vez que el ser humano comprende el funcionamiento de la naturaleza, adquiere millones de años de experiencia evolutiva.

Ahora estas técnicas son consideradas una ciencia, la cual puede recibir distintos nombres, ya sea biomimetismo, biomímesis o biomimética; y lo que busca es diseñar bajo la norma básica de la naturaleza, teniendo como principio fundamental el equilibrio. Así que, si se desea enfrentar un problema físico, químico o biológico, primeramente, se debe observar como la naturaleza lo afrontó.

Según el Dr. Eduardo Alfredo Favret, "La naturaleza puede ser considerada como un centro de entrenamiento para ingenieros y científicos que buscan innovaciones tecnológicas. Ella ha desarrollado numerosos y cuasi-perfectos materiales, procesos y sistemas a nano, micro y macro-escalas después de miles de millones de años de existencia"<sup>7</sup>; Por tal motivo se decidió basar esta tesis en el estudio de las flores del árbol *Petrea Volubilis*, y su capacidad de generar energía eléctrica.

---

<sup>6</sup> DAVINCI, Leonardo. Código del Vuelo de las Aves. Italia: 1505-1506.

<sup>7</sup> FAVRET, Eduardo. Biomimética tecnología inspirada en la naturaleza. Buenos Aires. Instituto de Suelos, 2016, p.1.

### 3.2 ANTECEDENTES

A pesar de que el árbol *Petrea Volubilis*, recibió parte de su nombre gracias al giro que realiza su flor al caer, existe poca información de proyectos sobre este arbusto, en el estado del arte previo a desarrollar este proyecto, se determinó, que en el mercado colombiano y en los repositorios académicos, solo se ha desarrollado un turbina eólica en base a esta flor, con fines para bombeo de agua, este proyecto fue desarrollado en el 2010, por Castañeda Vergara<sup>8</sup>, en su tesis titulada “Diseño y Construcción de un Sistema Eólico para Bombeo basado en un Rotor Bioinspirado.”, nombrándola como rotor eólico UN-V1. Esta tesis comprobó que si es posible usar este rotor dentro de una aplicación de bombeo.

Por el momento se han desarrollado más investigaciones, todas estas en base al rotor eólico UN-V1, estas investigaciones realizadas para optar títulos académicos, buscaban principalmente analizar y optimizar con técnicas CFD el funcionamiento de la turbina como tal, tal es el caso de la tesis titulada “Validación del Comportamiento de un Rotor Eólico Biomimético Mediante un Modelo Supervisado en CFD”.<sup>9</sup>

Al poseer investigaciones previas sobre esta flor, es posible encaminar la investigación de este proyecto, hacia aspectos poco estudiados de esta flor, y enfocando el proyecto a la obtención de una metodología de modelamiento de la flor, que a futuro permita optimizar más la geometría, tal y como se ha hecho en estas dos tesis de maestría citadas anteriormente.

---

<sup>8</sup> CASTAÑEDA, David. Diseño y Construcción de un Sistema Eólico para Bombeo Basado en un Rotor Bioinspirado. Tesis maestría en ingeniería mecánica. Colombia: Universidad Nacional de Colombia. 2010.

<sup>9</sup> GAITAN, Jorge. Validación del comportamiento de un rotor eólico biomimético mediante un modelo Supervisado en CFD. Tesis Magister en Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Colombia. 2017

Es de suma importancia desarrollar aerogeneradores de menor tamaño que sean asequibles para la población, que permitan suplir parte de la demanda energética de los hogares sin las graves implicaciones sociales y ambientales que generan las energías no renovables. Se espera poder replicar la geométrica que presentan estas flores, para así poder aplicar estos conocimientos tanto en la turbina creada en este proyecto, como posibles mejoras en turbinas ya existentes.

Obtener la curva de funcionamiento como tal de la turbina diseñada, no es un objetivo que se consigue con el desarrollo de esta tesis, este proceso puede ser llevado a cabo en investigaciones futuras, esto debido a que conseguir esta curva no es un proceso sencillo y se debe llevar a cabo una vez el proyecto escale, tal y como lo hizo el proyecto del rotor eólico un-v1 con una nueva tesis titulada "obtención de la curva representativa  $c_p$  vs  $\lambda$  del rotor eólico un-v1 por métodos experimentales."<sup>10</sup>

No se poseen comercialmente aerogeneradores en base a la planta *Pétrea volubilis*. Aun así se comercializan pequeños aerogeneradores de eje horizontal, pero estos presentan grandes costos, tanto de fabricación como de Comercialización.

---

<sup>10</sup> Rodríguez, Daniel, et al. obtención de la curva representativa  $c_p$  vs  $\lambda$  del rotor eólico un-v1 por métodos experimentales. Tesis Ingeniero aeronáutico. Universidad de san buenaventura. 2019

## 4. METODOLOGÍA

El principal inconveniente al tratar de replicar un proceso, una geometría o un fenómeno de la naturaleza, es la medición de las variables y procesamiento de datos, aunque actualmente se dispone de tecnologías simples y relativamente económicas, que permiten llevar a cabo estas investigaciones, a veces es casi imposible entender como la naturaleza hace lo que hace, aun así, el ser humano posee una gran capacidad de replicar procesos, aunque siempre de manera paulatina y creciente.

### 4.1 FASES DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación presentada en este documento, se llevó a cabo en las siguientes fases:

- **Fase de identificación de variables.**

En esta fase, se realizó un análisis visual, acompañado de una prueba de comportamiento de la flor, simplemente dejándolas caer desde una altura superior a un metro, esta fase fue completamente visual y se determinó al deformar la flor las variables que afectan en su desempeño y estas se comparten en el siguiente capítulo.

- **Fase de recolección de muestras.**

Aquí se planteó y se ejecutó un experimento de selección, tanto del árbol del cual se recolecto las muestras, como las muestras en sí, garantizando, que con la capacidad de tiempo, equipo de cómputo y conocimiento adquirido en el programa de ingeniería mecánica, se pudieran obtener datos certeros de las variables a medir.

- **Fase de medición de variables.**

Al ser flores de diámetro inferior a los 4 centímetros, el proceso de medición de estas variables podría ser algo complicado, si se realiza de forma manual con una regla y un compás, esto es debido a la baja precisión de estos instrumentos; otro

factor que agudiza el proceso, es la compleja geometría de la flor, por tal motivo se optó por capturar estas variables en fotos, que con un marco de referencia permitió obtener valores precisos y confiables, para garantizar la homogeneidad de las fotos y su calidad, se construyó un pequeño banco de pruebas que se describe en el siguiente capítulo.

Estas imágenes se insertaron en el software Solidworks, el cual permitió su medición.

- **Fase de estudio de variables.**

Una vez se logró medir las variables, se procedió con el análisis de estos datos, se optó por realizar varias mediciones del mismo parámetro en distintas flores y pétalos para luego promediarlos, se decidió que los datos obtenidos se trataran de esta forma, ya que la naturaleza no es estándar y prueba distintos valores de estas variables, como se evidencio en este estudio. Aun así se logró identificar puntos de inflexión de estas variables.

- **Fase de creación modelo 3D.**

Cabe aclarar que el proceso de molado de la turbina, se basa en un estudio de las propiedades de la flor, pero aun así, no se pierde la autonomía del diseñador de proponer cambios y mejoras en esta geometría. El proceso de modelado se llevó a cabo con el software Solidworks. El proceso de modelado se realizó a la par de los análisis CFD, de la siguiente fase.

- **Fase Análisis CFD de los modelos 3D**

Como se mencionó, esta fase y la fase anterior se realizaron casi de manera simultánea, una determinaba la otra. En cuanto al análisis aerodinámico CFD se realizó con el programa Solidworks Flow Simulation y se realizaron suficientes análisis para observar cómo estas variables afectaban la aerodinámica de la flor. Una vez identificado todos los valores óptimos de estas variables, se procedió a crear una geometría estándar de turbina.

- **Fase modelo final.**

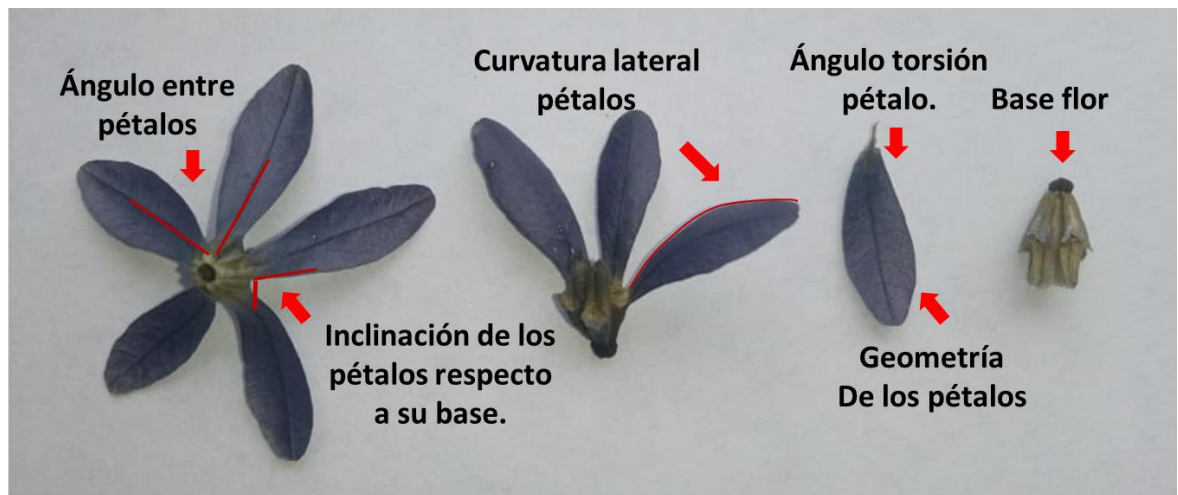
El modelo final se construyó paulatinamente, al mejorar cada una de las variables, este modelo estándar obtenido, es la base para futuras investigaciones, en esta fase se determinó una escala de la turbina, y se instauró algunos parámetros de su funcionamiento.

- **Fase construcción de la turbina y pruebas físicas.**

Con ayuda de una impresora 3D, se logró construir modelos funcionales que permitieron medir en físico las Rpm alcanzadas por el rotor en condiciones establecidas.

#### 4.2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES.

Figura 4. Variables geométricas a determinar de la flor.



Fuente: Autor.

Con las variables identificadas en la imagen anterior, se puede construir un modelo 3D de cualquier flor del árbol *Pétrea Volubilis*. A pesar de que el espesor de las flores influye en su capacidad de rotación, ya que un mayor espesor implicaría un mayor peso; este factor por sí solo, no permite la auto rotación de las flores, de ser así, todas las flores presenten en la naturaleza lo harían, por tal motivo se dejó este

factor en función entre la rigidez y el porcentaje de precisión del método de manufactura.

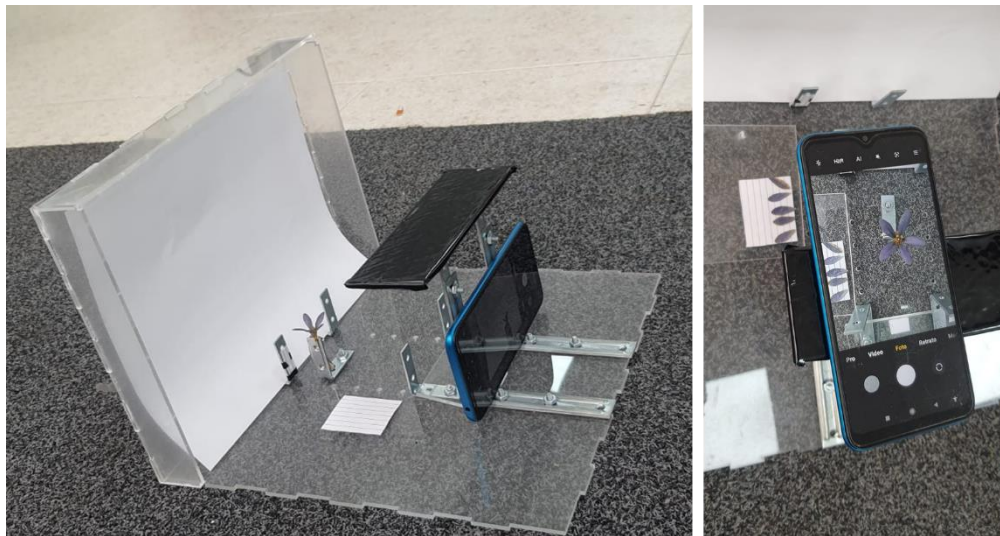
Por consiguientes las variables que se analizaran en este estudio son.

- Ángulo entre pétalos.
- Ángulo de inclinación de los pétalos respecto a su base.
- Curvatura lateral de los pétalos.
- Geometría vista superior de los pétalos.
- Geometría base flor.
- Ángulo de torsión de los pétalos.

#### 4.3 MEDICIÓN DE VARIABLES

En esta sección se procedió a medir las propiedades físicas de las flores, para ello, se creó un banco de pruebas elaborado con acrílico y ángulos metálicos, el cual permite obtener fotos de las diferentes vistas, garantizado la calidad de las imágenes; además, para obtener un modelo 3D acertado, se usó papel con cuadrícula como guía de dimensionamiento.

Figura 5. Banco de pruebas para toma de fotografías de la geometría de la flor.



Fuente: Autor.

El banco de pruebas permite ubicar imanes en los ángulos metálicos, lo cual permite la sujeción de las flores, ya que al interior de estas, se introduce una aguja metálica de máquina de coser, que se adhiere fácilmente al ángulo previamente magnetizado. Al sujetar las flores de esta forma, se garantiza la integridad física de las muestras.

Figura 6. Forma de sujeción del pétalo al banco de pruebas.



Fuente: Autor.

El banco de pruebas usa la técnica de fondo infinito, la cual elimina las distracciones y concentra la atención en las características de la flor, permitiendo que aun con un celular se capte adecuadamente la geometría, esta técnica se logra usando una hoja blanca tal y como se aprecia en la siguiente imagen.

Figura 7. Toma de fotos con técnica de fondo infinito.



Fuente: Autor.

El banco de pruebas permite medir con bajo margen de error las longitudes, ángulos y formas de la flor. La única variable que no se logró medir con este banco es el ángulo de torsión que presentan los pétalos, por tal motivo el estudio de esta variable queda al criterio del diseñador.

Para medir cada uno de estos parámetros se desarrolló un experimento de selección que se presenta a continuación.

#### **4.4 EXPERIMENTO DE SELECCIÓN DE UN ÚNICO ÁRBOL.**

Aunque se encontró una flor de 4 pétalos y una de 6 pétalos, momentos previos a realizar la selección de la muestra para el análisis, este estudio se concentrará en las flores con 5 pétalos, ya que este tipo de anomalía genética es muy rara, aun así, es posible que para investigaciones futuras, si se consideren estas flores anómalas. El proceso inicial para seleccionar el árbol del cual se tomaron las muestras, se realizó recolectando 50 flores de 5 árboles distintos, ubicados en el departamento de Santander, cabe aclarar que estas flores solo se les realizó un análisis visual y

de caída libre, se intentó que los arboles seleccionados tuvieran muestras aceptables, ya que algunos de estos árboles presentes en ciudad poseían flores muy deterioradas o demasiado pequeñas, se cree que estos drásticos cambios morfológicos, se deben a factores medioambientales y genéticos, los cuales no se profundizan en esta investigación. Los información de los arboles seleccionados se profundiza en la siguiente tabla.

Tabla 1. Experimento de selección de un árbol de *Pétrea Volubilis*.

<b>NOMBRE EXPERIMENTO:</b> Recolección de muestras para selección de un único árbol de <i>Pétrea Volubilis</i>		<b>PROCEDIMIENTO:</b> Se recolectarán 50 flores de 5 árboles distintos, ubicados en el departamento de Santander.		
<b>TIPO DE RECOLECCIÓN:</b> Aleatoria, se recolectaron 10 muestras por árbol.				
ÁRBOL	UBICACIÓN	# MUESTRAS	COLOR DE LA MUESTRA	
A	BOMBA GASOLINA CARACOLI	DE C.C	10	MORADO
B	UIS		10	MORADO-CAFE
C	UIS		10	CAFE
D	CIUDAD VALENCIA		10	CAFE
E	CONJUNTO EL BOSQUE SECTOR A		10	CAFE

Fuente: Autor.

Figura 8. Muestras recolectadas



Fuente: Autor.

El color de las flores no afecta de manera directa la capacidad de auto rotación de las muestras, pero si nos proporciona la información de que estas poseen menos cantidad de agua, lo que se traduce en un mayor tiempo desde su floración.

A continuación, se presenta evidencia fotográfica de estas muestras:

Figura 9. Primeras flores recolectadas.



Fuente: Autor.

Para agrupar la información recolectada, en el análisis visual, se construye la tabla 2, en esta, se especifican las razones de selección del **Árbol A**.

Tabla 2. Características de las muestras de flores recolectadas.

		CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA			
ÁRBOL	UBICACIÓN	TAMAÑO	CALIDAD	UNIFORMIDAD	TOTAL
<b>A</b>	BOMBA DE GASOLINA C.C CARACOLI	5	5	5	15
<b>B</b>	UIS	3	4	3	10
<b>C</b>	UIS	4	3	3	10
<b>D</b>	CIUDAD VALENCIA	1	3	4	8
<b>E</b>	CONJUNTO EL BOSQUE SECTOR A	2	2	4	8

NOTA: El máximo valor posible para cada característica es 5 y el menor es 1.

Fuente: Autor.

Como se pudo observar, se seleccionó el **árbol A**, ya que las muestras obtenidas presentaban un mayor tamaño, una mayor calidad de sus pétalos y a una mayor uniformidad. El árbol A, también será llamado **árbol 1** en esta investigación.

**Nota:** No se pretende afirmar que entre más grande sea la flor, sus propiedades aerodinámicas serán mejor, pero se califica con 5 el mayor tamaño, ya que este facilita el modelamiento.

Figura 10. Muestra del árbol A.



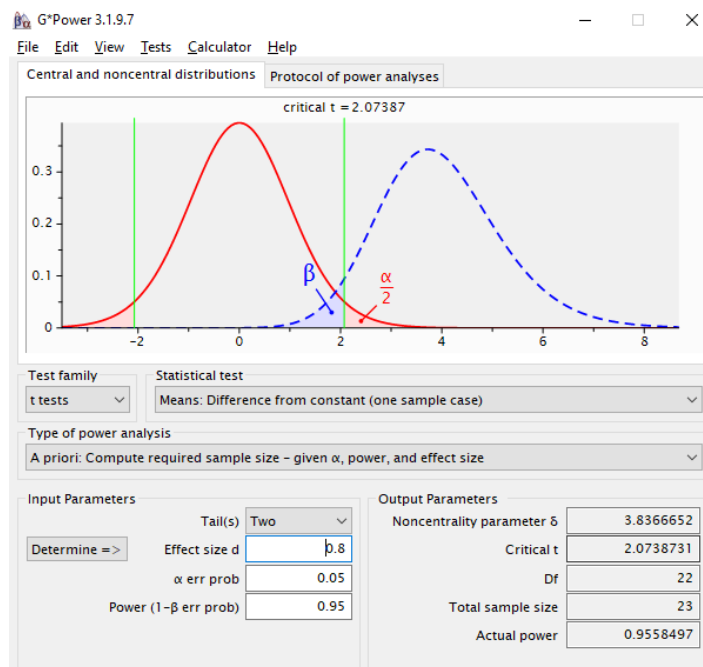
Fuente: Autor.

Una vez seleccionado el árbol, se procedió a definir un número finito de muestras, a obtener de él. Esta información se presenta a continuación.

#### 4.4.1 Selección de muestra.

Para seleccionar una cantidad de muestras aceptable, se usó el software libre g\*power versión 3.1.9.6, se aplicó un modelo de prueba tipo t, ya que se esperaba conocer con un nivel de 0.05 la diferencia entre los pétalos, además estas muestras son aleatorias e independientes, se usa un tamaño de efecto largo de 0.8 ya que se espera que la variación de estos ángulos sea una variable primordial en el desempeño aerodinámico de las flores.

Figura 11. Cálculo de tamaño de la muestra en el programa G-Power



Autor: Universität Düsseldorf.<sup>11</sup>

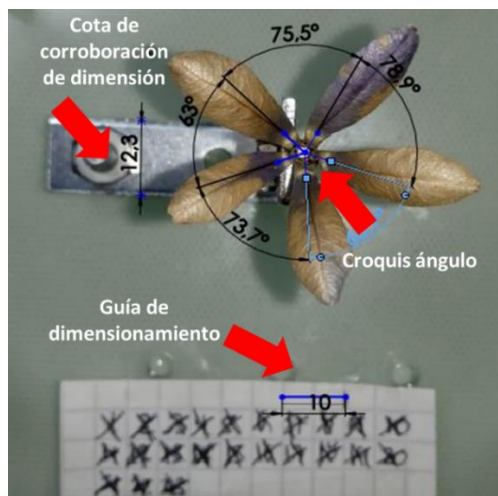
Por consiguiente se determinó que el análisis experimental se llevara a cabo a 23 flores.

<sup>11</sup> UNIVERSITÄT DÜSSELDORF: G\*Power [Anónimo]. Universität Düsseldorf: Psychologie [página web]. [Consultado el 2, mayo, 2023]. Disponible en Internet: <https://www.psychologie.hhu.de/arbeitsgruppen/allgemeine-psychologie-und-arbeitspsychologie/gpower.html>.

#### 4.5 MEDICIÓN DE ÁNGULOS ENTRE LOS PÉTALOS.

Para determinar el ángulo de separación entre cada uno los pétalos de las 23 flores, se procedió a tomar las fotos de la vista superior de cada una de ellas. Una vez obtenidas, se dispuso con ayuda del software Solidworks<sup>12</sup> demarcar los ángulos entre cada uno de los pétalos, para ello se exportaron las imágenes de la vista superior tomadas y el proceso se detalla a continuación: Primeramente se creó un croquis de una línea horizontal acotada en 10 mm, que permite con ayuda de la referencia (Hoja con cuadrícula o guía de dimensionamiento), adecuar el tamaño la imagen, para que esta guía coincida con la línea de 10mm, la ruta para insertar la imagen en el software es “Herramientas/ Herramientas de coquizar/ Imagen de croquis y se selecciona la imagen”. Al acotar el ancho del ángulo metálico se comprueba de que la imagen posee dimensiones reales. La siguiente imagen detalla en esta información.

Figura 12. Proceso de medición de Ángulos entre pétalos



Fuente: Autor.

Fue necesario crear un croquis extra llamado croquis de ángulo, que permitió medir el ángulo en la base de la flor, ya que los ángulos son distintos en la punta exterior del pétalo debido a la curvatura presente.

<sup>12</sup> SOFTWARE DE diseño CAD 3D | SOLIDWORKS [Anónimo]. SOLIDWORKS [página web]. [Consultado el 1, marzo, 2023]. Disponible en Internet: <https://www.solidworks.com/es>.

En los documentos anexos se incluyen las fotografías y los archivos CAD donde se realizó este proceso.

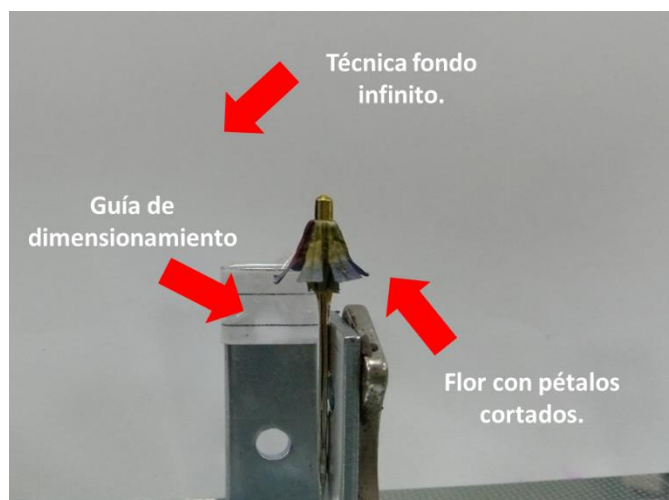
#### **4.6 MEDICIÓN DE ÁNGULOS DE INCLINACIÓN DE LOS PÉTALOS.**

Para llevar a cabo este análisis, es necesario la destrucción de los pétalos, ya que la curvatura pronunciada de estos, afecta la visibilidad de este ángulo, por tal motivo para este análisis solo se usaron 5 flores de las 23 recolectadas, se seleccionaron al azar las flores número 4,7,16,19,20.

El proceso de medición del ángulo de inclinación de los pétalos se llevó a cabo con el software Solidworks y la opción de este de incluir Imágenes en un croquis; para tener una medida acertada el banco de pruebas cuenta con una marca de 5mm que se usa como base para ajustar el tamaño de la imagen a un valor real, tanto el registro fotográfico como los archivos tipo .sldprt se encuentran en la sección de anexos.

Para este análisis se procedió a cortar los pétalos hasta la parte recta de estos que los une con el tallo, tal y como se aprecia en la siguiente imagen.

Figura 13. Proceso de toma de fotos para análisis de inclinación de los pétalos.

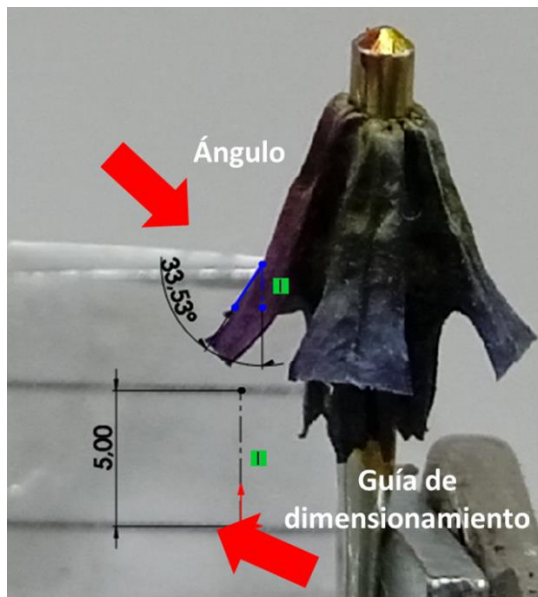


Fuente: Autor.

Se colocó una marca en el pétalo número 1 y se giraba la flor de manera anti horaria teniendo como guía este pétalo para la toma de las fotos, cabe aclarar que para este análisis no se tuvo en cuenta las secuencias de la flores encontradas en el apartado de los ángulo entre pétalos, ya que se quiere conocer únicamente el intervalo óptimo de apertura y cierre de las flores; Se conoce que este puede depender de la cantidad de agua presente en a flor y del tiempo transcurrido desde su floración, aun así se espera encontrar el intervalo optimo, y un ángulo fijo para el modelo estático de la turbina, en el cual se basa esta investigación, se espera que para investigaciones futuras se pueda variar este ángulo de inclinación de los pétalos con la horizontal.

El proceso para medir estos ángulos es el mismo que se desarrolla para introducir una imagen de croquis en Solidworks, Se inicia un croquis, se crea una línea vertical con 5 mm de longitud, luego en la opción Herramientas/Herramientas de coquizar/Imagen de croquis, y se inserta, se acota a la medida de la línea recta de 5mm la marca de guía dimensionamiento presente en el banco, y luego se procede a medir este ángulo.

Figura 14. Proceso de medición ángulo del pétalo respecto a su base.



Fuente: Autor.

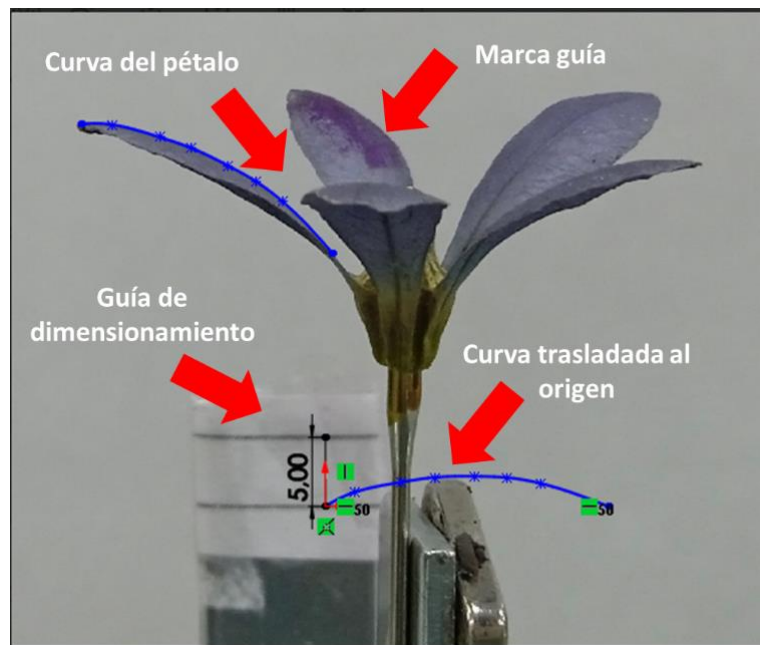
La información y archivos anexos referentes a este proceso se encuentran en el anexo: **ÁNGULOS DE INCLINACIÓN DE LOS PÉTALOS.**

#### **4.7 MEDICIÓN DE LA CURVA LATERAL DE LOS PÉTALOS**

Para llevar a cabo este análisis se seleccionó 5 flores aleatoriamente, las flores seleccionadas fueron 2, 5, 14,15 y 22. El proceso se desarrolló de la misma forma que los análisis anteriores, tomando una foto de la vista lateral del pétalo con la ayuda del banco de pruebas y exportándola al software Solidworks. Se marcó el pétalo inicial de cada flor con un marcador color morado, para que en base a esta marca, girar la flor y no tomar fotos del mismo pétalo.

Para esta modelar esta curvatura, se procedió a usar la herramienta Spline, se replicó la curvatura del pétalo tal y como se observa en la siguiente imagen.

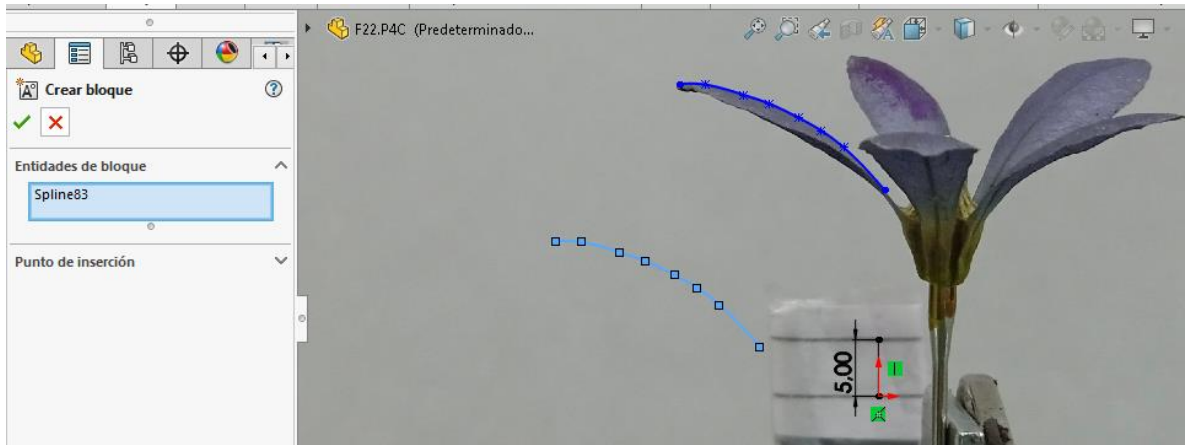
Figura 15. Curvatura lateral pétalos.



Fuente: Autor.

Una vez creada la Spline, se seleccionó y se creó un bloque para poder trasladarla al origen sin que pierda su geometría.

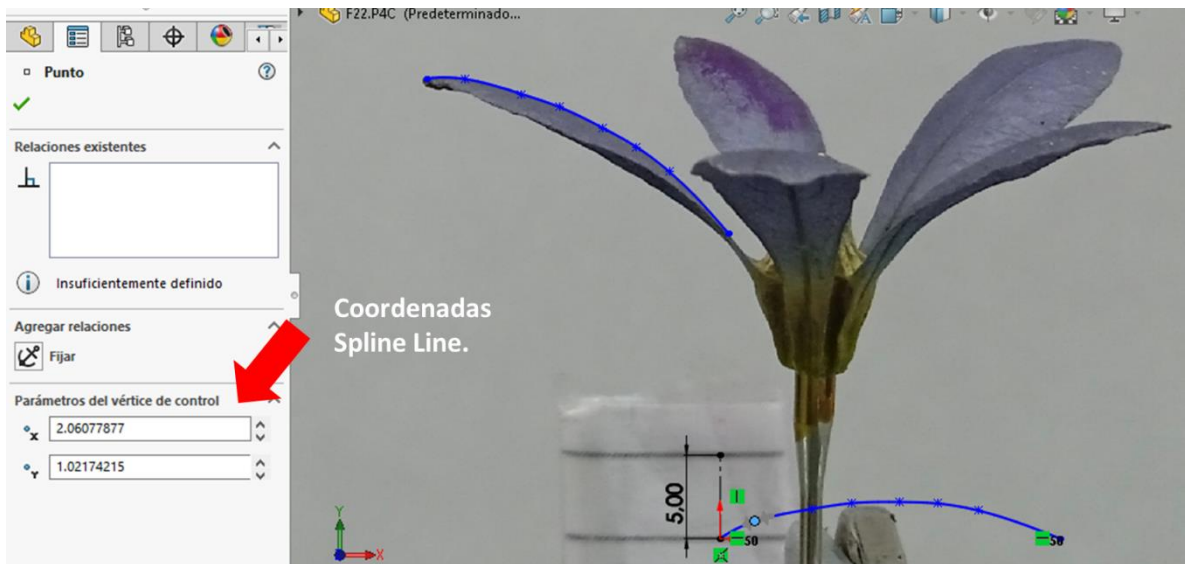
Figura 16. Proceso de trasladar curva lateral pétalo al origen.



Fuente: Autor.

Una vez allí, se desactivo el bloque, para poder obtener las coordenadas de cada uno de los puntos de la Spline, estos valores fueron exportados a Excel donde se reconstruyo la curva para su posterior análisis.

Figura 17. Proceso de obtención puntos de la Spline.



Fuente: Autor.

Una vez con estos puntos fue posible con ayuda del software Excel analizar los datos obtenidos, esta información se amplía en el siguiente capítulo.

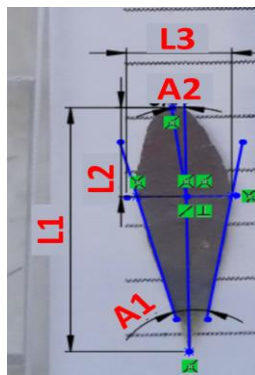
#### 4.8 MEDICIÓN DE LA GEOMETRÍA SUPERIOR DE LOS PÉTALOS

Para llevar a cabo este análisis se usaron las mismas flores del proceso de medición de curva lateral de los pétalos, las flores 2, 5, 14,15 y 22, ya que este análisis es destructivo y se buscó guardó la integridad de las demás flores restantes, por si se llegaba a presentar un inconveniente debido a pérdida o daño de alguna muestra.

El proceso consistió en retirar los pétalos de su base, y ubicarlos sobre el banco de pruebas, allí con ayuda de una lámina acrílica los pétalos se aplastaban y se tomaba una foto desde la vista superior. Sobre el banco de pruebas se ubicó una hoja guía que permite acotar la imagen a su tamaño real.

En la siguiente imagen se observa los parámetros que se midieron de esta geometría.

Figura 18. Parámetros medidos vista superior de los pétalos.



Fuente: Autor.

Los parámetros medidos se expresan a continuación:

- **L1:** Longitud total del pétalo, medida desde el punto exterior inferior hasta el punto exterior superior de la nervadura del pétalo.
- **L2:** Longitud del pétalo medida desde el punto exterior superior de la nervadura hasta donde concluye la parte recta del pétalo.
- **L3:** Ancho del pétalo medido en la zona donde concluye la parte recta del pétalo.
- **A1:** Ángulo medido en la parte recta del pétalo.
- **A2:** Ángulo entre la parte recta del pétalo y la recta resultante entre el punto exterior superior con el punto donde concluye la parte recta del pétalo.

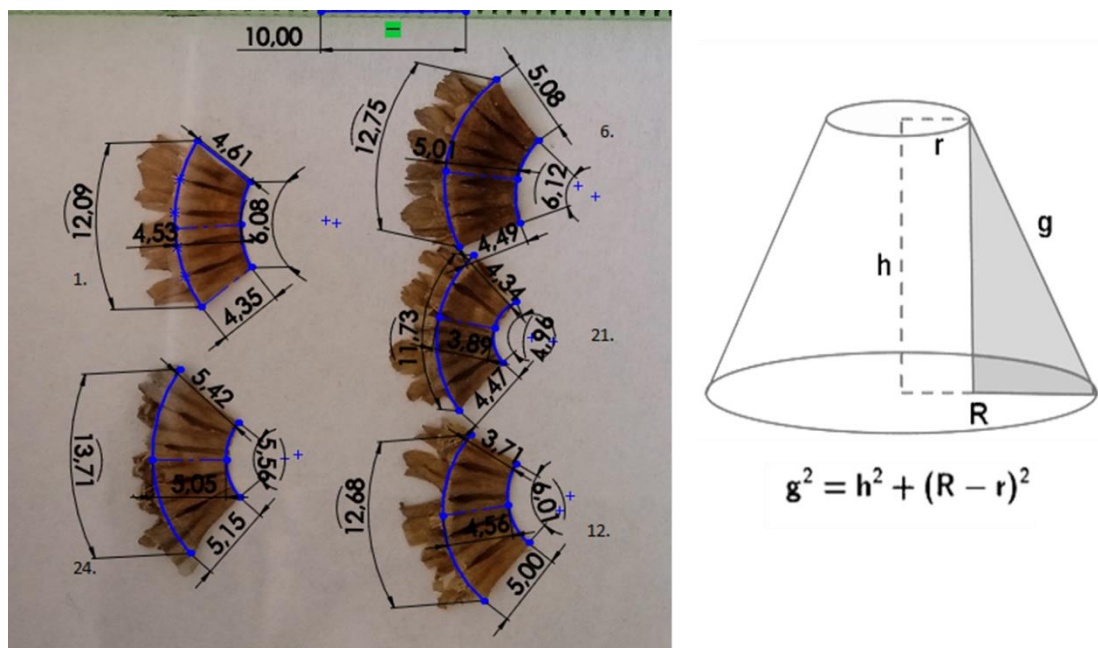
Una vez medido estos parámetros de las 25 flores, se procedió a calcular el promedio de cada uno de estos valores, para establecer una geometría estándar de la vista superior de los pétalos que se presenta en el siguiente capítulo de este documento.

#### 4.9 MEDICIÓN GEOMETRÍA BASE DE LA FLOR.

Para llevar a cabo este proceso, fue necesario retirar todos los pétalos. Las flores seleccionadas al azar fueron: 1, 6, 12, 21, y 24. Además se abrió esta base, y se descubrió que su geometría se comporta como un tronco de cono.

El proceso se llevó a cabo con ayuda del banco de pruebas y el software Solidworks tal y como los demás procesos, a continuación se presenta la imagen del proceso.

Figura 19. Proceso captura geometría base de las flores.



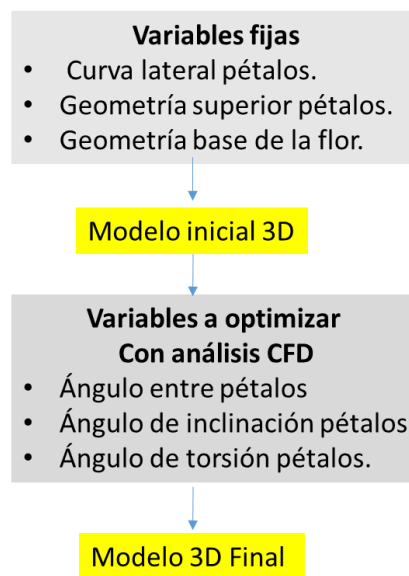
Fuente: Autor.

Se midió el radio inferior, el radio superior, y la distancia entre estos “h”; de esta se realizó tres mediciones y se promedió como uno solo por pétalo.

#### 4.10 MODELOS 3D INICIALES

Una vez se midieron todas las variables descritas anteriormente, se procedió a realizar el modelo 3D. El proceso de modelado se realizó con el software Solidworks, primeramente se llevó a cabo el modelado de los pétalos y la base, y luego se realizó el ensamble de estos. El modelamiento de los pétalos se describe en la sección de anexos, anexo B.

Figura 20. Proceso de modelado en función de las variables.



Fuente: Autor.

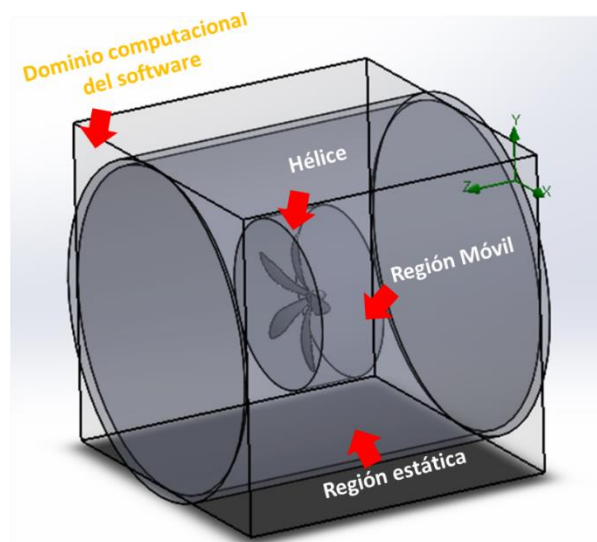
Los variables ángulos entre pétalos, inclinación de los pétalos y ángulo de torsión de los pétalos, no son variables que permiten construir la geometría de la flor como tal, sino que son variables de la configuración de los pétalos, que no se pueden estandarizar simplemente al promediar los datos obtenidos, como las demás variables. Y se analizó como estas variables afectan la aerodinámica de la flor, para ello se procedió a realizar análisis CFD, la metodología usada para estos análisis se describe en el siguiente apartado.

Se aclara que en la sección de resultados se encuentra la geometría final de la turbina, ya que esta se optimizó gracias a los análisis CFD.

#### 4.11 METODOLOGÍA CFD

SOLIDWORKS Flow Simulation<sup>13</sup>, es una herramienta que permite la simulación de flujo paramétrico general, utilizando el método Finite Volume Method FVM, para calcular el rendimiento a través de estudios hipotéticos, permitiendo llevar a cabo la optimización de un proceso a través de los resultados. Las simulaciones se definen para calcular el torque que genera la turbina; dentro de esta simulación se debe considerar el movimiento rotacional, por tal motivo se usó el método Sliding Mesh, este método permite dividir la malla es dos partes, una inmóvil y una móvil respecto al tiempo<sup>14</sup>. Estos mallados se realizan sobre dos volúmenes de control distintos, que son piezas cilíndricas. Con ellas se busca asemejar un túnel de viento (La parte fija) y la parte móvil se ajusta a la rotación de la turbina. Al usar esta técnica es posible realizar el análisis con la misma turbina, lo que garantiza que los datos obtenidos son más precisos que si simplemente se hiciera con simplificaciones matemáticas a la geometría de la turbina.

Figura 21. Región estática y región móvil de los análisis CFD.



Fuente: Autor.

<sup>13</sup> SOLIDWORKS FLOW Simulation [Anónimo]. SOLIDWORKS [página web]. [Consultado el 8, julio, 2023]. Disponible en Internet: <https://www.solidworks.com/es/product/solidworks-flow-simulation>.

<sup>14</sup> MOUSSA, Karim. Computational modeling of propeller noise. Tesis. University of Waterloo, 2014.

La región estática es principalmente para la circulación del fluido y la región rotacional es donde se encuentra el fluido con la turbina.

Las condiciones de mallado y volumen de control se especifican en cada uno de los grupos de análisis CFD.

#### 4.11.1 Primer grupo de análisis CFD

Estos análisis se llevaron a cabo, modificando en el modelo 3D inicial las siguientes variables:

- Ángulo entre los pétalos
- El ángulo de inclinación de los pétalos.

Se aclara que por cuestiones de estabilidad aerodinámica y facilidad en los cálculos la inclinación de los pétalos se tomó como igual en todos los pétalos.

Estos análisis se desarrollaron con el modelo tamaño real y con un espesor de del pétalo de 0.01 milímetros.

##### 4.11.1.1 Volumen de control

Como se mencionó el volumen de control está dado por dos regiones la estática y la rotativa, estos son cilindros cuyas dimensiones se muestran a continuación.

Tabla 3. Dimensiones volumen de control primer grupo de análisis CFD.

Volumen de control	Diámetro mm	Longitud mm	Operación vaciado mm
Estático	100	100	2
Rotacional	50	20	N/A

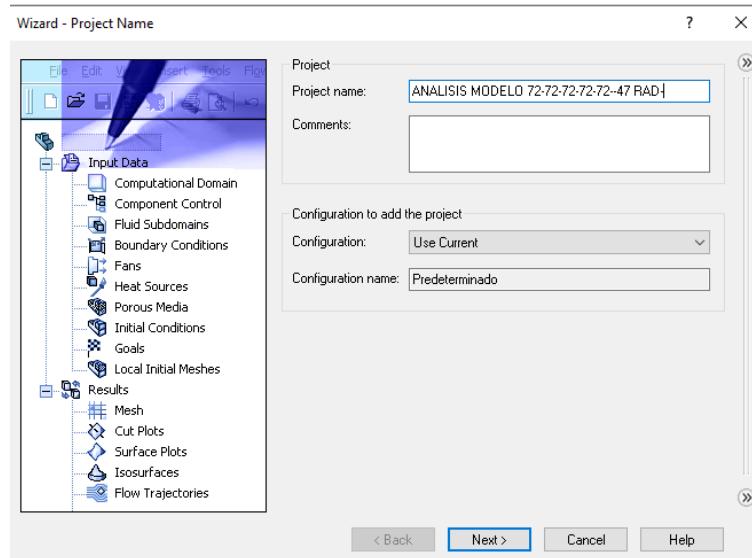
Fuente: Autor.

##### 4.11.1.2 Configuración análisis CFD Flow simulation.

Una vez establecidos el volumen de control se procedió a crear el análisis aerodinámico, una vez creado el proyecto en el software, se estableció los

parámetros iniciales del análisis, los cuales se presentan en la siguiente figura y tabla.

Figura 22. Crear nuevo proyecto en Flow Simulation.



Fuente: Autor.

Tabla 4. Parámetros iniciales del análisis CFD.

Sistema unidades	Unidad Longitud	Tipo de análisis	Parámetro adicional	Fluido	Velocidad eje Z	Sistema de coordenada
SI (m-kg-s)	mm	Interno	Rotación	Aire	8 m/s	Z

Fuente: Autor.

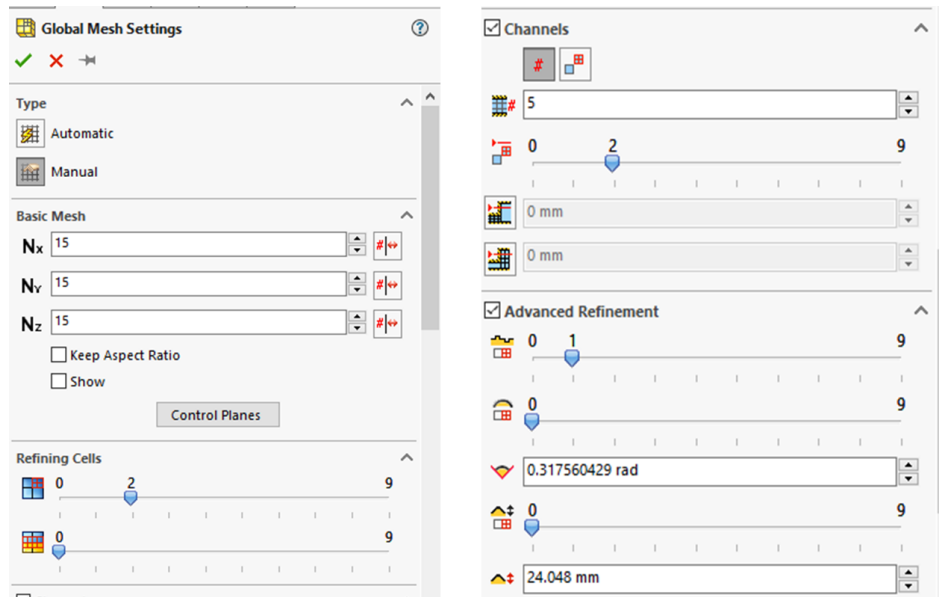
En el anexo C, se encuentra el paso a paso de cómo se desarrolló el análisis. La velocidad seleccionada para el análisis se obtuvo, ya que una de las aplicaciones prevista para este tipo de aerogenerador es en la parte baja de edificaciones, donde gracias al efecto de corriente descendente (Una forma del efecto Venturi), los vientos se intensifican, a pesar de que esto es visto como una grave problemática, ya que en algunos casos la velocidad de los vientos se intensifica a tal modo que pone en riesgo la vida de las personas, este fenómeno puede ser aprovechado para la obtención de energía eléctrica y llegado el caso para intentar frenar un poco estas

corrientes. Anqué no se encontró un estudio científico que estableciera un valor promedio de la velocidad de los vientos en los edificios, o como la altura y la forma incide, al leer el reportaje de la BBC sobre relacionado con este tema<sup>15</sup>. Además se usó el valor de 8m/s para el análisis aerodinámico. Ya que se determinó en investigaciones previas que el funcionamiento de este tipo de turbina comprende un rango entre 4 a 14 m/s<sup>16</sup>, lo que corrobora que el valor de 8 m/s es un valor adecuado para el análisis aerodinámico.

#### 4.11.1.3 Mallado

Como se comentó se procedió a realizar dos mallados, uno mallado general y un mallado específico en la móvil. A continuación se observa las especificaciones de estos.

Figura 23. Mallado general primer grupo de análisis CFD.

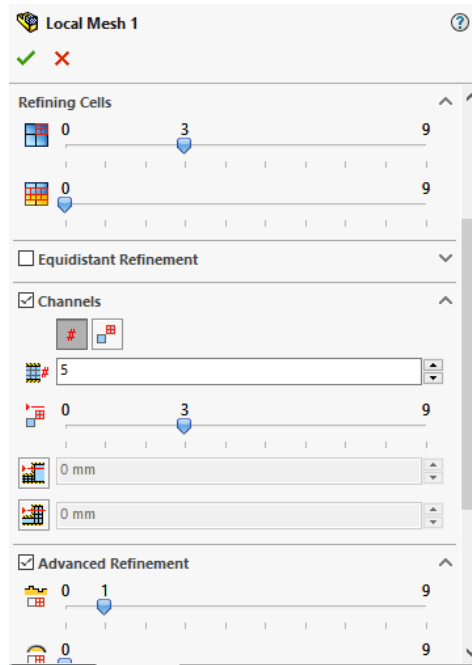


Fuente: Autor.

<sup>15</sup> BBC News Mundo. Por qué hay más viento en la base de los rascacielos y cómo reducirlo. BBC News Mundo [página web]. [Consultado el 2, mayo, 2023]. Disponible en Internet: <https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/07/15071>.

<sup>16</sup> GAITÁN, Op. cit., p. 31.

Figura 24. Mallado región móvil o rotatoria primer grupo de análisis CFD.



Fuente: Autor.

#### 4.11.1.4 Región rotativa.

Para llevar a cabo este análisis, es necesario definir la velocidad de rotación de la turbina y su sentido de giro, además al no conocer hacia donde giraría la turbina al colocar una corriente de aire en la dirección Z positivo, es necesario realizar el análisis aerodinámico dirección tanto en Z + como en Z-.

El valor de rotación usado es de  $47 \text{ rad/s}^{17}$ , esta magnitud se obtuvo de investigaciones previas, y se usa esta magnitud en dirección positiva y negativa.

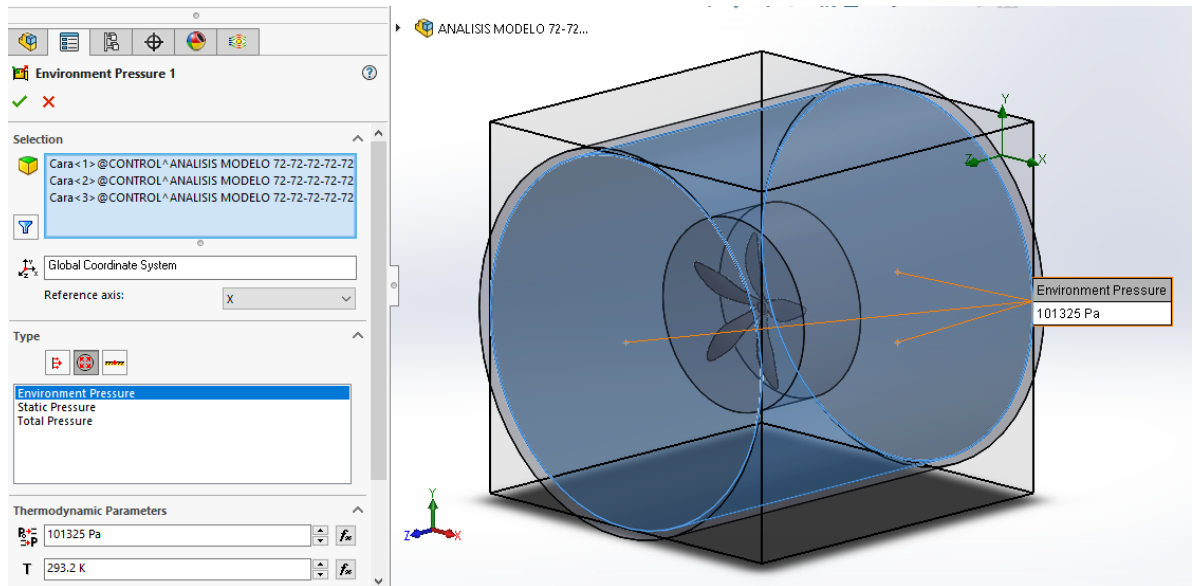
#### 4.11.1.5 Condiciones de contorno.

Se aplica presión atmosférica en las caras internas del volumen de control fijo, tal y como se aprecia en la siguiente imagen.

---

<sup>17</sup> GAITÁN, Op. cit., p. 31.

Figura 25. Condiciones de contorno primer grupo de análisis CFD.



Fuente: Autor.

#### 4.11.1.6 Goals.

Se calculó las siguientes magnitudes con el Software.

- Fuerza en Z
- Torque en z

#### 4.11.2 Segundo grupo de análisis CFD

Estos análisis se llevaron a cabo, una vez terminados los análisis del primer grupo, modificando en el modelo 3D resultante de estos análisis, la siguiente variable:

- Ángulo de torsión de los pétalos.

Para estos análisis también se realizaron modificaciones en cuando a la geometría, principalmente redondeos de operaciones, para mejorar la aerodinámica de los modelos.

El proceso de torsión se llevó a cabo en el pétalo, con la operación Flexionar, luego se seleccionó la opción torque y se varió el ángulo de torsión.

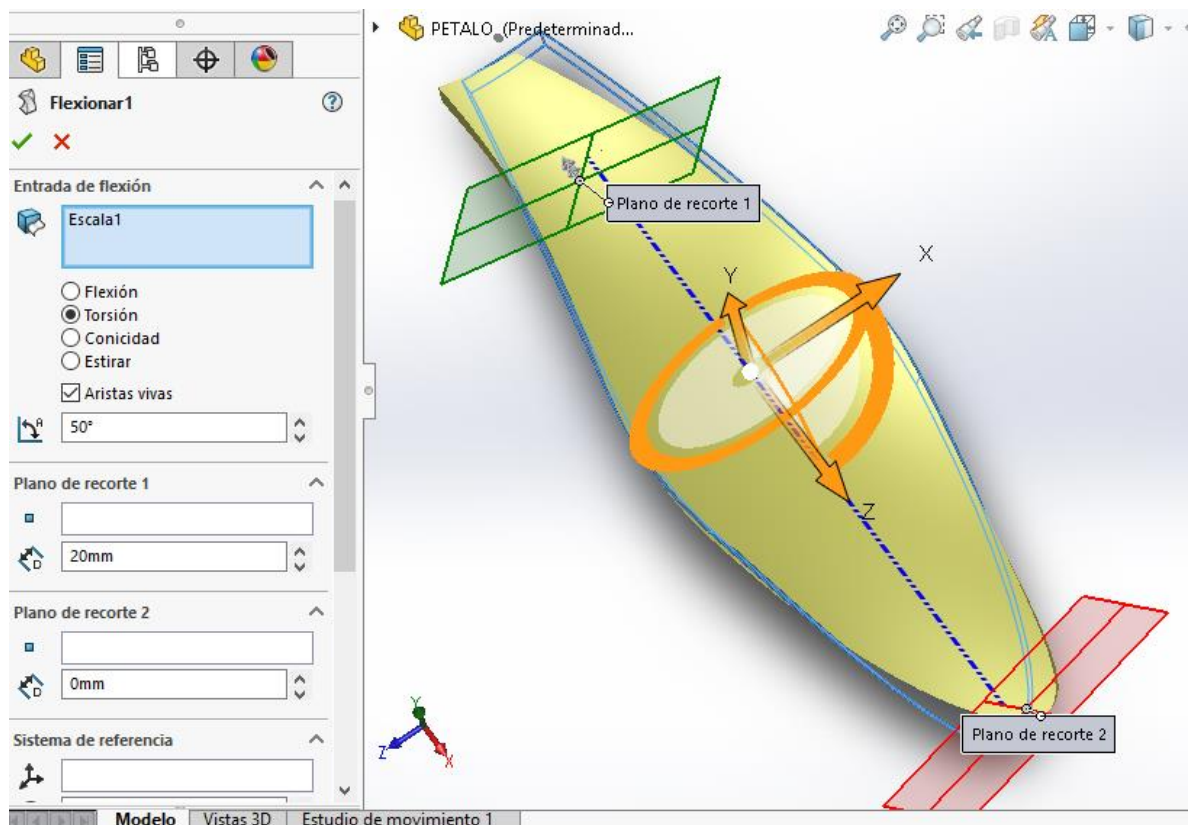
La distancia que se aplicó este torque es de 20 mm desde su base, y los ángulos a variar fueron: 0, 10, 20, 30, 40, 50,-10,-20,-30,-40,-50, estos valores fueron

propuestos por el autor, se conoce que los pétalos no poseen un ángulo de torsión como 50 grados, pero se buscaba comprobar el efecto de un ángulo de torsión del pétalo de esa magnitud.

Se sabe que al modificar este ángulo de torsión, el paso de la turbina aumenta o disminuye, un paso más grande significa más curvatura y potencialmente una velocidad máxima más alta, un paso más pequeño significa menos curvatura y por consiguiente más aceleración.<sup>18</sup>

A continuación se muestra el proceso de torsión de los pétalos.

Figura 26. Proceso de ángulo de torsión de un pétalo.

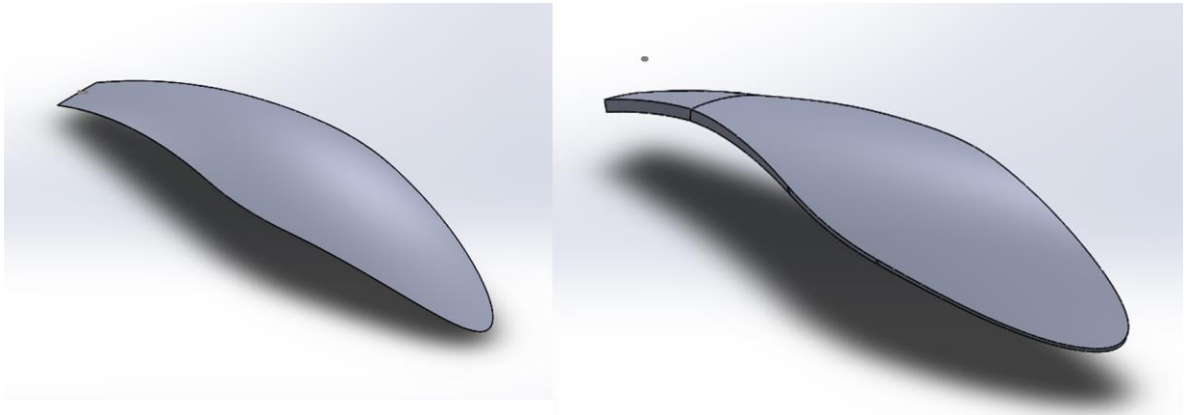


Fuente: Autor.

<sup>18</sup> HELICES NAUTICAS - ¿Qué turbina para mi barco? - Guía para turbinas [Anónimo]. Helices Nauticas [página web]. [Consultado el 1, junio, 2023]. Disponible en Internet: <https://www.helicesnauticas.es/>

Este segundo grupo de análisis se llevó cabo con una escala de 5, y un espesor de pétalos de 2 milímetros.

Figura 27. Pétalo sin y con ángulo de torsión.



Fuente autor.

#### 4.11.2.1 Volumen de control

Tabla 5. Dimensiones volumen de control segundo grupo de análisis CFD.

Volumen de control	Diámetro mm	Longitud mm	Operación vaciado mm
Estático	600	600	2
Rotacional	250	60	N/A

Fuente: Autor.

#### 4.11.2.2 Configuración análisis CFD Flow simulation.

Los parámetros iniciales del análisis, los cuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 6. Parámetros iniciales del análisis CFD.

Sistema unidades	Unidad Longitud	Tipo de análisis	Parámetro adicional	Fluido	Velocidad eje Z	Sistema de coordenada
SI (m-kg-s)	mm	Interno	Rotación	Aire	8 m/s	Z

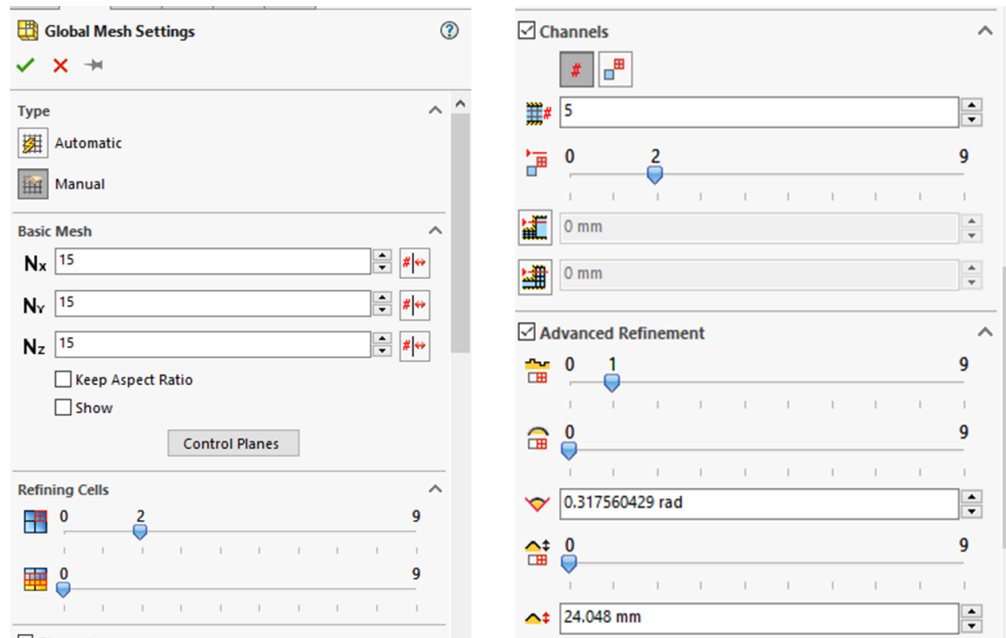
Fuente: Autor.

La velocidad seleccionada para el análisis es la misma que la del grupo anterior.

### 4.11.2.3 Mallado

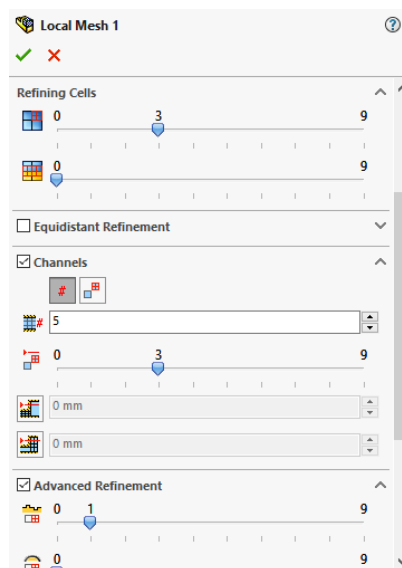
A continuación se presentan el mallado utilizado para estos análisis.

Figura 28. Mallado general segundo grupo de análisis CFD.



Fuente: Autor.

Figura 29. Mallado región móvil o rotatoria segundo grupo de análisis CFD.



Fuente: Autor.

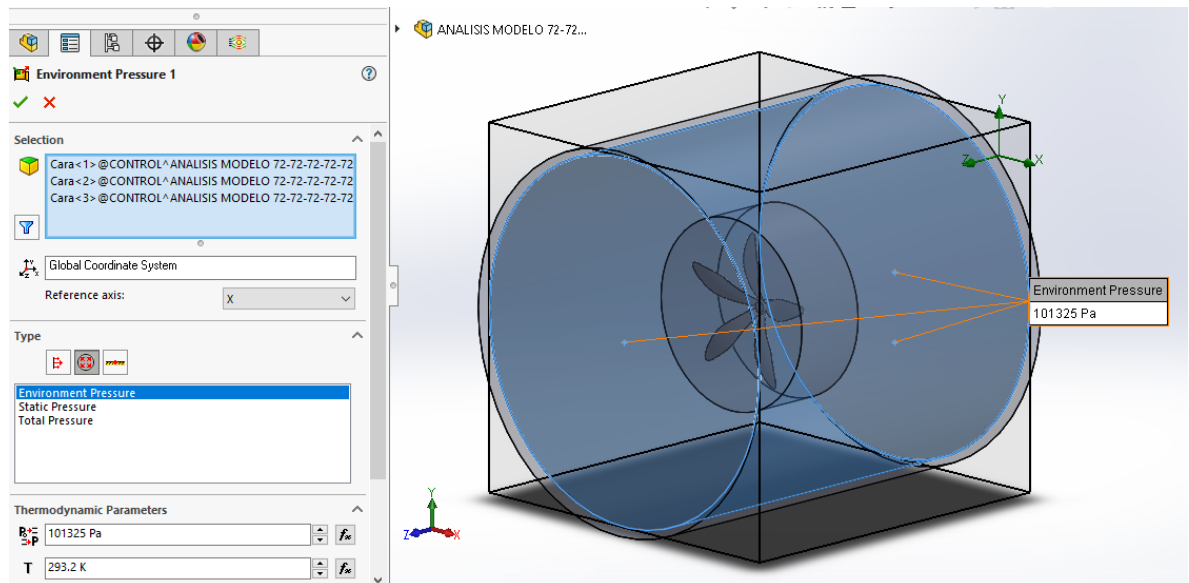
#### 4.11.2.4 Región rotativa.

Se usó el valor de 47 rad/s, tal y como se hizo con el otro grupo, tanto en su magnitud positiva como en su magnitud negativa.

#### 4.11.2.5 Condiciones de contorno.

Se aplica presión atmosférica en las caras internas del volumen de control fijo, tal y como se aprecia en la siguiente imagen.

Figura 30. Condiciones de contorno segundo grupo de análisis CFD.



Fuente: Autor.

#### 4.11.2.6 Goals.

El software nos permite calcular las siguientes magnitudes:

- Fuerza en Z
- Torque en z

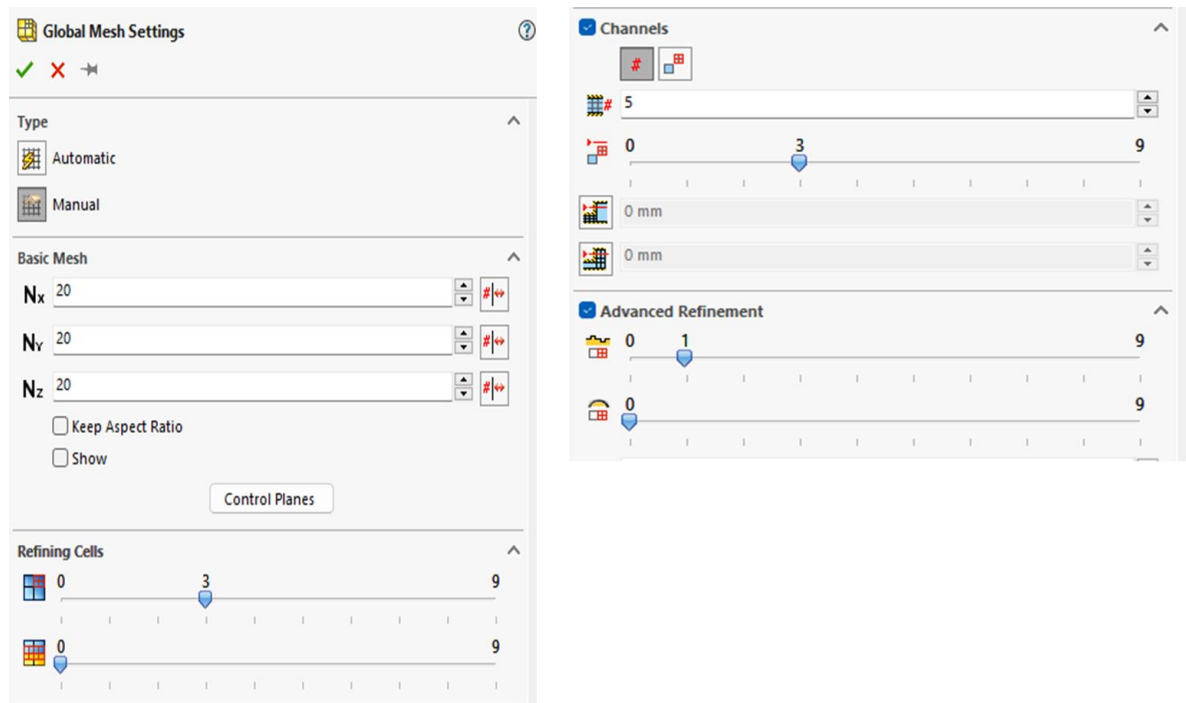
### 4.11.3 Análisis CFD tercer grupo.

Debido a la gran cantidad de análisis CFD para determinar el efecto de las variables sobre el modelo inicial, no era posible realizar un análisis usando más capacidad del equipo, ya que el tiempo que demorarían estos análisis sobrepasaría la capacidad del investigador, por tal motivo una vez estandarizada todas las variables, si es posible llevar a cabo un análisis CFD más preciso.

Una vez seleccionados los 3 modelos de comparación resultantes de los análisis CFD del segundo grupo, se procede a realizar un análisis más certero de los datos obtenidos, para ello se procedió a refinar el mallado, la nueva configuración del mallado se presenta a continuación.

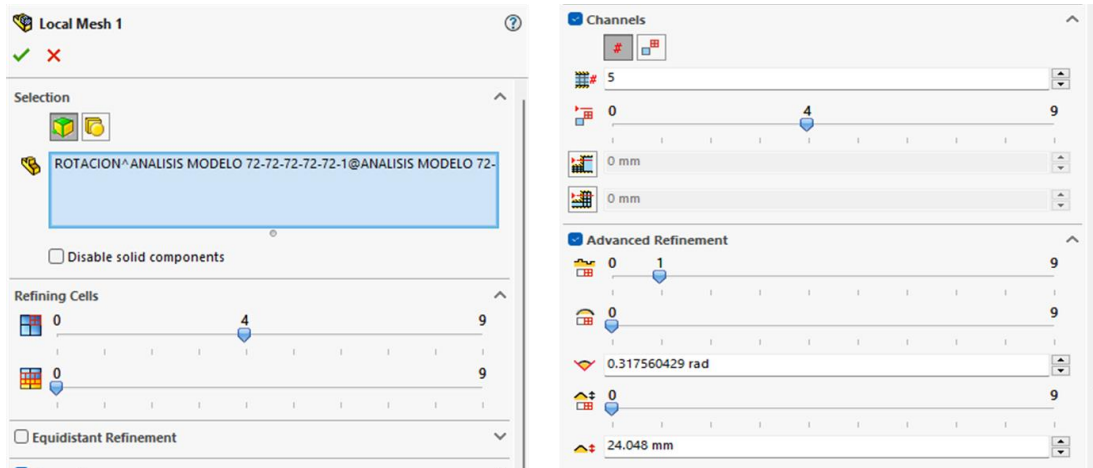
#### 4.11.3.1 Mallado

Figura 31. Mallado general tercer grupo de análisis CFD.



Fuente: Autor.

Figura 32. Mallado región móvil o rotatoria tercer grupo de análisis CFD.



Fuente: Autor.

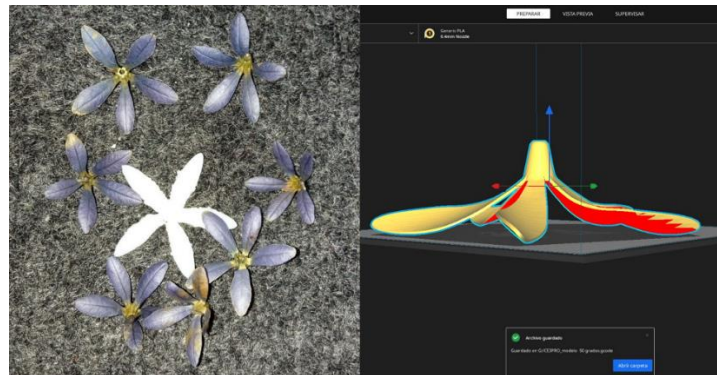
#### 4.11.3.2 Demás condiciones del análisis CFD

El volumen de control, los parámetros iniciales del análisis, la región rotativa, las condiciones de contorno y los goals, son los mismos que en el segundo grupo de análisis CFD, la única variación se presenta en el mallado.

#### 4.12 PROTOTIPO DE LA TURBINA Y PRUEBAS FÍSICAS.

Para el proceso de prototipo, una vez se diseñó la turbina y se optimizó algunos parámetros, se procedió con la ayuda de una impresora 3D a recrear el modelo físico, como material se usó PLA (Ácido poliláctico). Se seleccionó este material debido a que es resistente y liviano.

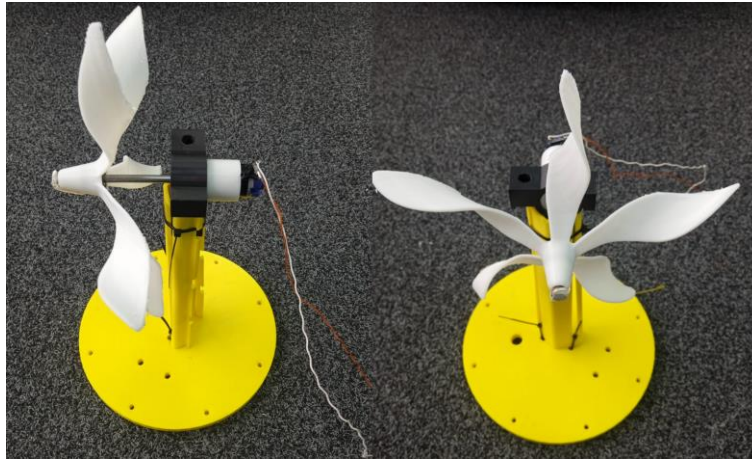
Figura 33. Turbina impresa tamaño flor.



Fuente: Autor.

#### 4.12.1 Soporte de la turbina.

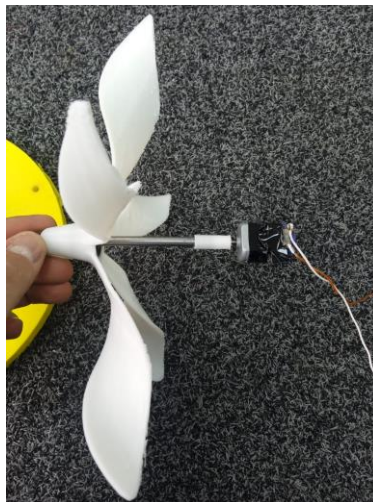
Figura 34. Foto soporte turbina.



Fuente: Autor.

La turbina es soportada por una estructura impresa en PLA, esta posee un compartimiento circular que permite el ensamblaje de la turbina, a un motor eléctrico que hace las funciones de generador, esto debido a que algunos motores eléctricos son reversibles<sup>19</sup>. Para el experimento se usó un motor eléctrico de 5 voltios. El acople de los ejes se realizó con una pieza impresa en PLA.

Figura 35. Acople motor turbina.



Fuente. Autor.

---

<sup>19</sup> MENDOZA, Gerardo. Motores Maquinas Eléctricas. Electrotecnia, 2012.

#### 4.12.2 Buje de la turbina.

Se seleccionó un rodamiento w625-2rs1, ya que este es un rodamiento rígido de una hilera de bolas de acero inoxidable, con sellos o placas de protección en ambos lados, además este posee baja fricción y están optimizados para un bajo nivel de ruido<sup>20</sup>, otro factor importante para su selección fue el diámetro del eje 5 mm y el diámetro exterior de 16mm que se adapta a la turbina de aproximadamente 20 cm de diámetro total.

A continuación se presenta el montaje de los rodamientos en el modelo.

Figura 36. Rodamiento seleccionado para modelos de prueba.



Fuente: Autor.

#### 4.12.3 Pruebas físicas.

Las pruebas físicas implementadas se desarrollaron para comprobar la efectividad de rotación de las turbinas seleccionadas en el tercer grupo de análisis CFD, al ubicarlas bajo una corriente de aire completamente horizontal.

---

<sup>20</sup> SKF. rolling-bearings. Consultado el 10, julio, 2023. Disponible en Internet: <https://www.skf.com/es/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-W%20625-2RS1>.

#### 4.12.3.1 Variables a medir.

Las variables medidas se presentan a continuación.

#### 4.12.3.2 Efectividad de rotación de los modelos.

Para llevar a cabo este experimento se procedió a usar un soplador de aire, cuyas especificaciones, son: Modelo BL600, 110V-60 HZ. 600W fuerza de soplado de 9200pa, flujo de aire 2.08m<sup>3</sup>/min de marca Bauker.

La prueba consistió en colocar los modelos resultantes del análisis del grupo 3 bajo este flujo a diferentes distancias, y observar si la turbina gira o no. La prueba consiste en comparar como afecta la torsión implementada sobre los pétalos en la aerodinámica y compararlo con los datos obtenidos en el software CFD.

Figura 37. Experimento de efectividad de rotación de la turbina.



Fuente: Autor.

Los resultados se presentan en la siguiente sección.

#### 4.12.3.3 RPM.

Para medir las rpm se procedió a estandarizar una distancia, desde la cual se procede a colocar el flujo de aire, y se miden las rpm producidas. Esta información se presenta en la tabla 25. RPM medidas turbinas con flujo a un metro de distancia.

Figura 38. Medición RPM tacómetro.



Fuente: Autor.

#### 4.12.3.4 Voltaje generado.

El proceso se desarrolla tal y como el proceso de medición de rpm. La información obtenida se presenta en la tabla 26. Resultados de voltaje generado por las turbinas.

Figura 39. Medición de voltaje generado.



Fuente: Autor.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 RESULTADOS GEOMÉTRICOS.

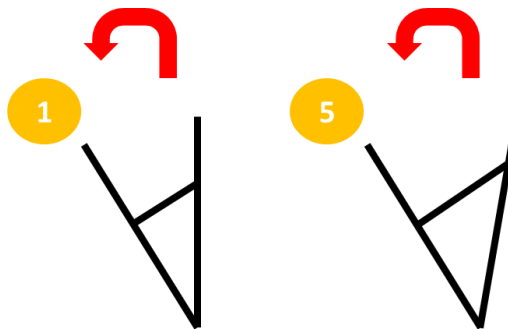
A continuación se presentan los resultados obtenidos del proceso de medición de las variables. Cabe aclarar que el diseñador interpreto estos datos de forma tal que fueran la base de la geometría final de la turbina.

#### 5.1.1 Configuraciones obtenidas de ángulos entre pétalos.

En el archivo Excel anexo “EXPERIMENTO: ÁNGULOS ENTRE PÉTALOS” se detalla los resultados obtenidos para cada una de las flores.

El proceso se llevó a cabo otorgándole el número 1, al pétalo en sentido anti horario del ángulo menor, y nombrando como pétalo 5 en sentido anti horario del ángulo mayor.

Figura 12. Numeración de los pétalos de las flores.



El pétalo contiguo al ángulo menor, en sentido contrario a las manecillas del reloj, será nombrado como pétalo 1, y el contiguo al mayor como 5.

Fuente: Autor.

Se encontró que algunas en algunas flores, era posible, una vez nombrado el pétalo 1, en sentido anti horario continuar con la secuencia de numeración (1, 2, 3, 4,5) y el pétalo 5 seguía siendo el contiguo al ángulo mayor, además se descubrió que esta secuencia continua podía ser de forma horaria o anti horaria. Por ello se nombraron estas dos secuencias:

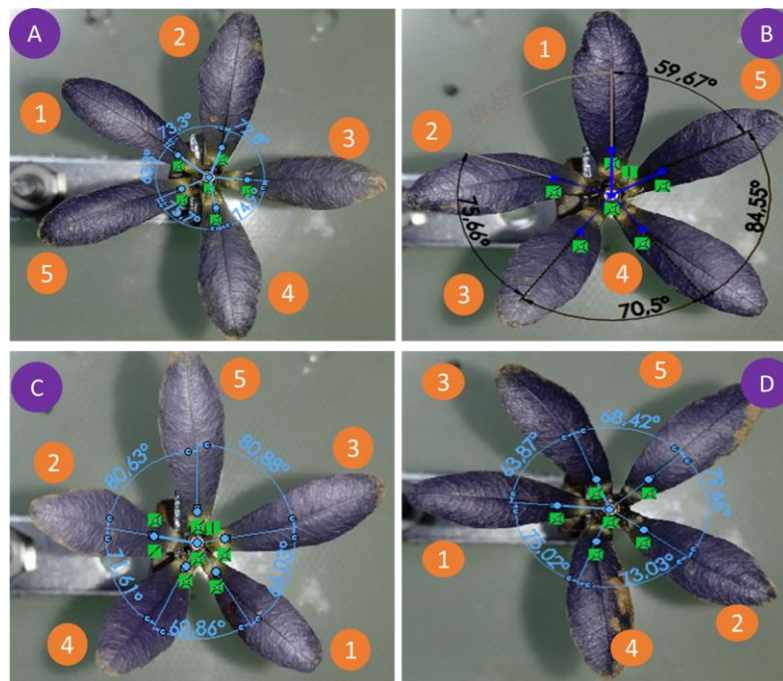
- **C-Horario:** Secuencia continua donde el Menor ángulo se ubica a la izquierda del ángulo mayor.
- **C-Anti-Horario:** Secuencia continua donde el ángulo mayor se ubica a la derecha del ángulo mayor.

Al estudiar cómo se nombrarían los pétalos de las flores que no entraron dentro de la secuencia continua, se descubrió que era posible nombrarlos de manera secuencial pero de forma intercalada, dejando un pétalo en la mitad, garantizando que se cumple que el pétalo 1 y el 5 son seleccionados gracias al ángulo menor y mayor de la flor. Estas secuencias se explican a continuación:

- **I-Horario:** Secuencia donde el ángulo menor se ubica intercalado un pétalo a la izquierda del ángulo mayor.
- **I-Anti-Horario:** Secuencia donde el ángulo menor se ubica intercalado un pétalo a la derecha del ángulo mayor.

A continuación se presenta una imagen donde se observa las secuencias encontradas.

Figura 13. Secuencias de numeración de pétalos obtenidas.

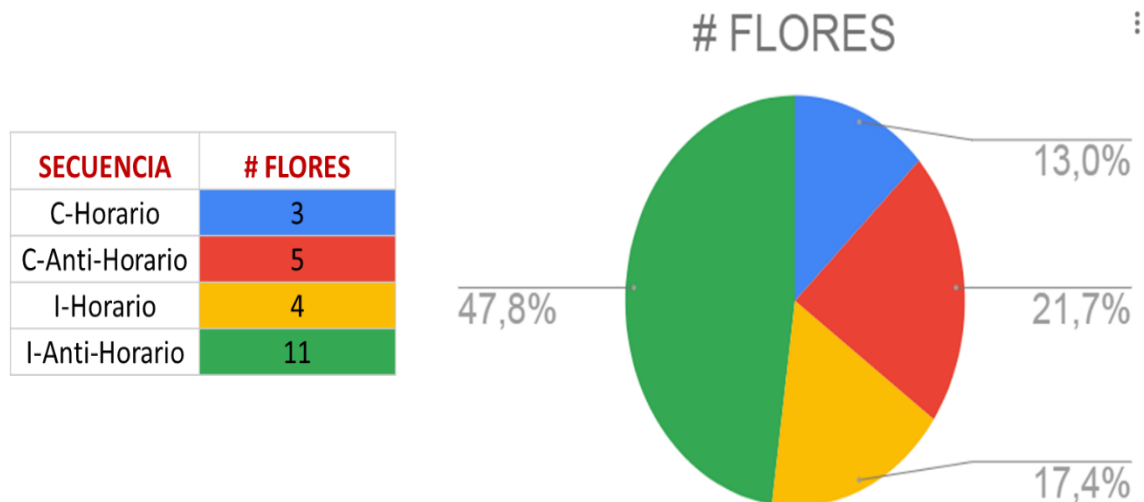


Fuente: Autor.

Como se puede apreciar la secuencia A: C-Horario, la secuencia B: C-Anti-Horario, la secuencia C: I- Horario, la secuencia D: I-Anti-Horario.

Se encontró que 11 flores podrían ser agrupadas dentro de la secuencia intercalada I-Anti-Horaria, 4 dentro de la I-Horaria, 5 dentro de la secuencia continua C-Anti-Horario, y 3 en la secuencia continua C-Horaria tal y como se presenta en el siguiente gráfico.

Figura 14. Flores agrupadas en secuencias.



Fuente: Autor.

Una vez identificado a que secuencia pertenece cada una de las 23 flores, se procede a numerar los pétalos, al pétalo 1, se le registra la información del ángulo menor, y dependiendo de la secuencia se les registra los demás ángulos.

Esta información se tabula y se promedia para encontrar la media entre estos ángulos, los datos de cada secuencia son tabulados de manera independiente. Esta información se presenta en al siguiente tabla.

Tabla 7. Ángulos entre pétalos según configuraciones obtenidas.

Pétalos	C Horario	C Anti-Horario	I Horario	I Anti-Horario	Iguales	Autor
1-2	66	63	62	62	72	65
2-3	72	69	71	68	72	75
3-4	72	72	83	71	72	80
4-5	72	75	75	83	72	75
5-1	78	81	69	76	72	65

Fuente: Autor.

En la tabla 7, se presentan además de las 4 configuraciones encontradas, dos configuraciones más una donde todos los ángulos son iguales, y otra propuesta por el autor donde el ángulo mayor se encuentra en el centro, y pares de ángulos descendentes en los extremos. Estas configuraciones se utilizarán para crear el modelo 3D, para su posterior análisis aerodinámico.

### 5.1.2 Ángulos de inclinación de los pétalos obtenidos.

Se observó que los pétalos seleccionados, poseían un ángulo entre la base de la flor y el pétalo, entre los 20 grados y los 48 grados aproximadamente. La información detallada se presenta en los documentos anexos.

A continuación se presenta el valor mínimo y máximo de este ángulo en cada una de las flores seleccionada.

Tabla 8. Ángulos de inclinación base pétalo medidos por un plano vertical.

#FLOR	MENOR ANGULO DEL PETALO - BASE	MAYOR ANGULO DEL PETALO - BASE
20	20,01	37,95
19	25,35	45
16	30,36	45
7	33,6	47,79
4	31,12	45

Fuente: Autor.

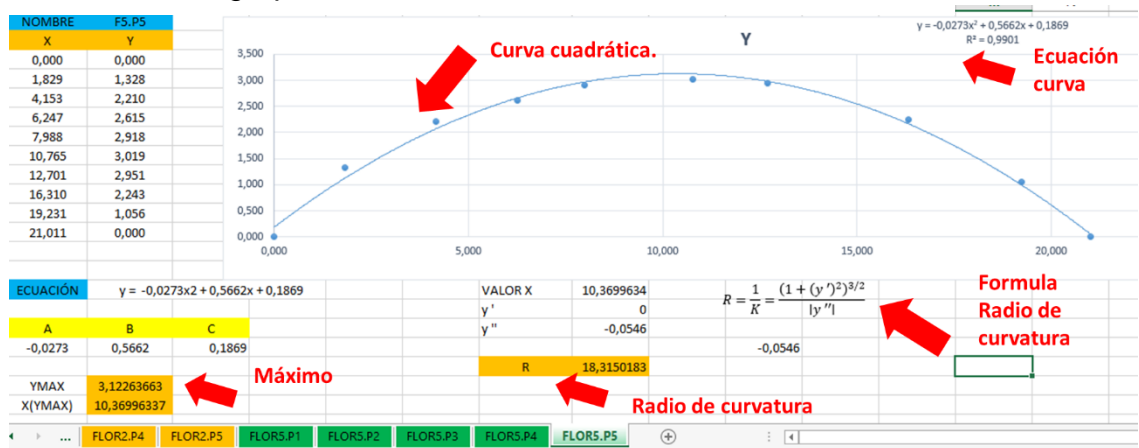
Se usaron los ángulos 20,30 y 45 para los análisis CFD de los modelos, ya que están entre el límite inferior y superior de los valores encontrados. A demás se propone usar un ángulo de 70 grados con la vertical o de 20 con la horizontal, para observar el fenómeno.

### 5.1.3 Curvatura lateral obtenida.

Una vez se exporto al software Excel, el valor de cada uno de los puntos de las 25 Spline, en las coordenadas X y Y, se procedió a graficar las curvas respectivas, se encontró que estas curvas obtenidas, pueden ser aproximadas a curvas cuadráticas, con un coeficiente de determinación de la varianza total de la variable explicada por la regresión<sup>21</sup>, en promedio de un  $R^2 = 0.98$ . Al realizar esto, es posible obtener cada una de las ecuaciones que rige la geometría de las curvas.

Una vez conocida la ecuación de cada curva, se procedió a encontrar los valores de donde Y es máximo (Pendiente igual a cero) y el respetivo valor de X en este punto. Además se procedió a calcular el valor del radio de curvatura en este punto<sup>22</sup>.

Figura 14. Flores agrupadas en secuencias.



Fuente: Autor.

<sup>21</sup> RODRÍGUEZ, Elena. Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. Anuario jurídico y económico escurialense, 2005, no 38, 315-331 p.

<sup>22</sup> PUIG, Adam. Cálculo Integral Aplicado a la Física y Técnica. Biblioteca Matemática, 1972. 286-287 p.

Una vez se realizó este proceso para las 25 curvas, se promedió el valor de Y Max, el valor de X (en función de Y Max) y el valor de radio de curvatura.

Tabla 9. Valores promedio obtenidos Y (Max), X (Y Max) y R radio de curvatura

Media Y Máximo mm	Media X(Y máximo) mm	Media R mm
2,777	9,782	18,62

Fuente: Autor.

Con estos valores y conociendo que las curva se comporta como una parábola, se procedió a encontrar la curva con estos parámetros, el proceso se detalla continuación.

Para encontrar la nueva curva resultante se usaron las siguientes ecuaciones

$$y = AX^2 + BX + C \quad (1) \text{ Ecuación de la parábola.}$$

$$R = \frac{(1+(y')^2)^{3/2}}{|y''|} \quad (2) \text{ Ecuación valor del radio de curvatura en un punto.}$$

$$y' = 2Ax + B$$

$$y'' = 2A$$

Valores conocidos.

$$y = 2,777$$

$$x = 9,782$$

$$y' = 0 \text{ Ya que existe un máximo}$$

$$R = 18,62$$

- Calculo de A  
Reemplazando en R

$$R = \frac{(1 + (0)^2)^{3/2}}{|2A|} = \frac{1}{|2A|} = 18,62$$

$$\text{Por consiguiente } |A| = \frac{1}{2 \cdot 18,62} = 0,02685$$

Se conoce que el valor de A es negativo.

$$A = -0,02685$$

- Calculo de B

$$y' = 2Ax + B = 0$$

Por consiguiente  $B = -2AX = -2(-0,02685)(9,782) = 0.5253$

- Calculo de C

Reemplazando en la ecuación de la parábola se tiene.

$$2,777 = (-0,0268)(9,782)^2 + 0.5253(9,782) + C$$

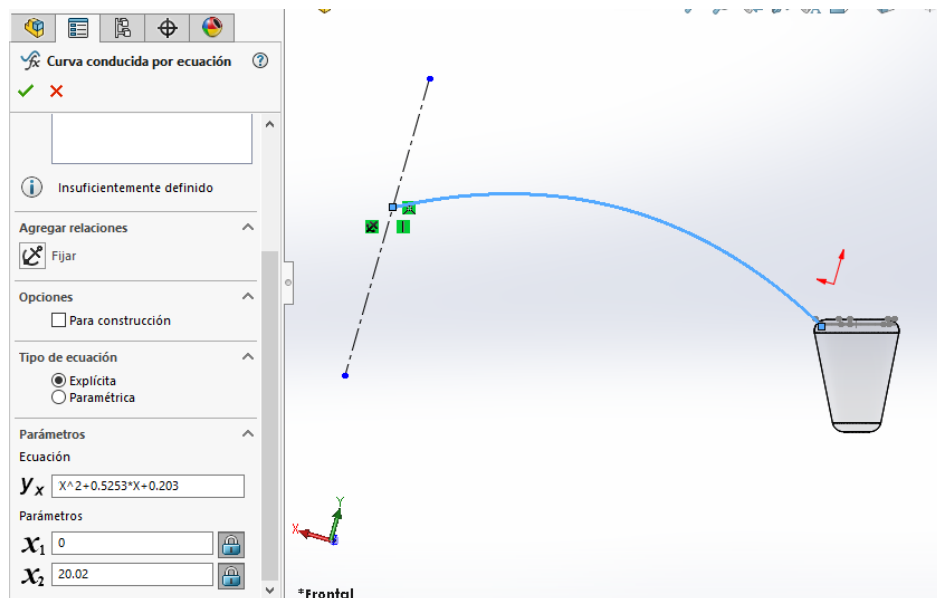
$$C = 0,203$$

La ecuación del croquis lateral del pétalo es:

$y = -0,02685X^2 + 0.5253X + 0,203$  (3) *Ecuación Estándar curva lateral de la turbina.*

En la siguiente imagen, se observa como unas ya identificada la ecuación, es posible introducirla fácilmente en el software.

Figura 14. Curva conducida por ecuación en Solidworks.



Fuente: Autor.

#### 5.1.4 Geometría estándar superior de los pétalos

Con los datos de los 25 pétalos se procedió a sacar la media de estos, y estandarizar una geometría estándar, la información se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 10. Valores promedio y estándar de la geometría superior de los pétalos.

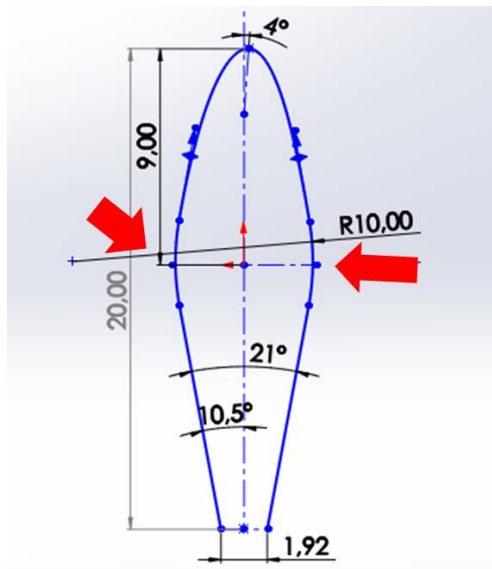
VARIABLE	MEDIA (mm)	ESTANDAR (mm)
L1	19,9	20
L2	9,29	9
L3	5,85	6
A1	20,95	21
A2	3,56	4

Fuente: Autor.

Al calcular la media de A2, se excluye el pétalo 1 de la flor 5, ya que este presentaba la inclinación en la base del pétalo, no en la parte superior como los demás pétalos, para este análisis no se estudiara como afecta esta inclinación la aerodinámica de la flor.

Continuación se presenta la geometría estándar superior de los pétalos.

Figura 16. Geometría estándar vista superior pétalo.



Fuente: Autor.

Cabe aclarar que se realizó en redondeo de 10 mm en el centro de la geometría, tratando de imitar la forma aerodinámica del pétalo.

### 5.1.5 Geometría base de la flor.

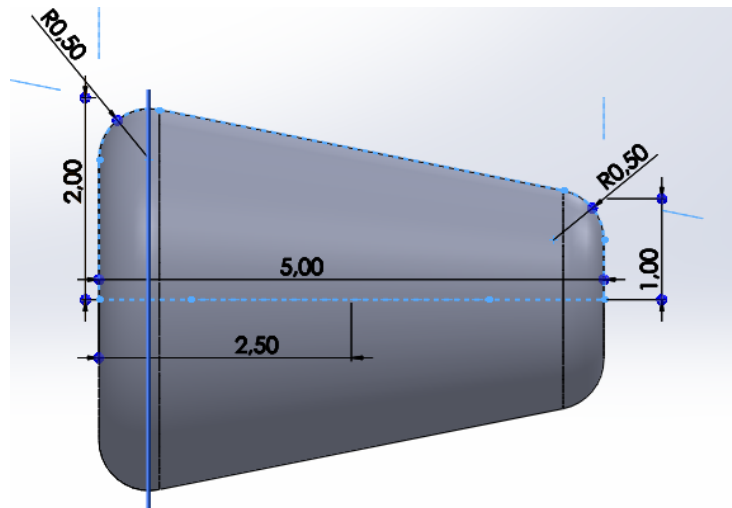
Como se comentó anteriormente, la base de la flor se rige por las ecuaciones de un cono truncado, a continuación se presentan el promedio datos obtenidos de las 5 flores, los demás datos se presentan en la sección de anexos.

Tabla 11. Valores promedio, aproximado y estándar de la geometría de la base de la flor.

	ALTURA (h)	RADIO INFERIOR	RADIO SUPERIOR	GENERATRIZ (g)
Promedio	4,644	0,914504303	2,004079043	4,770710231
Aproximado	4,7	0,9	2	4,827007354
Estándar	5	1	2	5,099019514

Fuete: Autor.

Figura 16. Geometría base flor.



Fuente: Autor.

No se tomó los valores aproximados como estándar, ya que por cuestiones de manufactura de la turbina, y de procesos de escalado de dimensiones, es mucho

más sencillo si se poseen valores enteros, además, este pequeño cambio no afecta la aerodinámica de la flor.

## 5.2 RESULTADOS ANALISIS CFD

### 5.2.1 Resultados primer grupo de análisis CFD

A continuación se muestran las configuraciones usadas, en total se realizaron 48 análisis CFD, ya que se poseen 6 configuraciones de ángulos, 4 de inclinación de pétalos con la base y dos de dirección de giro de la región rotativa.

Tabla 12. Variantes del primer grupo análisis CFD.

Configuración Ángulo entre pétalos	Angulo Inclinación pétalos (Grados)	Rotación Región rotativa (rad/s)
72-72-72-72-72	20	47
65-75-80-75-65	30	-47
66-72-72-72-78	45	
63-69-72-75-81	70	
62-68-71-83-76		
62-71-83-75-69		

Fuente: Autor.

En el documento Excel anexo “ANALISIS CFD ANGULO INCLINACION DE LOS PETALOS”, se presentan los valores obtenidos en cada una de estas simulaciones. Se eligió el valor del torque producido como el factor clave para determinar si una configuración es o no más eficiente que otra.

Los análisis de estos resultados se presentan continuación.

**5.2.1.1 Mayor torque obtenido a los 20 grados de inclinación de los pétalos con su base.**

Tabla 13. Resultado primer grupo CFD, Valores de torque obtenidos con un ángulo de 20 grados de inclinación de los pétalos con su base.

#	MODELO	ÁNGULO VERTICAL	RAD/S	TORQUE Z [N*m]
1	66-72-72-72-78	20	47	-4,83E-07
2	63-69-72-75-81	20	47	-4,73E-07
3	62-71-83-75-69	20	47	-4,48E-07
4	65-75-80-75-65	20	47	-4,07E-07
5	72-72-72-72-72	20	47	-3,57E-07
6	62-68-71-83-76	20	47	-3,23E-07
7	72-72-72-72-72	20	-47	1,18E-07
8	62-71-83-75-69	20	-47	1,35E-07
9	65-75-80-75-65	20	-47	1,44E-07
10	66-72-72-72-78	20	-47	1,45E-07
11	62-68-71-83-76	20	-47	1,83E-07
12	63-69-72-75-81	20	-47	2,22E-07

Fuente: Autor.

Las torques más altas se presentaron, cuando la región rotativa giraba en dirección positiva, tal y como se aprecia en la tabla, además se encontró que la mejor configuración en este ángulo, es el modelo con ángulos entre pétalos de 66-72-72-72-78 respectivamente.

**5.2.1.2 Mayor torque obtenido a los 30 grados de inclinación de los pétalos con su base.**

A continuación se presenta los resultados de los análisis CFD cuando el ángulo entre el pétalo y la base es de 30 grados.

Tabla 14. Resultado primer grupo CFD, Valores de torque obtenidos con un ángulo de 30 grados de inclinación de los pétalos con su base.

#	MODELO	ANGULO VERTICAL	RAD/S	TORQUE Z [N*m]
1	65-75-80-75-65	30	47	-5,88E-07
2	62-71-83-75-69	30	47	-5,06E-07
3	72-72-72-72-72	30	47	-5,03E-07
4	62-68-71-83-76	30	47	-4,88E-07
5	66-72-72-72-78	30	47	-4,02E-07
6	63-69-72-75-81	30	47	-2,79E-07
7	63-69-72-75-81	30	-47	7,08E-08
8	72-72-72-72-72	30	-47	1,68E-07
9	62-68-71-83-76	30	-47	1,77E-07
10	65-75-80-75-65	30	-47	1,86E-07
11	62-71-83-75-69	30	-47	1,92E-07
12	66-72-72-72-78	30	-47	1,97E-07

Fuente: Autor.

Se sigue manteniendo la tendencia, donde los torques más altos se dan cuando la región rotativa gira en dirección positiva, además se encontró que la mejor configuración en este ángulo, es el modelo con ángulos entre pétalos de 65-75-80-75-65 respectivamente.

### 5.2.1.3 Mayor torque obtenido a los 45 grados de inclinación de los pétalos con su base.

Tabla 15. Resultado primer grupo CFD. Valores de torque obtenidos con un ángulo de 45 grados de inclinación de los pétalos con su base.

#	MODELO	ANGULO VERTICAL	RAD/S	TORQUE Z [N*m]
1	72-72-72-72-72	45	-47	-6,29E-07
2	66-72-72-72-78	45	-47	-5,69E-07

3	63-69-72-75-81	45	-47	-5,64E-07
4	62-68-71-83-76	45	-47	-5,22E-07
5	65-75-80-75-65	45	-47	-4,82E-07
6	62-71-83-75-69	45	47	-3,72E-07
7	62-71-83-75-69	45	-47	1,98E-07
8	63-69-72-75-81	45	47	2,14E-07
9	72-72-72-72-72	45	47	2,18E-07
10	62-68-71-83-76	45	47	2,22E-07
11	65-75-80-75-65	45	47	2,43E-07
12	66-72-72-72-78	45	47	2,57E-07

Fuente: Autor.

En la tabla anterior se presenta los resultados obtenidos a un ángulo de 45 grados de inclinación de los pétalos con su base.

#### 5.2.1.4 Mayor torque obtenido a los 70 grados de inclinación de los pétalos con su base.

Tabla 16. Resultado primer grupo CFD. Valores de torque obtenidos con un ángulo de 70 grados de inclinación de los pétalos con su base.

#	MODELO	ANGULO VERTICAL	RAD/S	TORQUE Z [N*m]
1	72-72-72-72-72	70	-47	-4,58E-07
2	65-75-80-75-65	70	-47	-3,67E-07
3	66-72-72-72-78	70	-47	-3,50E-07
4	62-71-83-75-69	70	-47	-3,29E-07
5	63-69-72-75-81	70	-47	-3,13E-07
6	62-68-71-83-76	70	47	-2,78E-07
7	62-68-71-83-76	70	-47	2,14E-07
8	66-72-72-72-78	70	47	2,38E-07
9	65-75-80-75-65	70	47	2,40E-07
10	62-71-83-75-69	70	47	2,42E-07

11	63-69-72-75-81	70	47	2,54E-07
12	63-69-72-75-81	70	47	3,51E-07

Fuente: Autor.

Este análisis comprobó que cuando el ángulo de inclinación se acercaba a los 90 grados con la vertical, o 0 grados con la horizontal, los modelos se frenaban, ya que el área en contacto de la superficie de la turbina con el viento se asemejaba a una pared.

### 5.2.1.5 Mayores torques obtenidos en el primer grupo de análisis CFD.

Tabla 17. Resultado primer grupo CFD. Mayores valores de torque obtenidos.

#	MODELO	ANGULO VERTICAL	RAD/S	TORQUE Z [N*m]
1	72-72-72-72-72	45	-47	-6,29E-07
2	65-75-80-75-65	30	47	-5,88E-07
3	66-72-72-72-78	45	-47	-5,69E-07
4	63-69-72-75-81	45	-47	-5,64E-07
5	62-68-71-83-76	45	-47	-5,22E-07
6	62-71-83-75-69	30	47	-5,06E-07

Fuente: Autor.

Como se observa en la anterior tabla, la configuración con los ángulos entre pétalos igual, presenta un torque más alto al utilizar un ángulo de 45 grados con la vertical, esta configuración será la usada para el segundo grupo de análisis, ya que se diseñó una turbina fija, pero es probable que en investigaciones futuras, tanto la variación de ángulos entre pétalos como de inclinación de los pétalos, varíen según las necesidades de la turbina.

### 5.2.2 Resultados segundo grupo de análisis CFD

Este análisis se llevó a cabo, primeramente al analizar pequeñas variaciones del ángulo de torsión. Para ello se probó los siguientes ángulos sobre el modelo seleccionado en el primer grupo de análisis CFD.

Tabla 18. Valores del ángulo de torsión implementados al pétalo.

Ángulo torsión (-)	Ángulo torsión (+)
-10	10
-20	20
-30	30
-40	40
-50	50

Fuente: Autor.

Se encontró que el ángulo de torsión con mayor desempeño, fue el ángulo -50 grados.

Tabla 19. Resultados del valor del torque con ángulos de torsión entre -50 y 50 grados.

MODELO	ANGULO VERTICAL	ANGULO TORSION	RAD/S	TORQUE Z [N*m]
72-72-72-72-72	45	-50	47	-0,00169924
72-72-72-72-72	45	50	47	-0,001540451
72-72-72-72-72	45	-40	47	-0,00135565
72-72-72-72-72	45	40	47	-0,001055712
72-72-72-72-72	45	30	47	-0,000679266

Fuente: Autor.

Para la segunda parte del análisis se varió este ángulo en valores negativos, cada 10 grados, buscando entender como este ángulo afecta la aerodinámica, se llegó hasta el ángulo -140 grados, la variación en el torque comenzó a estabilizarse, aun así, la geometría perdió su similitud con la flor, por tal motivo se optó por no continuar con los análisis de torsión, ya que a los -180 grados el pétalo daría una vuelta completa.

Tabla 20. Resultados del valor del torque con ángulos detorsión entre -50 y -140 grados.

MODELO	ANGULO VERTICAL	ANGULO TPRSION	RAD/S	TORQUE Z [N*m]
72-72-72-72-72	45	-140	47	-0,006198734
72-72-72-72-72	45	-130	47	-0,006024677
72-72-72-72-72	45	-120	47	-0,005419729
72-72-72-72-72	45	-110	47	-0,004981848
72-72-72-72-72	45	-100	47	-0,004133115
72-72-72-72-72	45	-90	47	-0,00360385
72-72-72-72-72	45	-80	47	-0,003423867
72-72-72-72-72	45	-70	47	-0,00313489
72-72-72-72-72	45	-60	47	-0,00188942
72-72-72-72-72	45	-50	47	-0,00169924
72-72-72-72-72	45	-50	-47	0,001198982
72-72-72-72-72	45	-60	-47	0,001497093
72-72-72-72-72	45	-70	-47	0,002083462
72-72-72-72-72	45	-80	-47	0,003543362
72-72-72-72-72	45	-90	-47	0,003792281
72-72-72-72-72	45	-100	-47	0,004535792
72-72-72-72-72	45	-110	-47	0,004985438
72-72-72-72-72	45	-120	-47	0,005454662
72-72-72-72-72	45	-130	-47	0,005843235
72-72-72-72-72	45	-140	-47	0,0064718

Fuente: Autor.

De este análisis se pudo constatar 3 modelos de configuraciones para un nuevo análisis, estos seleccionados se presentan a continuación.

Tabla 21. Resultado torque modelos con ángulos de torsión de 0,-50 y -140 grados.

MODELO	ANGULO VERTICAL	ANGULO TPRSION	RAD/S	TORQUE Z [N*m]
72-72-72-72-72	45	-50	47	-0,00169924
72-72-72-72-72	45	0	47	-0,000410741
72-72-72-72-72	45	-140	-47	0,0064718

Fuente: Autor.

Al analizar la siguiente tabla, se observa que al implementar un ángulo de torsión de -50 se obtiene un torque 4.14 veces más grande, y al implementar un ángulo de torsión de -140 se obtiene un torque de 15.8 veces más grande al compararlos con el modelo que no presenta torsión en sus pétalos. Para tener una mayor certeza sobre los resultados obtenidos, se procedió a realizar un nuevo grupo de análisis CFD, refinando la malla. Para estos análisis se seleccionó el valor de -50 grados, ya que se observó que a pesar que los ángulos mayores a este presentaban una mayor torsión según el software, los pétalos perdieron tanto su similitud con la flor, que se determinó, que se tendría -50 grados como máximo, a criterio del diseñador.

### 5.2.3 Resultados tercer grupo de análisis CFD

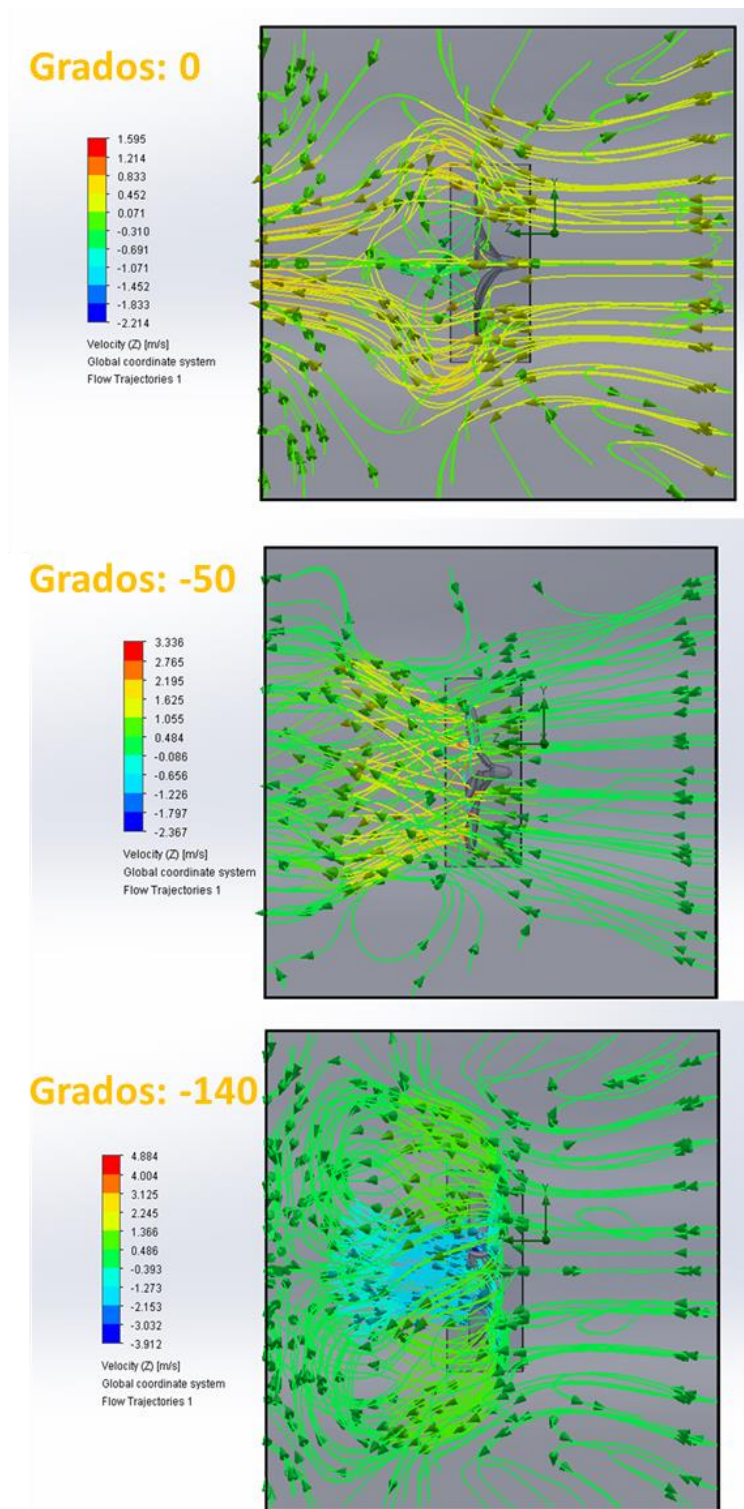
Al analizar la siguiente tabla, se observa que al implementar un ángulo de torsión de -50 se obtiene un torque 3.8 veces más grande, y al implementar un ángulo de torsión de -140 se obtiene un torque de 12.3 veces más grande al compararlos con el modelo que no presenta torsión en sus pétalos. Gracias a este nuevo a análisis se puede conocer este valor con una precisión mayor.

Tabla 22. Resultado torque modelos con ángulos de torsión de 0,-50 y -140 grados con malla refinada.

MODELO	ANGULO VERTICAL	ANGULO TPRSION	RAD/S	TORQUE Z [N*m]
72-72-72-72-72	45	-140	-47	0,00740801
72-72-72-72-72	45	-50	47	-0,00231384
72-72-72-72-72	45	0	47	-0,000604685

Fuente: Autor.

Figura 40. Flujos de aire sobre los modelos.



Fuente: Autor.

La imagen anterior presenta la velocidad del flujo de aire sobre las turbinas, se observa que al aumentar el ángulo de torsión de los pétalos, la velocidad aumenta, tal es el caso al comparar el modelo de 0 grados con el de -50. Al analizar la gráfica del modelo de -140 grados, se observa que el flujo crea vórtices que vuelven sobre la turbina, este fenómeno podría explicar por qué el torque aumenta, pero esto no significa que esta configuración sea más eficiente, por el contrario estos vórtices crean corrientes que podrían frenarla, aun así se llevaron a cabo pruebas físicas, para determinar la anterior afirmación.

Tabla 23. Especificaciones de cómputo y mallado de la simulación tercer grupo.

MODELO	ÁNGULO VERTICAL	ÁNGULO TORSION	RAD/S	Fluid cells	Fluid cells contacting solids	Cpu time
66-72-72-72-78	45	-140	-47	4,027,936	152,479	1 : 57 : 22
66-72-72-72-78	45	-50	47	4,027,927	152,411	1 : 47 : 43
66-72-72-72-78	45	0	47	4,027,309	151,205	1 : 47 : 29

Fuente: Autor.

Los análisis del segundo grupo poseían tan solo 188451 celdas del fluido, y 20.028 celdas en contacto del solido con el fluido, con un tiempo aproximado simulación de 3 min. Al refinar el mallado se garantizó la precisión de estos datos obtenidos.

### 5.3 RESULTADOS PRUEBAS FÍSICAS.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las pruebas físicas sobre las 3 turbinas seleccionadas.

### 5.3.1 Efectividad de rotación de las turbinas.

Tabla 24. Resultados prueba de efectividad de rotación de las turbinas.

			1 metro	2 metros	3 metros	4 metros	5 metros
MODELO	Ángulo pétalo-base	Ángulo torsión	Giro	Giro	Giro	Giro	Giro
72-72-72-72-72	45	0	SI	SI	SI	SI	SI
72-72-72-72-73	45	-50	SI	SI	SI	SI	SI
72-72-72-72-74	45	-140	SI	SI	SI	No	No

Fuente: Autor.

Como se observa en la tabla, a los 5 metros los modelos con ángulos de torsión de 0 y -50 grados, presentaban giro, en contra parte el modelo de -140 grados, deajo de girar luego de los 3 metros. De este análisis se concluye que esta turbina de -140 grados de torsión del pétalo, no es tan efectiva como turbina captadora de energía eólica.

### 5.3.2 Rpm medidas.

La medición de esta variable se realizó, con un flujo desde una distancia de 1 metro.

Tabla 25. RPM medidas turbinas con flujo a un metro de distancia.

			1 metro
MODELO	Ángulo petalo-base	Ángulo torsión	RPM
72-72-72-72-72	45	0	3335
72-72-72-72-73	45	-50	4332
72-72-72-72-74	45	-140	1040

Fuente Autor.

Como se pudo observar en la tabla anterior, el desempeño de la turbina con el ángulo de torsión en el pétalo de -140 grados, no presenta buen desempeño al

comprarla con los demás modelos. Además se encuentra que el modelo más aerodinámico es el modelo con -50 grados.

### 5.3.3 Voltaje Generado.

Tabla 26. Resultados de voltaje generado por las turbinas.

			1 metro	2 metros	3 metros	4 metros	5 metros
MODELO	Ángulo pétalo-base	Ángulo torsión	Voltaje (V)	Voltaje (V)	Voltaje (V)	Voltaje (V)	Voltaje (V)
72-72-72-72-72	45	0	4,2	3,41	1,7	1,33	0,5
72-72-72-72-73	45	-50	4,54	3,52	1,89	1,42	0,58
72-72-72-72-74	45	-140	1,2	0,7	0,33	-	-

Fuente: Autor.

Como se mencionó se usó un motor con capacidad máxima de 5V, para llevar a cabo esta prueba, se encontró que el desempeño del modelo de -140 grados, es el que genera la menor cantidad de voltaje y el modelo con -50 la mayor, aunque con números similares al modelo de 0 grados de torsión de sus pétalos.

## 5.4 APLICACIONES DE LA TURBINA.

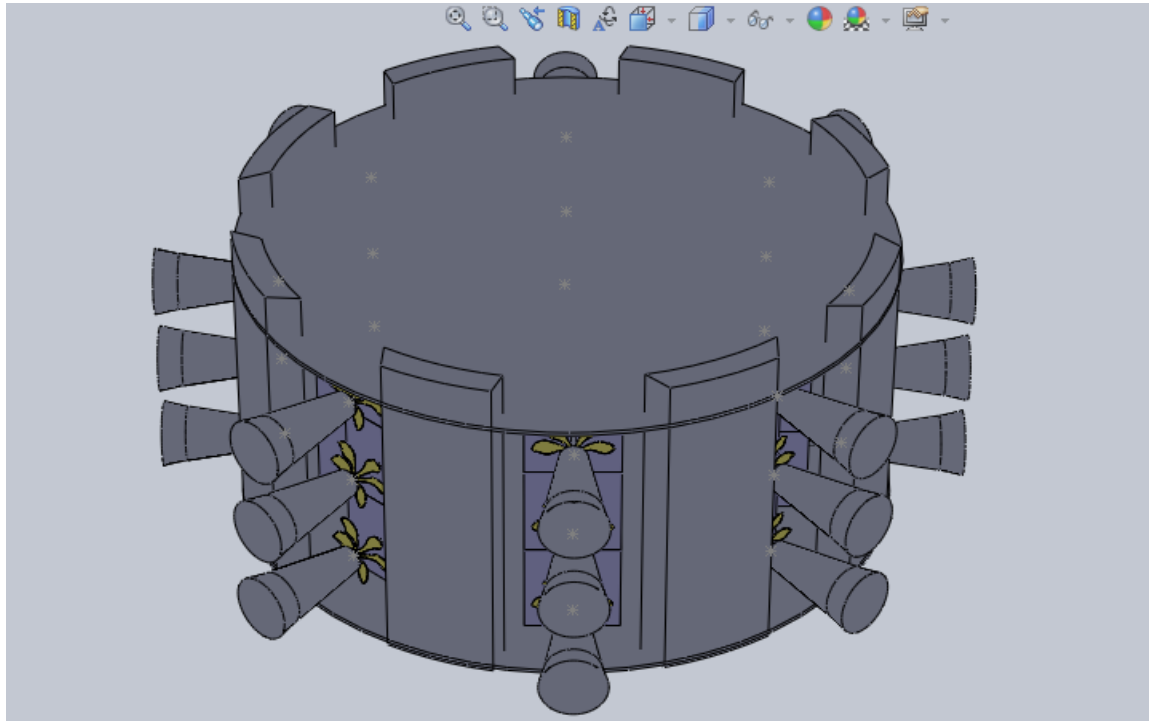
A continuación se presenta algunos de las posibles aplicaciones para este tipo de turbina.

### 5.4.1 Energía eólica.

Como se mencionó anteriormente, las implicaciones económicas y medio ambientales de los grandes aerogeneradores, dificulta el acceso a este tipo de energía, además se encontró que la turbina diseñada gira a gran velocidad, lo que supone un riesgo cuando los aerogeneradores son muy grandes, la gran mayoría vienen equipados con sistemas de frenado, que detienen la turbina una vez la

velocidad del viento sobrepasa los valores permitidos<sup>23</sup>, pero al proponer aerogeneradores en base a la turbina diseñada, de diámetros pequeños y con más de una turbina, se podría obtener energía de forma rentable y segura.

Figura 41. Diseño básico de un aerogenerador múltiples turbinas.



Fuente. Autor.

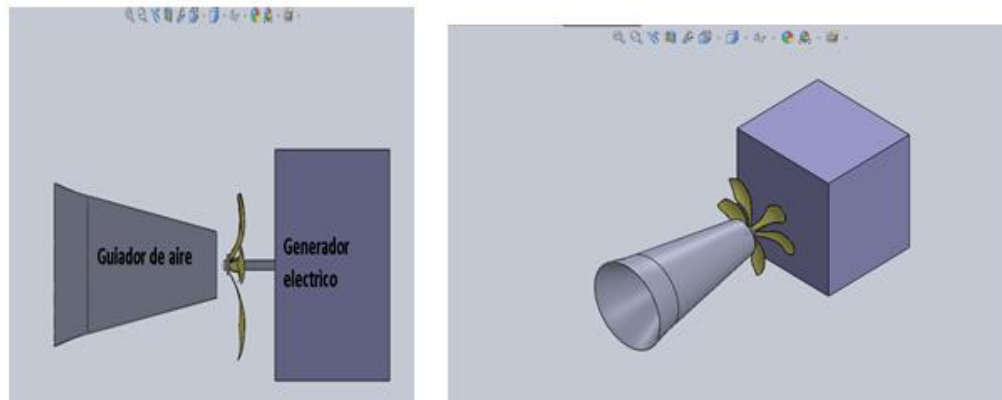
Esta turbina diseñada, funciona con vientos en horizontales, lo que permitiría enfocarlos hacia corrientes específicas, o tener varios en distintas direcciones y que según el flujo del viento se activen unos u otros.

Además se proponer usar mecanismos de aceleración de corrientes sobre ella, que permita tanto focalizar el viento, como aumentar su velocidad, la distancia de estos dispositivos y su geometría dispondría de una investigación distinta a esta. A continuación se muestra una imagen básica de esta posible mejora.

---

<sup>23</sup> BADELIN, Alexander y CRISZH, Gregor. Evaluation Programme Wind Energy in Germany, WMEP, Fraunhofer-Institute for Wind Energy and Energy Sistem Technology. Alemania .2006.

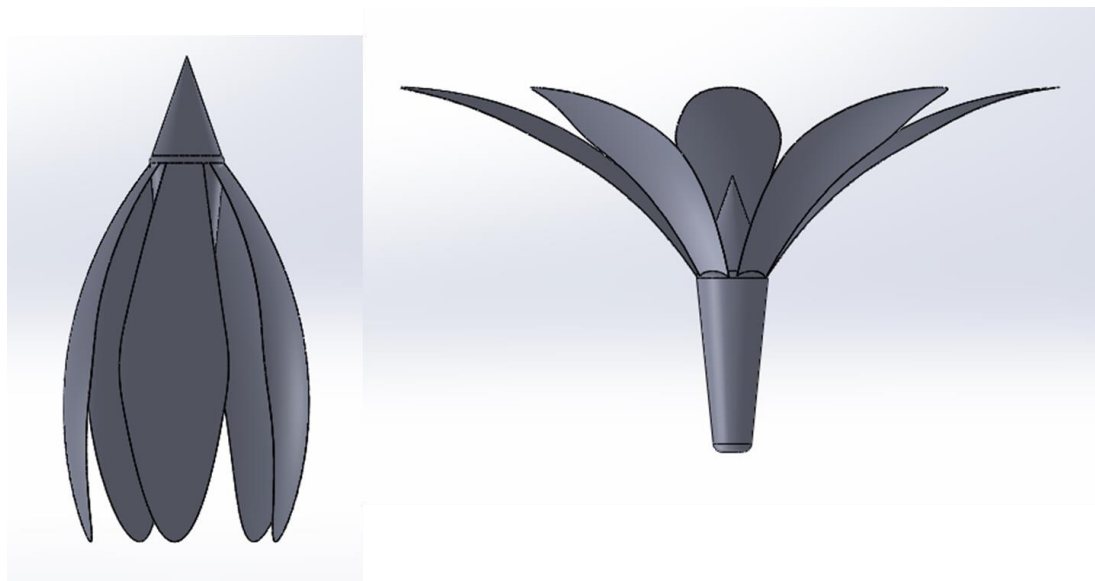
Figura 42. Posible dispositivo acelerador de aire.



#### 5.4.2 Industria aeroespacial.

Es necesario de investigaciones futuras para determinar el cómo este tipo de turbina podría usarse tanto como para impulso o para generar energía en aplicaciones espaciales o aeronáuticas.

Figura 43. Posible diseño nave no tripulada o satélite.

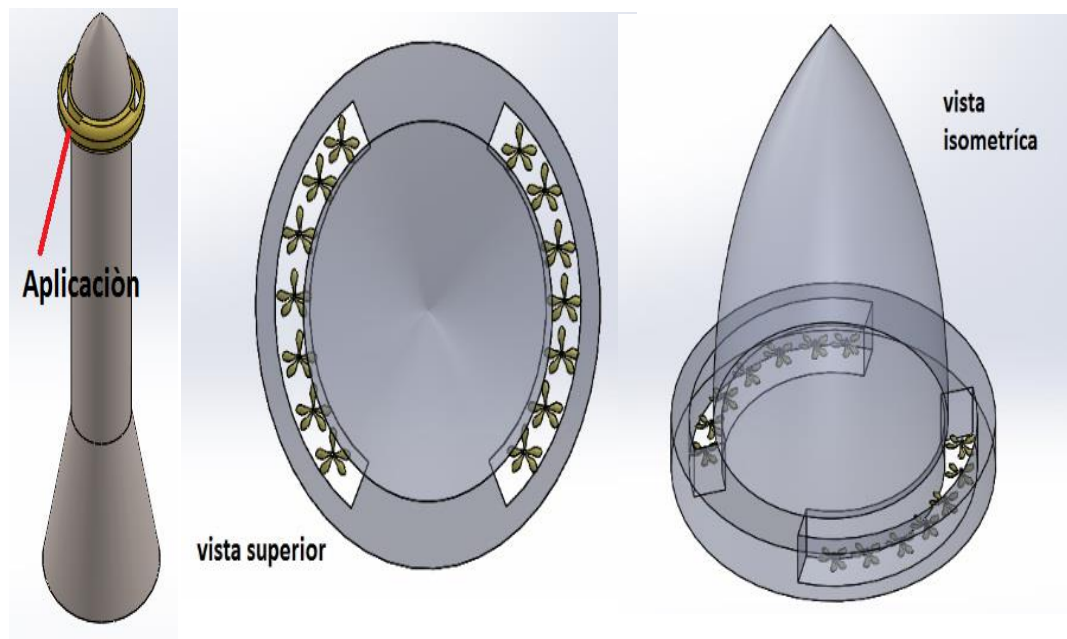


Fuente: Autor.

Como se observa en la imagen anterior es posible diseñar sondas, satélites o naves no tripuladas en base al diseño de la flor, se plantea el uso de un sistema de apertura y cerrado de los pétalos, que permite actuar de acelerador, si es posible como generador, y a la vez como frenado, ya que se conoce que al variar la apertura de los ángulos de inclinación de los pétalos con su base se acelera o se frena.

La principal barrera para poder llegar a fabricar objetos espaciales como estos son los materiales necesarios, ya que estos estarían afectados por magnitudes de fuerzas muchos más grandes que las que se generan usando la turbina como aerogenerador.

Figura 44. Posible uso del rotor en cohetes como anillo de generación de energía.



Fuente: Autor.

Es posible inclusive crear anillos que permitan a estas aeronaves o sondas, generar energía al momento del despegue, que pueda ser utilizada en funciones vitales de esta.

## **5.5 MEJORAS E INVESTIGACIONES FUTURAS.**

Esta investigación no se centró en la construcción física de la turbina, si no en obtener un método de diseño efectivo, que permitiera replicar las propiedades de la flor, como posibles mejoras en el método de fabricación, se encontró que al imprimir las turbinas con PLA, están resistían adecuadamente los esfuerzos generados por la corriente de aire del soplador, pero no se tiene un estudio de estos esfuerzos, ni la relación optima del espesor si se quisiera optar por este método de fabricación, es posible imprimir en otros materiales más resistentes. Y se propone realizar vetas tal y como tiene la flor, sobre las turbinas para aumentar la resistencia de los pétalos. Investigaciones futuras, estarían destinadas a definir un método de fabricación, optimizar el espesor de los pétalos en base a al material, y diseñar un sistema de control que permita variar los ángulos entre los pétalos y la inclinación de estos con respecto a la vertical de su base.

Además es necesario hacer pruebas de túnel de viento físicas, que validen y permitan definir la turbina.

## 6. CONCLUSIONES

- El método usado para capturar las dimensiones y características físicas de la flor, al complementarse con un software de edición 3D, permitió generar un modelo 3D confiable, fácilmente replicable y escalable, y que puede ser construido desde cero desde cualquier otro software de edición. Este método puede ser replicado para obtener otras geometrías sencillas de objetos o piezas.
- Al usar un sencillo método basado en guías de dimensionamiento, fotos con medidas estándar, los datos obtenidos en esta investigación fueron reales, y fue posible compararlos entre ellos de forma confiable.
- Se encontró que la naturaleza realiza iteraciones constantemente, solo se analizó las flores de un árbol y se encontraron patrones en toda su geometría, es probable que otros árboles posean configuraciones distintas, y que este proceso se siga dando hasta obtener configuraciones más eficientes.
- Se encontró que la turbina dependiendo del ángulo de inclinación de los pétalos con la vertical, posee distintas configuraciones de ángulos entre pétalos efectivas, para este proyecto se eligió la posición de inclinación de los pétalos óptima, pero para futuras aplicaciones, y dependiendo de las necesidades de funcionamiento, se podría variar tanto el ángulo entre pétalos como su inclinación con la base para obtener siempre las condiciones óptimas de funcionamiento.
- Al estandarizar parte de la geometría con una ecuación cuadrática, se abren puertas a diseñar nuevas turbinas bajo esta modalidad, con simples croquis y ecuaciones.
- El tipo de turbina creada en esta investigación es a contra viento, y aunque esto podría significar un pequeño inconveniente en cuanto a la sujeción de esta, se determinó que el proceso de transmisión de movimiento a un eje, es posible.

- Al realizar el experimento físico, se encontró que los modelos giraban en dirección horaria.
- Al hacer uso de un software CFD para el análisis aerodinámico, bajo las mismas condiciones y modificando solo algunas variables, es posible aun con un bajo requerimiento de equipo, encontrar tendencias y datos que permiten obtener configuraciones optimas acorde a los objetivos propuestos. Y una vez halladas están tendencias refinar el cálculo para obtener valores adecuados. Y aunque los análisis se llevaron a cabo con la turbina en escala 1:1 con la flor y 3:1, estos datos son válidos y escalables.
- El ángulo de torsión a un aspa de la turbina permite y favorece la rotación tal y como se observó en los análisis físicos y computacionales, aun así, este ángulo en base a la geometría analizada posee valores óptimos y valores donde ya pierde su efectividad.
- Al interpretar los datos de la naturaleza un investigador está influenciado en sus propios experiencias, y es posible que personas distintas analicen datos de forma distintas, por tal motivo se concluye que esta investigación a pesar de que tiene como precedente otra turbina diseñada en base a la flor del árbol *Pétrea volubilis*, se garantiza que los datos obtenidos son diferentes.
- Es necesario de más pruebas que permitan tanto obtener más información de la turbina diseñada como implementar posibles mejoras que honren el proceso de diseño que realiza la naturaleza.
- Las posibles aplicaciones de esta geometría son muchas y en distintos campos, y se cumplió con el objetivo primordial de la investigación que es resaltar y usar los avances que la naturaleza lleva a cabo.

## REFERENCIAS

BADELIN, Alexander y CRISZH, Gregor. Evaluation Programme Wind Energy in Germany, WMEP, Fraunhofer-Institute for Wind Energy and Energy System Technology. Alemania .2006.

BBC News Mundo. Por qué hay más viento en la base de los rascacielos y cómo reducirlo. BBC News Mundo [página web]. [Consultado el 2, mayo, 2023]. Disponible en Internet: <https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/07/15071>.

CASTAÑEDA, David. Diseño y Construcción de un Sistema Eólico para Bombeo Basado en un Rotor Bioinspirado. Tesis maestría en ingeniería mecánica. Colombia: Universidad Nacional de Colombia. 2010.

DAVINCI, Leonardo. Código del Vuelo de las Aves. Italia:1505-1506.

ENERGÍA EÓLICA. Disponle en línea, 01 febrero 2023 en: [https://fjarabo.webs.ull.es/VirtualDoc/Curso%202013-2014/Energ%C3%ADas%20renovables%20\(Tecnolog%C3%ADa%20Energ%C3%A9tica\)/3\\_Eolica/Eolica\\_Resumen.pdf](https://fjarabo.webs.ull.es/VirtualDoc/Curso%202013-2014/Energ%C3%ADas%20renovables%20(Tecnolog%C3%ADa%20Energ%C3%A9tica)/3_Eolica/Eolica_Resumen.pdf)

FAVRET, Eduardo. Biomimética tecnología inspirada en la naturaleza. Buenos Aires. Instituto de Suelos, 2016, p.1.

GAITAN, Jorge. Validación del comportamiento de un rotor eólico biomimético mediante un modelo Supervisado en CFD. Tesis Magister en Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Colombia. 2017

GAITÁN, Op. cit., p. 31.

HELICES NAUTICAS - ¿Qué turbina para mi barco? - Guía para turbinas [Anónimo]. Helices Nauticas [página web]. [Consultado el 1, junio, 2023]. Disponible en Internet: <https://www.helicesnauticas.es/>

MENDOZA, Gerardo. Motores Maquinas Eléctricas. Electrotecnia, 2012.

MOUSSA, Karim. Computational modeling of propeller noise. Tesis. University of Waterloo, 2014.

NPICASSO. Impacto ambiental de la energía eólica. Blablanegocios. Disponible en línea, 25 septiembre 2018 en: <http://blablanegocios.com/impacto-ambiental-la-energia-eolica/>.

ORO, Jesús. Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos. Reverté, 2012.

PUIG,Adam. Cálculo Integral Aplicado a la Física y Técnica. Biblioteca Matemática, 1972. 286-287 p.

REVE. Eólica en Uruguay. Evwind. Disponible en línea, 01 febrero 2023 en: <https://www.evwind.com/2015/03/18/eolica-en-uruguay-ya-se-puede-invertir-en-el-parque-eolico-de-ute/>.

RODRÍGUEZ, Daniel, et al. Obtención de la curva representativa  $c_p$  vs  $\lambda$  del rotor eólico un-v1 por métodos experimentales. Tesis Ingeniero aeronáutico. Universidad de san buenaventura. 2019.

RODRÍGUEZ, Elena. Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. Anuario jurídico y económico escurialense, 2005, no 38, 315-331 p.

ROSEN, A y SETER, D. Vertical autorotation of a single winged samara. Transactions of the ASME, Vol. 58, 1991, pp. 1064-1070.

SKF. rolling-bearings. Consultado el 10, julio, 2023. Disponible en Internet: <https://www.skf.com/es/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-W%20625-2RS1>.

SOFTWARE DE diseño CAD 3D | SOLIDWORKS [Anónimo]. SOLIDWORKS [página web]. [Consultado el 1, marzo, 2023]. Disponible en Internet: <https://www.solidworks.com/es>.

SOLIDWORKS FLOW Simulation [Anónimo]. SOLIDWORKS [página web]. [Consultado el 8, julio, 2023]. Disponible en Internet: <https://www.solidworks.com/es/product/solidworks-flow-simulation>.

UNIVERSIDAD EIA. Petrea volubilis. Catalogofloravalleaburra. Disponible en línea, 30 septiembre 2018 en: <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/243>.



UNIVERSITÄT DÜSSELDORF: G\*Power [Anónimo]. Universität Düsseldorf: Psychologie [página web]. [Consultado el 2, mayo, 2023]. Disponible en Internet: <https://www.psychologie.hhu.de/arbeitsgruppen/allgemeine-psychologie-und-arbeitspsychologie/gpower.html>

## ANEXOS

### Anexo A

### INFORMACIÓN ÁRBOL *PETREA VOLUBILIS*

Figura 11. Información *Petrea volubilis*.

 <p>Disposición de las flores: Racimo Color de la flor: Morado</p>	<b>Características</b>																																																																														
	 <p>Tipo de fruto: Drupa</p>	<table border="1"> <tbody> <tr><td>Familia</td><td>Verbenaceae</td></tr> <tr><td>Nombre científico</td><td><i>Petrea volubilis</i></td></tr> <tr><td>Autor</td><td>L.</td></tr> <tr><td>Etimología</td><td><i>Petrea</i>, nombre genérico dado por Linneo en honor al Barón Petre de Ingatestone Hall en Essex; <i>volubilis</i>, retorcido o girad</td></tr> <tr><td>Sinónimo</td><td>-</td></tr> <tr><td>Nombre común</td><td>Penitente</td></tr> <tr><td>Origen</td><td>Nativa</td></tr> <tr><td>Continente</td><td>Centro América, Sur América</td></tr> <tr><td>Distribución geográfica</td><td>S México hasta Paraguay; Antillas</td></tr> <tr><td>Hábito de crecimiento</td><td>Arbustiva</td></tr> <tr><td>Altura máxima (m)</td><td>12</td></tr> <tr><td>Diámetro (cm)</td><td>20</td></tr> <tr><td>Amplitud de copa</td><td>Estrecha (menor que 7 m)</td></tr> <tr><td>Densidad de follaje</td><td>Medía</td></tr> <tr><td>Modelo arquitectónico</td><td>No determinado</td></tr> <tr><td>Sistema radicular</td><td>Superficial</td></tr> <tr><td>Atributos foliares</td><td>Miden entre 5 y 16 cm de largo y 3 y 8 cm de ancho, margen entero, ásperas</td></tr> <tr><td>Persistencia hoja</td><td>Perenne</td></tr> <tr><td>Atributos florales</td><td>Entre 8 y 20 cm de largo</td></tr> <tr><td>Estación de floración</td><td>Estacional</td></tr> <tr><td>Sistema de polinización</td><td>No determinado</td></tr> <tr><td>Limitaciones flores</td><td>Ninguna</td></tr> <tr><td>Limitaciones frutos en espacios públicos</td><td>Ninguna</td></tr> <tr><td>Sistema de dispersión</td><td>No determinado</td></tr> <tr><td>Atracción fauna</td><td>-</td></tr> <tr><td>Densidad madera (g/cm<sup>3</sup>)</td><td>No determinado</td></tr> <tr><td>Tasa de crecimiento</td><td>Rápida</td></tr> <tr><td>Longevidad</td><td>Baja (0 - 35 años)</td></tr> <tr><td>Zonas de humedad</td><td>No determinado</td></tr> <tr><td>Rango altitudinal</td><td>0 - 1000 msnm, 1001 - 1500 msnm, 1501 - 2000 msnm</td></tr> <tr><td>Requerimiento de luminosidad</td><td>Alta</td></tr> <tr><td>Tipo de suelo</td><td>-</td></tr> <tr><td>Uso</td><td>-</td></tr> <tr><td>Función</td><td>Ornamental</td></tr> <tr><td>Usos en espacio público</td><td>Parques, Separador autopistas, Separador arterias principales, Andenes vías de servicio, Vías peatonales, Orejas de puente, Glorietas, Plazas/Plazoletas, Edificios institucionales</td></tr> <tr><td>Estado de conservación</td><td>Preocupación menor (LC)</td></tr> <tr><td>Plagas y enfermedades reportadas</td><td>-</td></tr> <tr><td>Observaciones</td><td>Estado de conservación: preocupación menor</td></tr> <tr><td>Fuentes</td><td>Whistler (2000)</td></tr> </tbody> </table>	Familia	Verbenaceae	Nombre científico	<i>Petrea volubilis</i>	Autor	L.	Etimología	<i>Petrea</i> , nombre genérico dado por Linneo en honor al Barón Petre de Ingatestone Hall en Essex; <i>volubilis</i> , retorcido o girad	Sinónimo	-	Nombre común	Penitente	Origen	Nativa	Continente	Centro América, Sur América	Distribución geográfica	S México hasta Paraguay; Antillas	Hábito de crecimiento	Arbustiva	Altura máxima (m)	12	Diámetro (cm)	20	Amplitud de copa	Estrecha (menor que 7 m)	Densidad de follaje	Medía	Modelo arquitectónico	No determinado	Sistema radicular	Superficial	Atributos foliares	Miden entre 5 y 16 cm de largo y 3 y 8 cm de ancho, margen entero, ásperas	Persistencia hoja	Perenne	Atributos florales	Entre 8 y 20 cm de largo	Estación de floración	Estacional	Sistema de polinización	No determinado	Limitaciones flores	Ninguna	Limitaciones frutos en espacios públicos	Ninguna	Sistema de dispersión	No determinado	Atracción fauna	-	Densidad madera (g/cm <sup>3</sup> )	No determinado	Tasa de crecimiento	Rápida	Longevidad	Baja (0 - 35 años)	Zonas de humedad	No determinado	Rango altitudinal	0 - 1000 msnm, 1001 - 1500 msnm, 1501 - 2000 msnm	Requerimiento de luminosidad	Alta	Tipo de suelo	-	Uso	-	Función	Ornamental	Usos en espacio público	Parques, Separador autopistas, Separador arterias principales, Andenes vías de servicio, Vías peatonales, Orejas de puente, Glorietas, Plazas/Plazoletas, Edificios institucionales	Estado de conservación	Preocupación menor (LC)	Plagas y enfermedades reportadas	-	Observaciones	Estado de conservación: preocupación menor	Fuentes
Familia	Verbenaceae																																																																														
Nombre científico	<i>Petrea volubilis</i>																																																																														
Autor	L.																																																																														
Etimología	<i>Petrea</i> , nombre genérico dado por Linneo en honor al Barón Petre de Ingatestone Hall en Essex; <i>volubilis</i> , retorcido o girad																																																																														
Sinónimo	-																																																																														
Nombre común	Penitente																																																																														
Origen	Nativa																																																																														
Continente	Centro América, Sur América																																																																														
Distribución geográfica	S México hasta Paraguay; Antillas																																																																														
Hábito de crecimiento	Arbustiva																																																																														
Altura máxima (m)	12																																																																														
Diámetro (cm)	20																																																																														
Amplitud de copa	Estrecha (menor que 7 m)																																																																														
Densidad de follaje	Medía																																																																														
Modelo arquitectónico	No determinado																																																																														
Sistema radicular	Superficial																																																																														
Atributos foliares	Miden entre 5 y 16 cm de largo y 3 y 8 cm de ancho, margen entero, ásperas																																																																														
Persistencia hoja	Perenne																																																																														
Atributos florales	Entre 8 y 20 cm de largo																																																																														
Estación de floración	Estacional																																																																														
Sistema de polinización	No determinado																																																																														
Limitaciones flores	Ninguna																																																																														
Limitaciones frutos en espacios públicos	Ninguna																																																																														
Sistema de dispersión	No determinado																																																																														
Atracción fauna	-																																																																														
Densidad madera (g/cm <sup>3</sup> )	No determinado																																																																														
Tasa de crecimiento	Rápida																																																																														
Longevidad	Baja (0 - 35 años)																																																																														
Zonas de humedad	No determinado																																																																														
Rango altitudinal	0 - 1000 msnm, 1001 - 1500 msnm, 1501 - 2000 msnm																																																																														
Requerimiento de luminosidad	Alta																																																																														
Tipo de suelo	-																																																																														
Uso	-																																																																														
Función	Ornamental																																																																														
Usos en espacio público	Parques, Separador autopistas, Separador arterias principales, Andenes vías de servicio, Vías peatonales, Orejas de puente, Glorietas, Plazas/Plazoletas, Edificios institucionales																																																																														
Estado de conservación	Preocupación menor (LC)																																																																														
Plagas y enfermedades reportadas	-																																																																														
Observaciones	Estado de conservación: preocupación menor																																																																														
Fuentes	Whistler (2000)																																																																														

Fuente: Catalogo flora valle de aburra<sup>24</sup>

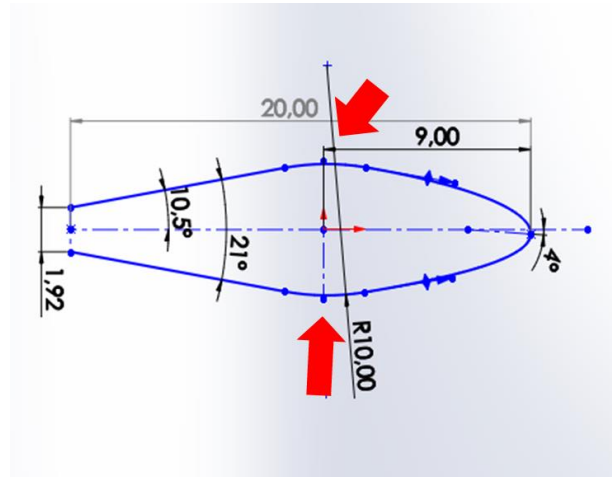
<sup>24</sup>UNIVERSIDAD EIA. *Petrea volubilis*. Catalogofloravalleaburra. Disponible en línea, 30 septiembre 2018 en: <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/243>.

## Anexo B

### MÉTODO DE MODELAMIENTO PÉTALOS

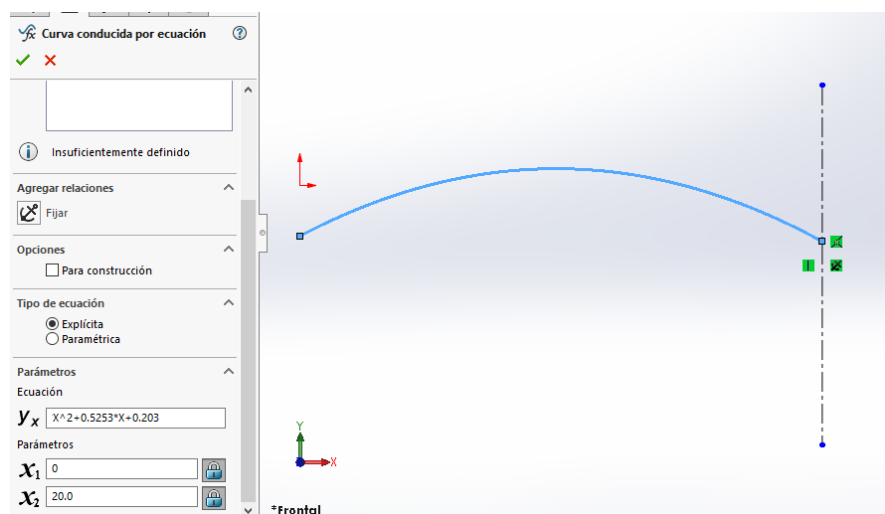
#### A. Modelamiento de croquis plano Planta:

En el plano alzado, se procede a insertar el croquis estándar de la vista superior del pétalo.



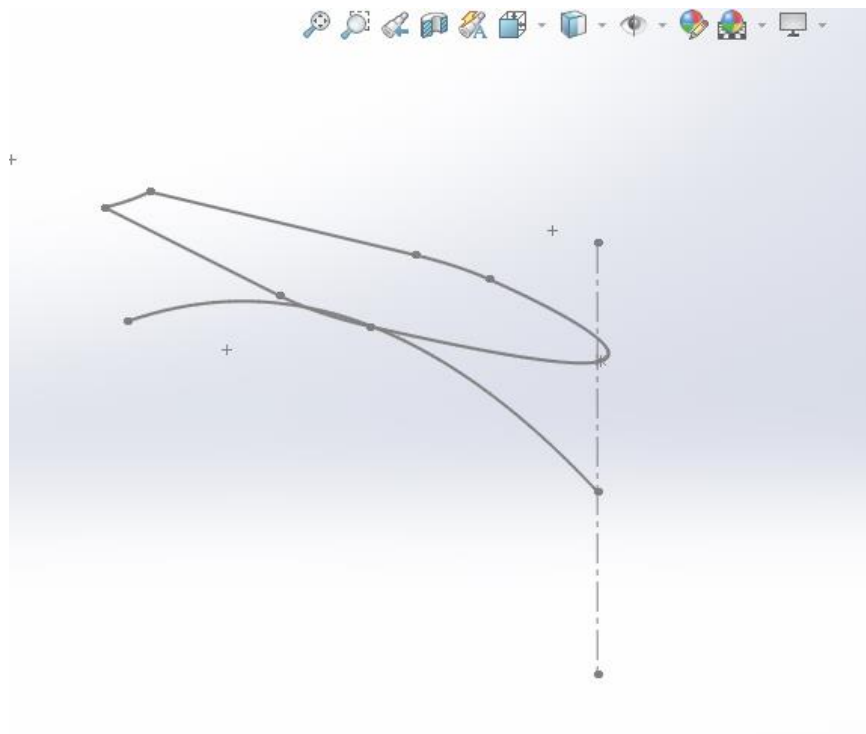
#### B. Modelamiento de plano alzado:

En esta vista se crea un croquis y se inserta la curva estándar a través de la opción de insertar curva por ecuación. Y se parametriza con la longitud del pétalo.



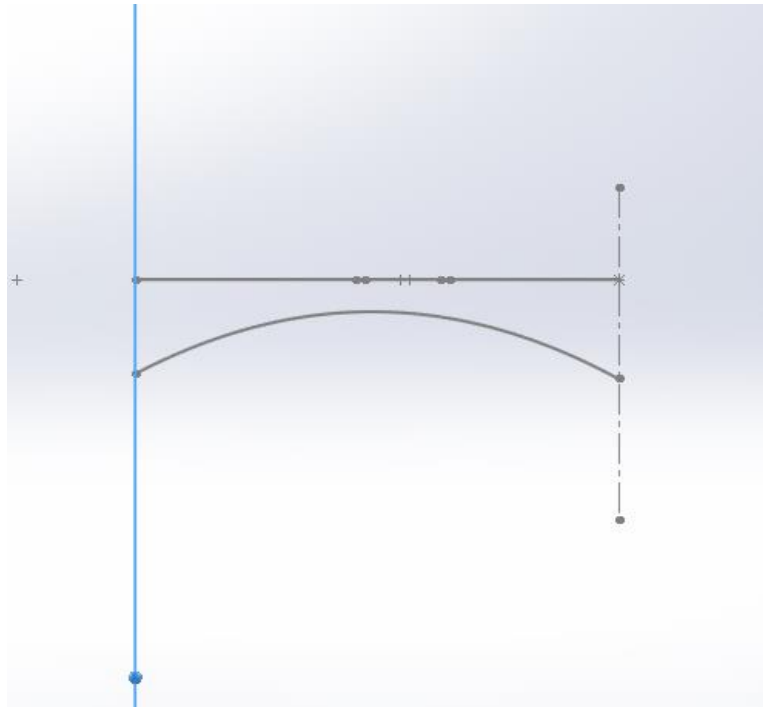
Es necesario insertar la línea vertical que se muestra en la figura anterior, esta debe ser coincidente con la curva introducida por la ecuación.

Ahora se gira un poco el modelo en Solidworks a tal que se vea un poco el Croquis de la vista planta, se selecciona la línea de croquis vertical insertada y el punto más exterior de la parte más ancha del croquis de la vista planta, y se da coincidente, tal y como se ve en la imagen.



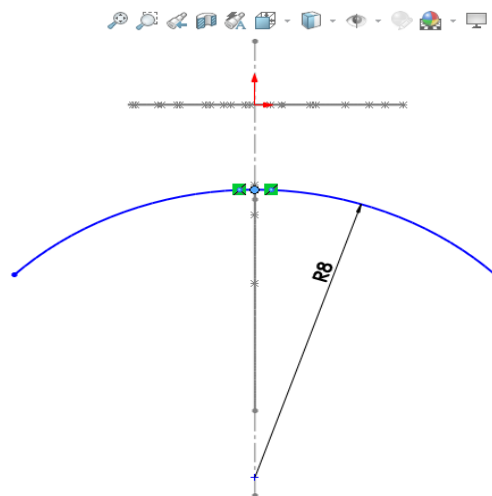
**Nota:** La distancia entre los croquis no es relevante ya que el croquis de la vista planta será usado para un corte de superficies en los siguientes pasos, y esta distancia no influye en el corte.

### C. Modelamiento de croquis plano Lateral:

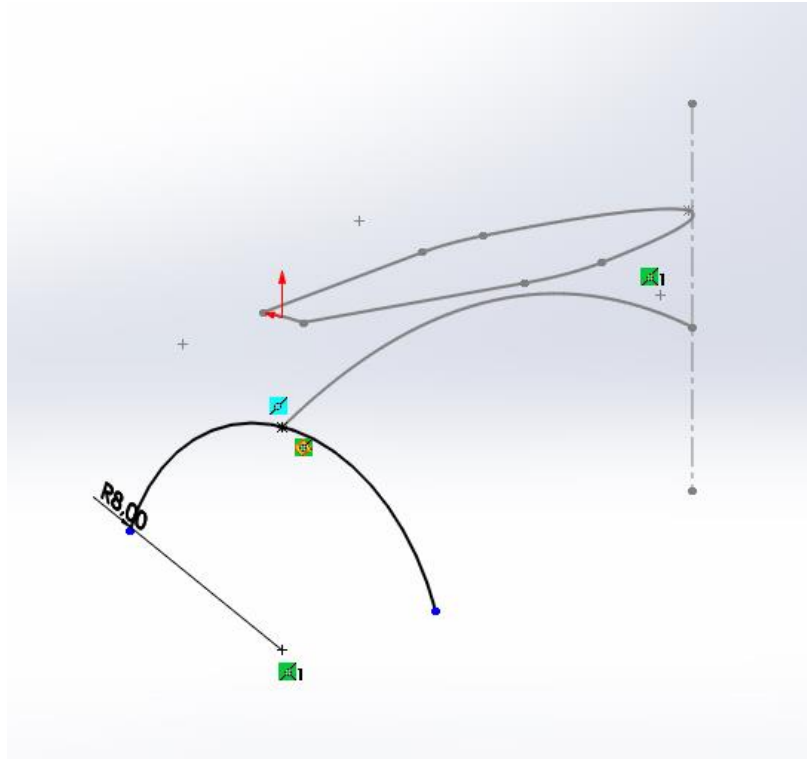


Se crea un plano paralelo a la vista lateral, y se hace coincidente con el punto más exterior del lado más estrecho del plano alzado.

Se crea un nuevo croquis en este plano, el cual consiste en un arco de 3 puntos, y se coloca un punto en el centro de este arco, se acota con un valor de aproximadamente 8mm, tal y como se observa en la siguiente imagen, esta cota no debe tener un valor estándar, ya que puede variar.

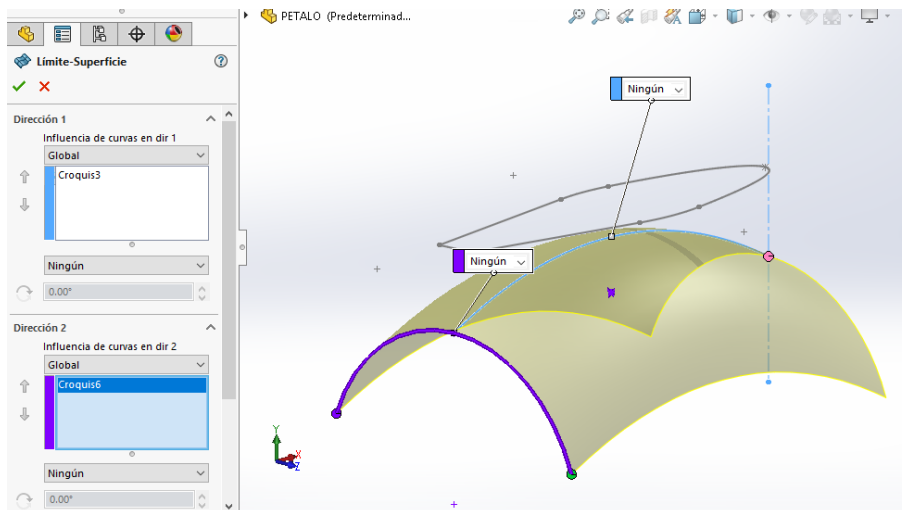


Ahora se mueve un poco el modelo, se selecciona el punto creado en el croquis anterior y el croquis de la curva por ecuación y se la opción de perforar.



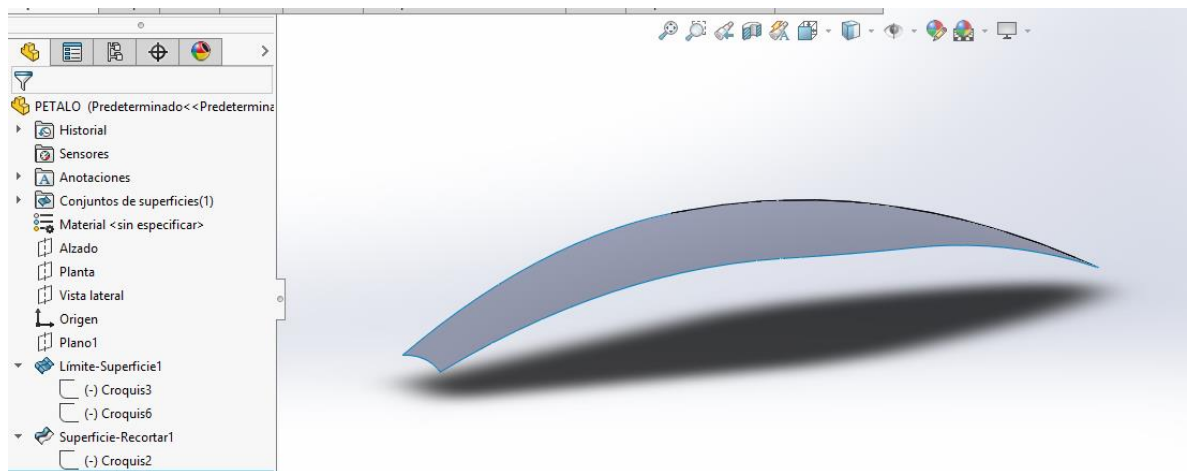
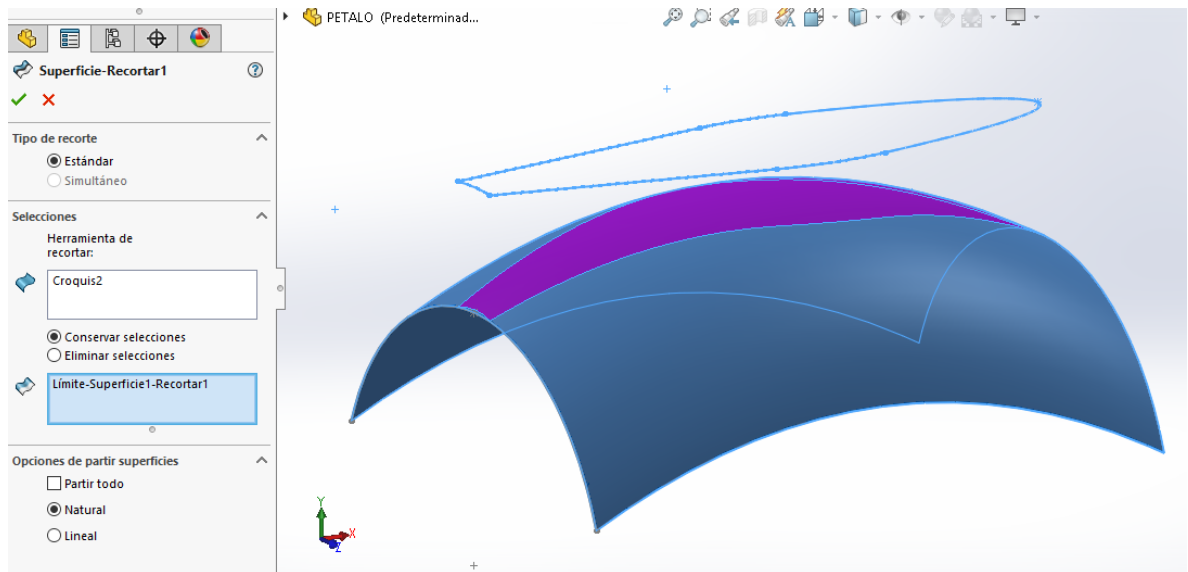
#### D. Modelamiento superficie:

Ahora se procede a seleccionar la operación **Superficie limitante**, y se selecciona en la Dirección 1 = Croquis de la ecuación, y en la Dirección 2= El Croquis del plano lateral y se da clic en realizar operación.



### E. Corte de la superficie:

Ahora se procede a seleccionar la operación **Recortar superficie**, y se selecciona en la Opción 1 = Croquis del plano planta, y en la opción 2= se selecciona el sólido formando en la operación anterior (se da clic dentro de la forma del pétalo) y se da clic en realizar operación.



#### **F. Dar espesor al modelo:**

Operación Dar espesor de superficie, y se da un valor, este depende de la necesidad del usuario.

**Conclusión:** Este método de modelamiento 3D es muy efectivo y fácil de usar, su porcentaje de efectividad depende de:

- Resolución de la cámara.
- Técnica, y capacidad humana en la toma de las fotografías.
- Precisión humana al momento de crear los croquis y dimensionar las imágenes insertadas con ayuda del cuadro guía.

Se recomienda su uso para aquellas personas que no disponen de un escáner 3d, además es posible modelar muchos más objetos.

Pero al ser un método donde las capacidades humanas garantizan una mayor o menor precisión se optó por el uso de un escáner 3D. Aun así, se especificó detalladamente este ya que es posible que sirva a la comunidad estudiantil y científica.

## Anexo C

### ANÁLISIS CFD

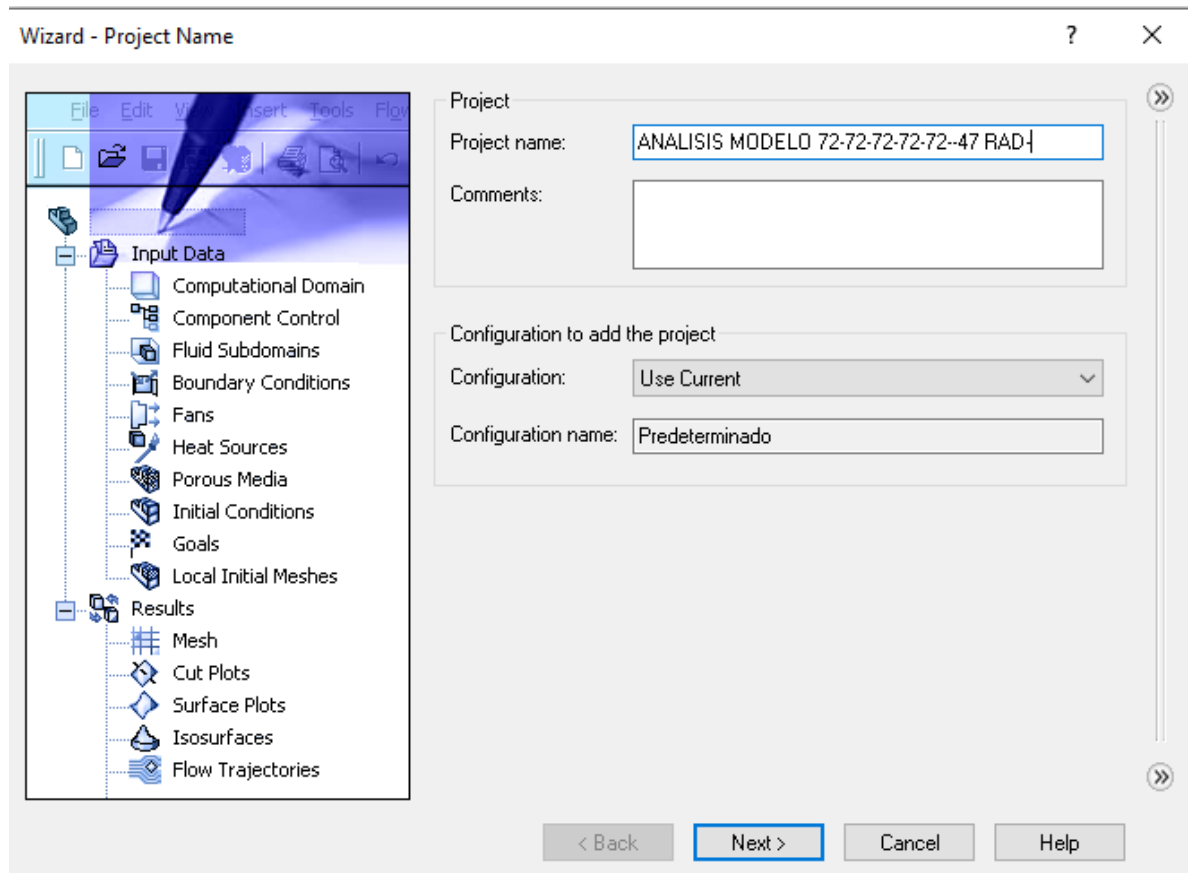
#### A. Software:

El software usado para este análisis es Flow simulation SolidWorks 2020.

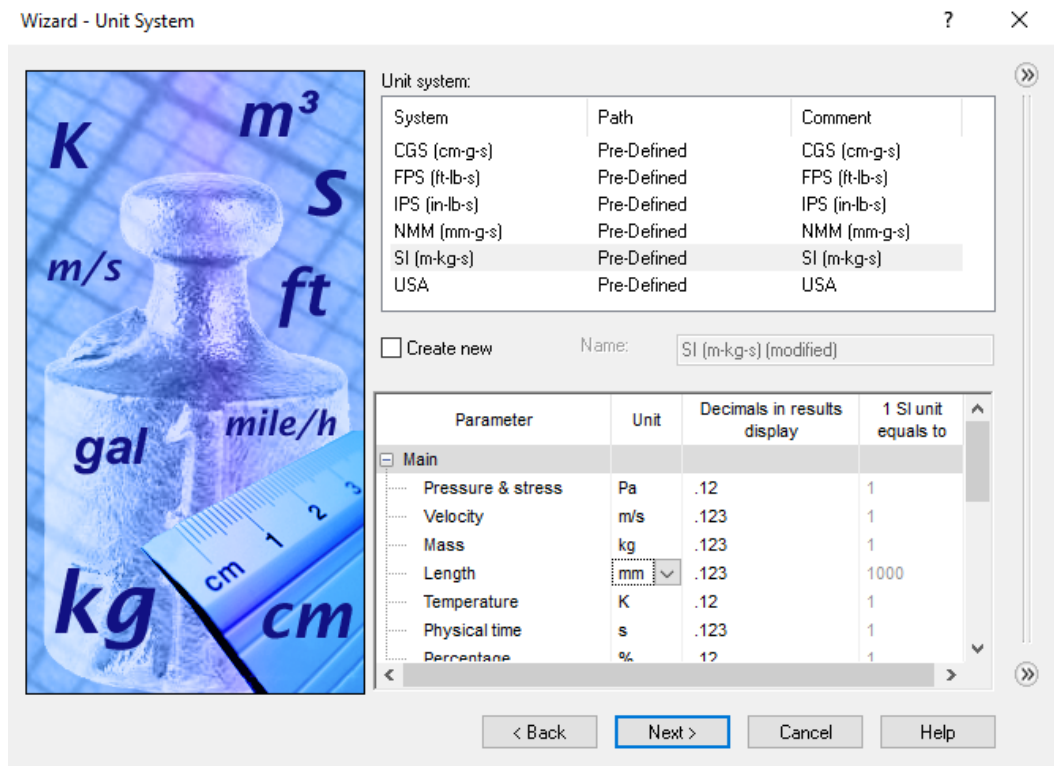
#### B. Proceso:

##### I. Definición de parámetros generales.

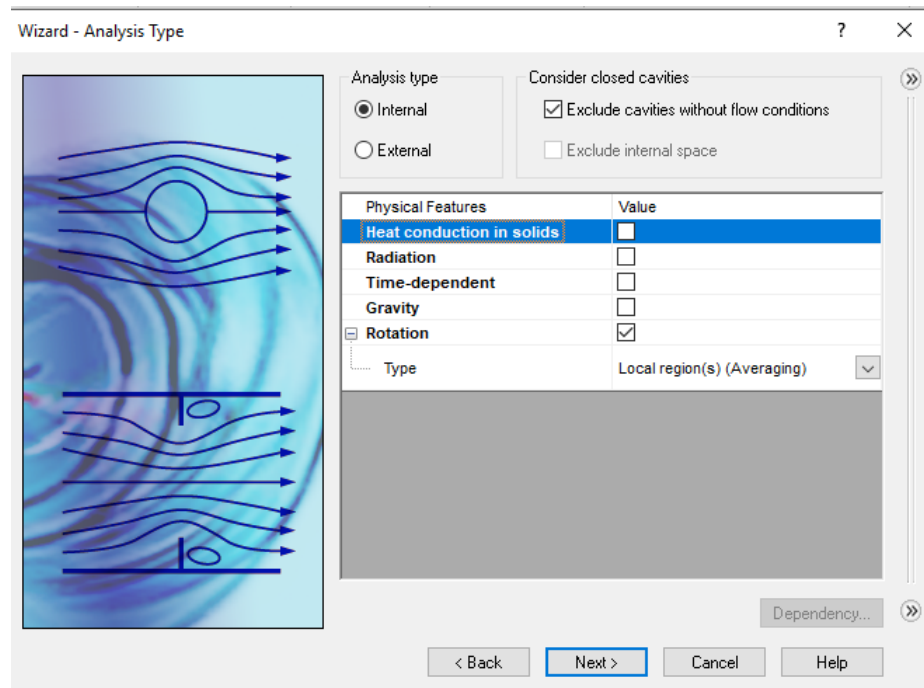
1. Una vez se tiene el modelo 3D del modelo, se procede a buscar la pestaña de Flow simulation y luego se da clic en Wizard, para crear el análisis aerodinámico.
2. Se procede a nombrar el nuevo proyecto, la configuración se deja “Use Current” y se da clic en Next.



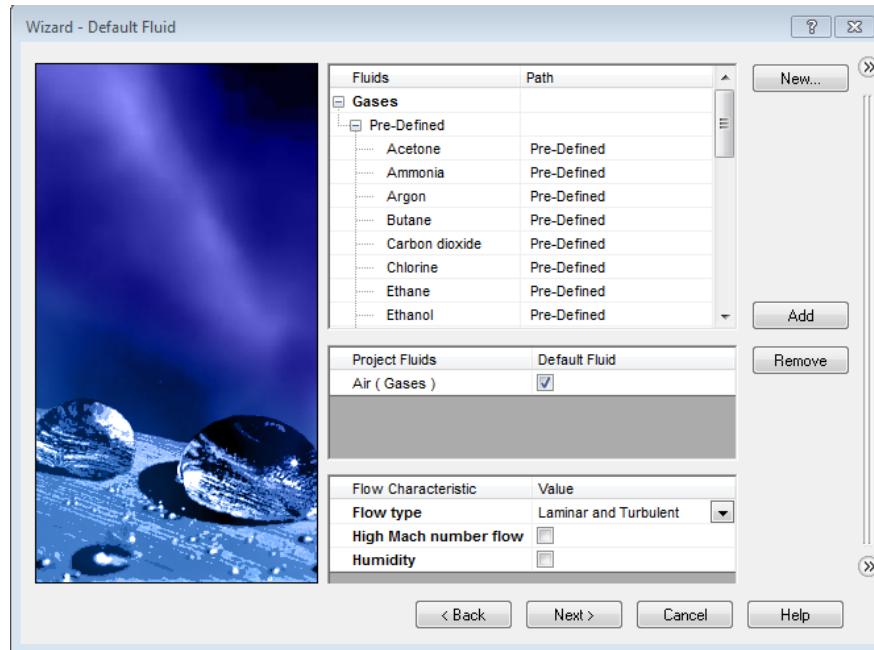
3. Ahora se selecciona el sistema de unidades “SI (m-kg-s)” y se cambia las unidades de longitud por mm, luego se da clic en Next.



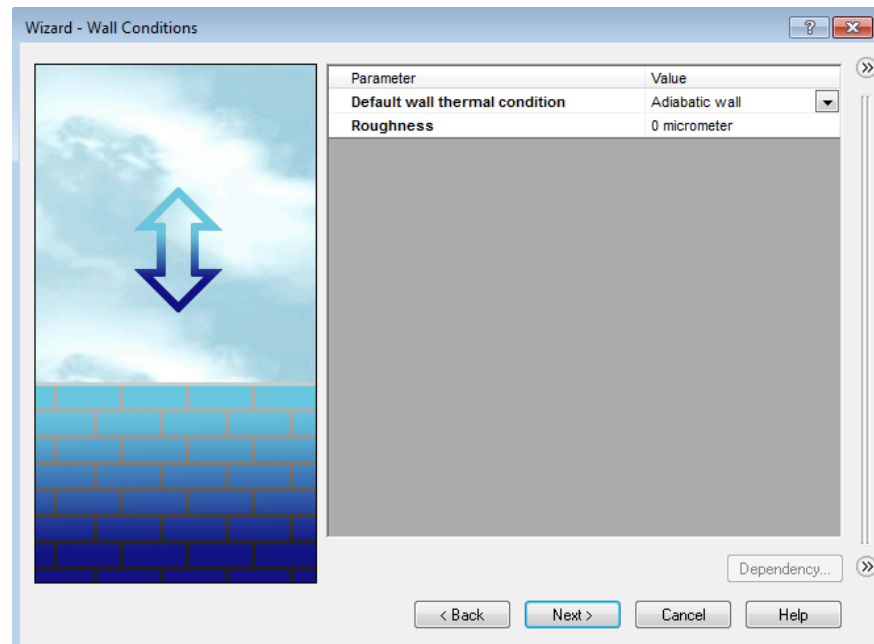
4. Luego se selecciona la opción de tipo de análisis “Interno”, se deja las demás configuraciones por defecto, y se selecciona rotación.



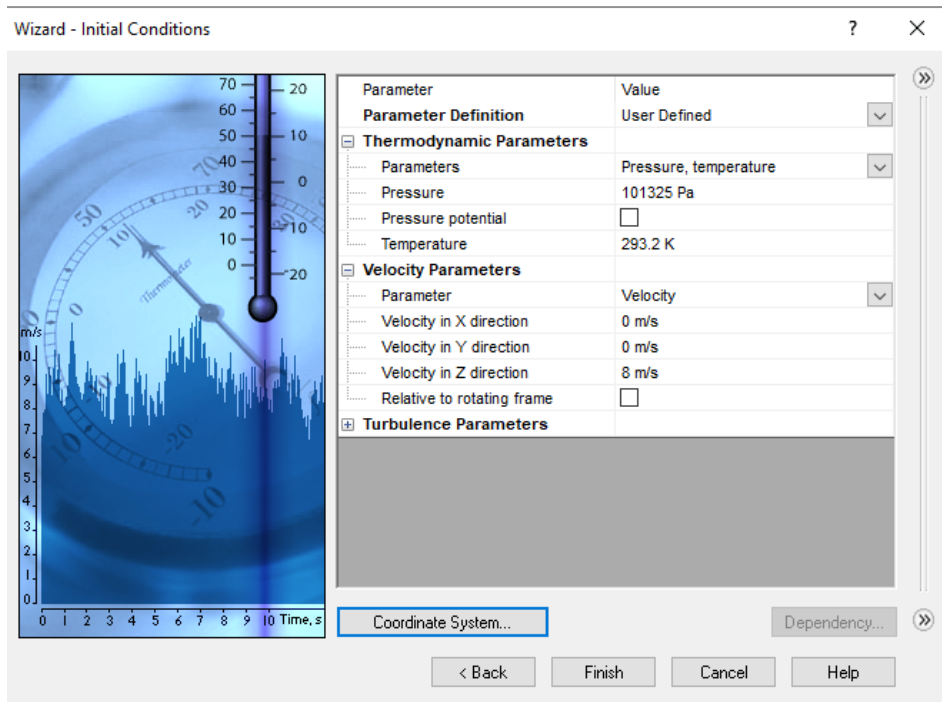
5. De fluido se selecciona aire y se da clic en Next.



6. Luego simplemente se da Next y se deja la configuración tal y como aparece.



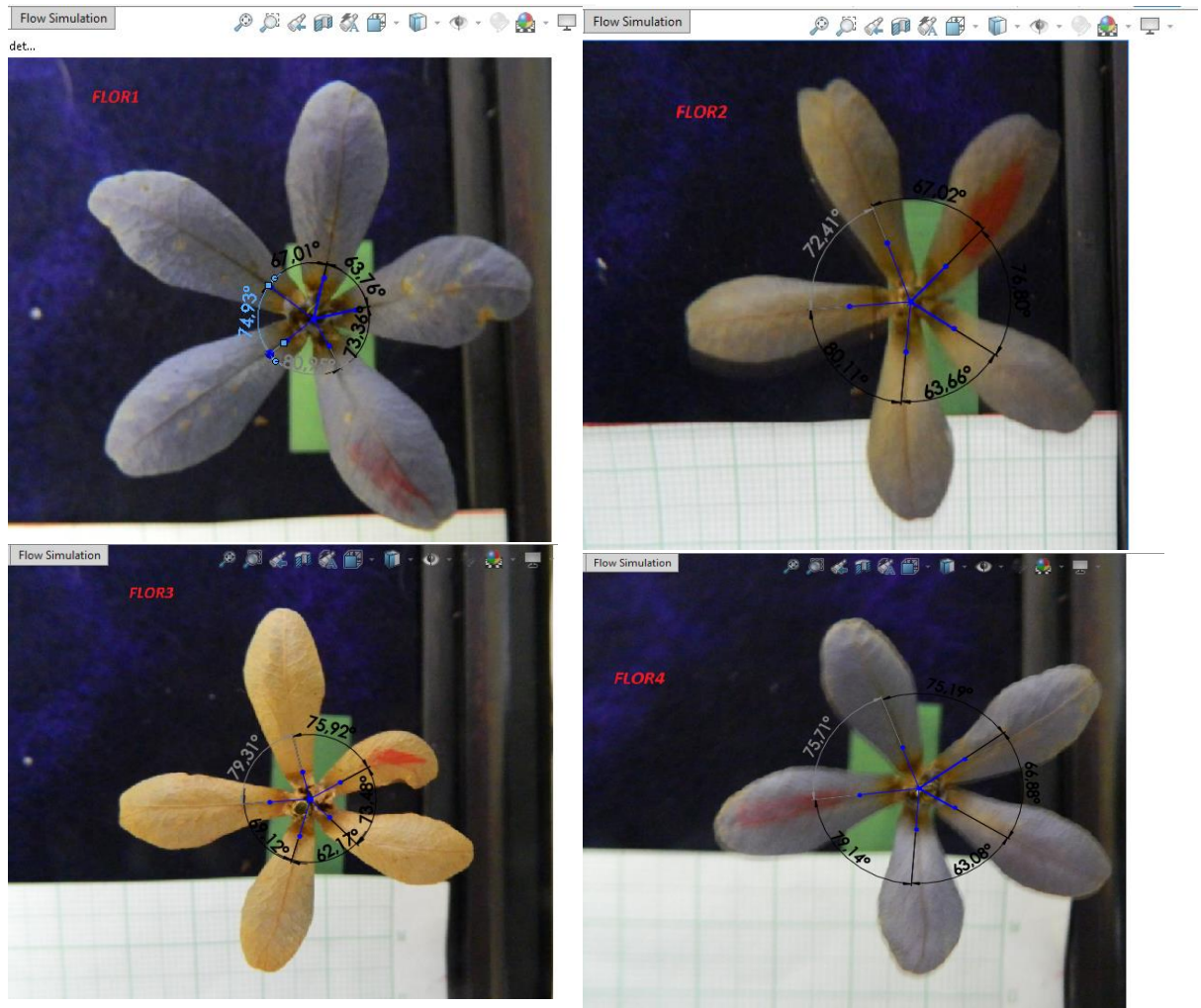
7. La temperatura es la estandar, la presion tambien, simplemente se da una velocidad de 8 m/s en direccion Z positivo.

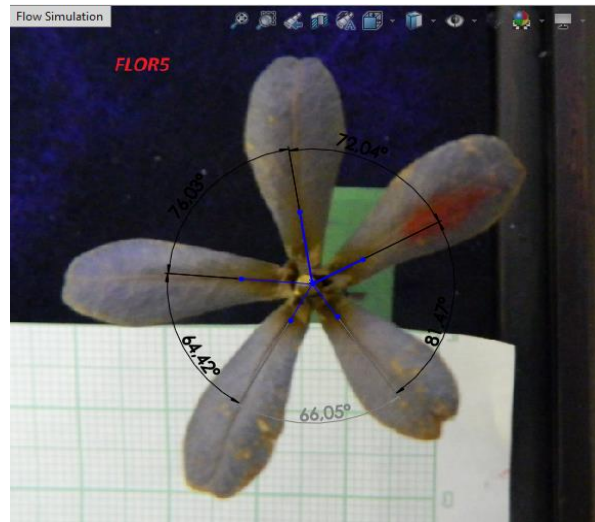


## Anexo D

### OBTENCIÓN DE LA GEOMETRÍA ENTRE PETALOS PROPUESTA POR EL AUTOR.

Este proceso se llevó a cabo gracias al programa Solidworks, con él y con las fotos tomadas de la vista superior de cada flor, se pudo obtener los valores aproximados de estos ángulos, los cuales se presentan a continuación, además se aclara que simplemente se insertó la foto respectiva en Solidworks (Herramientas de croquis) y con ayuda de la herramienta croquis, se crearon líneas (Sobre la foto) que luego se acotaron. Las flores seleccionadas fueron distintas a las del análisis del cuerpo del trabajo. Y este análisis se realizó previo a perfeccionar la técnica de modelamiento.





La información obtenida se presenta en la siguiente tabla.

FLOR 1 $\sphericalangle$	FLOR 2 $\sphericalangle$	FLOR 3 $\sphericalangle$	FLOR 4 $\sphericalangle$	FLOR 5 $\sphericalangle$
80.958°	80.11°	79.31°	79.14°	81.47°
74.93°	72.41°	75.92°	75.71°	66.05°
67.01°	67.02°	73.48°	75.19°	64.42°
63.76°	76.80°	62.17°	66.88°	76.03°
73.36°	63.66°	69.12°	63.08°	72.04°

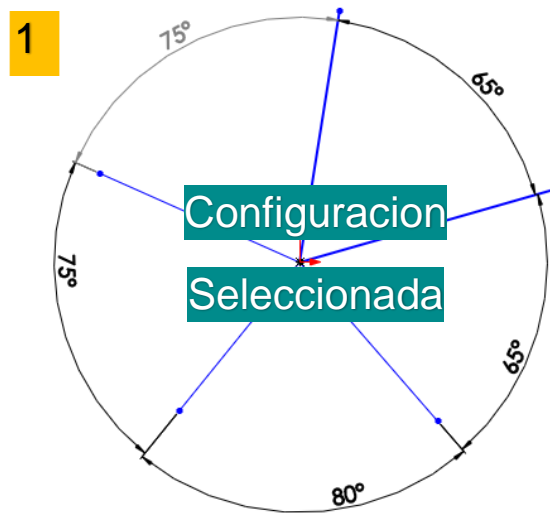
Para llevar a cabo el análisis de la anterior tabla se usa como ayuda didáctica colores.

	Cada flor tiene un $\sphericalangle$ cercano a 80°
	Cada flor tiene un par de $\sphericalangle$ cercanos a 75°
	Cada flor tiene un par de $\sphericalangle$ cercanos a 65°

- Según las Flores 3 Y 4 la configuración sería (80°-75°-75°-65°-65°) sentido horario.
- Según la Flor 5 (80°-65°-65°-75°-75°) sentido anti horario.
- 4 de las 5 Flores poseen sus  $\sphericalangle$  de 65° consecutivos, por lo cual estos se mantendrán así en la configuración final.

Al analizar toda esta información obtenida se determinó que la configuración más indicada para la creación de los 5 modelos de flores para el análisis CFD, sería la configuración: (80°-75°-75°-65°-65°) sentido horario.

Como se pudo ver se estandarizo una configuración, ya que al tratarse de un proyecto que busca el diseño de una turbina eólica, es prioridad garantizar la estabilidad de esta, por tal motivo, se trató de unificar estos valor de ángulos, ya que, tanto para cuestiones de diseño como de manufactura, es mejor tener valores estándares. A continuación, se muestra la configuración seleccionada.



La naturaleza experimenta con distintos ángulos y configuraciones, a pesar de que ya se seleccionó la configuración a usar, se espera una vez se haya definido el Modelo final de la turbina, probar estas otras configuraciones. (Con distintas Posiciones de sus pares de  $\alpha$ ).

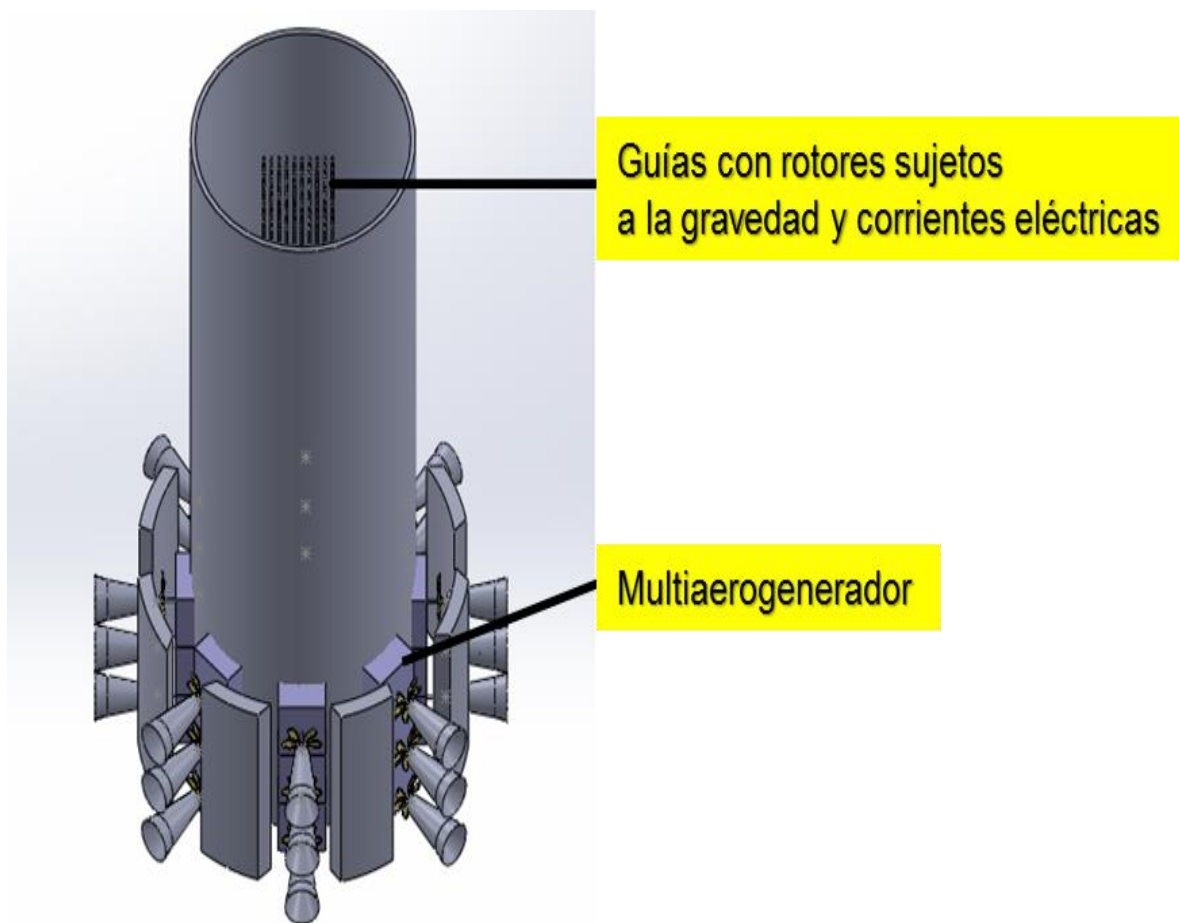
## Anexo E

### FUTURAS INVESTIGACIONES

#### 1. Generación de energía por medio de la energía potencial.

La característica más notoria de la flor del árbol *Pétrea volubilis*, es que esta flor usa el principio de autor rotación (principio usado en los helicópteros), lo cual le permite al momento de la caída del árbol girar rápidamente.

Debido a las pocas investigaciones realizadas a esta flor, se desconoce la razón por la cual evoluciono de esta forma; aun así, es posible usar este diseño de la naturaleza para generar energía, al convertir la energía potencial en energía eléctrica.



Para ello, se necesitaría de un sistema que permita que las flores almacén energía cuando rotan al caer, y otro sistema que las impulsen hacia arriba, de esta forma se conseguirá producir energía.

El sistema que impulsaría las flores hacia arriba podría generarse gracias al magnetismo, al inducir una corriente eléctrica en una placa, se podría conseguir que las flores retornen a su posición inicial.