



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE MECATRÓNICA

**DESARROLLO DE LAS ASPAS DE GENERADOR EÓLICO A
ESCALA CON DISEÑO TOPOLÓGICO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTOR: Fidel Alexis Campuzano Medina

TUTOR: Juan Pablo Vera Figueroa

Guayaquil - Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Fidel Alexis Campuzano Medina** con documento de identificación N° **0929504447** manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

Guayaquil, 1 de Marzo del año 2024

Atentamente,



Fidel Alexis Campuzano Medina
0929504447

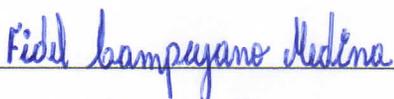
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, **Fidel Alexis Campuzano Medina** con documento de identificación N° **0929504447** expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del **Dispositivo Tecnológico: DESARROLLO DE LAS ASPAS DE GENERADOR EÓLICO A ESCALA CON DISEÑO TOPOLÓGICO**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 1 de Marzo del año 2024

Atentamente,



Fidel Alexis Campuzano Medina
0929504447

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Juan Pablo Vera Figueroa**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE LAS ASPAS DE GENERADOR EÓLICO A ESCALA CON DISEÑO TOPOLÓGICO**, realizado por **Fidel Alexis Campuzano Medina** con documento de identificación N° **0929504447** obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 1 de Marzo del año 2024

Atentamente,



Ing. Juan Pablo Vera Figueroa, Mg.
0910678614

DEDICATORIA

Agradezco primero a Dios y luego a mi madre, mi abuelita y mi tía por siempre brindarme su apoyo en todo momento de este en este proceso de 5 años de estudios universitarios.

Fidel Alexis Campuzano Medina

AGRADECIMIENTO

Agradezco principalmente a Dios, a mi madre, mi abuelita y mi tía por apoyo incondicional que estuvieron para darme todo su apoyo en todo momento de la carrera universitaria.

Agradezco a mi amiga ing. Geanella Scott Suárez por su paciencia por su tiempo en ayudarme en este proceso de realizar la tesis.

Agradezco al ing. David Cortez por ayudarme con la revisiones de la tesis al igual que el ing. Jaun Pablo Vera.

Fidel Alexis Campuzano Medina

RESUMEN

El objetivo del presente proyecto consiste en implementar la fabricación de dos tipos de aspas de generador eólico, aplicando criterios de optimización topológicos utilizando materiales de Fibra de Vidrio y Fibra de Carbono, con el fin de seleccionar el mejor material.

Se utilizará el programa de software solidworks para aplicar la optimización de topología, que consistirá en la reducción de material en las aspas propuestas de los diferentes materiales.

La implementación de un prototipo a escala se llevará a cabo para realizar pruebas de las aspas propuestas y determinar qué material es más eficiente y cuál genera más energía.

Palabras claves: Solidworks, Aspas de Fibra de Vidrio, Aspas de Fibra de Carbono, Diseño, Topología.

ABSTRACT

The objective of this project is to implement the manufacture of two types of wind generator blades, applying topological optimization criteria using fiberglass and carbon fiber materials, in order to select the best material.

The Solidworks software program will be used to apply the topology optimization, which will consist of the reduction of material in the proposed blades of the different materials.

The implementation of a scale prototype will be carried out to test the proposed blades and determine which material is more efficient and which generates more energy.

Keywords: solidworks, Fiberglass blades, Carbon Fiber blades, Design, topology.

ÍNDICE

I.	Introducción	1
II.	Problema	2
III.	Justificación	3
IV.	Objetivos	4
IV-A.	Objetivo general	4
IV-B.	Objetivos específicos	4
V.	Fundamentos Teóricos	5
V-A.	Función del generador eólico	5
V-B.	Cómo se obtiene la energía eólica	5
V-C.	Captura del viento	5
V-D.	Potencia generada	5
V-E.	Potencia del viento	6
V-F.	Sistema de transmisión	7
V-G.	Tipos de materiales	7
V-H.	Fibra de Vidrio	7
V-I.	Fibra de Carbono	7
VI.	Experiencia con el uso de materiales en la fabricación de aspas	8
VI-A.	Aspas de poliéster	8
VI-B.	Aspas Fibra de Vidrio	8
VI-C.	Aspas Fibra de Carbono	8
VI-D.	Topología	9
VI-E.	Variables del diseño de las aspas	9
VI-F.	Peso	9
VI-G.	Resistencia	9
VI-H.	Deflexión del aspas	10
VI-I.	Fatiga	10
VI-J.	Esfuerzos cortantes	10
VI-K.	Herramientas para la elaboración de generador eólico	10
VI-K1.	Motor eléctrico	10
VI-K2.	Base de las aspas de material de aluminio	11
VI-K3.	Cables	11
VI-K4.	Soporte metálico	11
VI-K5.	Multímetro	12
VI-K6.	Fibra de Vidrio	12
VI-K7.	Resina	12
VI-K8.	Catalizador	13
VI-K9.	Fibra de carbono	13
VII.	Marco Metodológico	14
VII-A.	Software solidworks	14
VII-B.	Análisis aerodinámico	14
VII-C.	Malla de elementos finitos	15
VII-D.	Pandeo	15

VII-E.	Diseño modelos de aspas para la implemetación de materiales de Fibra de Carbono y de Fibra de Vidrio	16
VII-F.	Diseño de aspas de Fibra de Vidrio	17
VII-G.	Diseño de aspas de Fibra de Carbono	19
VII-H.	Fabricación de los dos tipos de aspas propuesto en diferentes materiales	21
VIII.	Resultados	22
VIII-A.	Aplicación de topología en aspas del material de Fibra de Vidrio	22
VIII-B.	Aplicación de topología en aspas de Fibra de Carbono	23
VIII-C.	Diseño en físico aspas de Fibra de Vidrio	26
VIII-D.	Diseño en físico de la aspas de Fibra de Carbono	27
VIII-E.	Potencia de corriente alterna	29
IX.	Cronograma	31
X.	Presupuesto	33
XI.	Conclusiones	34
XII.	Recomendaciones	34
	Referencias	35

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Generador eólico. <i>Fuente: Autor</i>	5
2.	Fibra de Vidrio. <i>Fuente: Autor</i>	7
3.	Fibra de Carbono. <i>Fuente: Autor</i>	7
4.	Aspas material de Fibra de Vidrio. <i>Fuente: Autor</i>	8
5.	Aspas material Fibra de Carbono. <i>Fuente: Autor</i>	8
6.	Topología. <i>Fuente: Autor</i>	9
7.	Motor eléctrico. <i>Fuente: Autor</i>	10
8.	Base de aspas. <i>Fuente: Autor</i>	11
9.	Cable número 12. <i>Fuente: Autor</i>	11
10.	Soporte metálico del generador eólico. <i>Fuente: Autor</i>	11
11.	Multímetro. <i>Fuente: Autor</i>	12
12.	Filamento de Fibra de Vidrio. <i>Fuente: Autor</i>	12
13.	Resina. <i>Fuente: Autor</i>	12
14.	Catalizador. <i>Fuente: Autor</i>	13
15.	Filamento Fibra de Carbono. <i>Fuente: Autor</i>	13
16.	Uso de solidworks aplicado la topología. <i>Fuente: Autor</i>	14
17.	Análisis aerodinámico [26].	15
18.	Malla de elemetos finitos [28].	15
19.	Piezas pandeo [30].	15
20.	Diseño modelos de aspas. <i>Fuente: Autor</i>	16
21.	Uso de la herramientas de escala en software. <i>Fuente: Autor</i>	16
22.	Prototipo a escala. <i>Fuente: Autor</i>	17
23.	Diseño de aspas de Fibra de Vidrio. <i>Fuente: Autor</i>	17
24.	Tabla de propiedades Fibra de Vidrio. <i>Fuente: Autor</i>	18
25.	Propiedades física de Fibra de Vidrio. <i>Fuente: Autor</i>	19
26.	Diseño de aspas de Fibra de Carbono. <i>Fuente: Autor</i>	19
27.	Tabla de densidad Fibra de Carbono. <i>Fuente: Autor</i>	20
28.	Propiedades de Fibra de Carbono. <i>Fuente: Autor</i>	20
29.	Diseño de aspas para realizar los prototipos. <i>Fuente: Autor</i>	21
30.	Impresión en 3D de Fibra de Carbono. <i>Fuente: Autor</i>	21
31.	Inició de aplicación topología en aspas de Fibra de vidrio. <i>Fuente: Autor</i>	22
32.	Reduccion de masa de Fibra de Vidrio. <i>Fuente: Autor</i>	22
33.	Resultado de topología de Fibra de Vidrio. <i>Fuente: Autor</i>	23
34.	Inició de aplicación topología en aspas de Fibra de Carbono. <i>Fuente: Autor</i>	23
35.	Reducción de masa. <i>Fuente: Autor</i>	24
36.	Inició de optimización topología. <i>Fuente: Autor</i>	24
37.	Resultado final de optimización topología. <i>Fuente: Autor</i>	25
38.	Peso de aspas de Fibra de Carbono. <i>Fuente: Autor</i>	26
39.	Implemetación de aspas de Fibra de Vidrio. <i>Fuente: Autor</i>	26
40.	Voltaje que genero la aspas de Fibra de Vidrio. <i>Fuente: Autor</i>	27
41.	Peso de aspas de Fibra de Carbono. <i>Fuente: Autor</i>	27
42.	Implemetación Fibra de Carbono. <i>Fuente: Autor</i>	28
43.	Voltaje que genero el aspas de Fibra de Carbono. <i>Fuente: Autor</i>	29
44.	Prototipo de aspas escala para impresión 3D.	37
45.	Impresión en 3D de Fibra de Carbono.	37
46.	Aspas Fibra de Carbono.	38
47.	3 aspas Fibra de Carbono.	38
48.	Molde para diseño de aspas de Fibra de Vidrio.	39
49.	3 aspas de Fibra de Vidrio.	39

50.	Pruebas de aspas de Fibra de Vidrio.	40
51.	Perfil de aspas de Fibra de Vidrio.	41
52.	Pruebas de aspas Fibra de Carbono.	41

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Tabla de datos cuánto genera las tomas de datos de los dos tipos de aspas	30
II.	Tabla de presentación de plan de actividades.	31
III.	Tabla de presentación de plan de actividades.	32
IV.	Costo de Materiales usado para la elaboración de la tesis	33

I. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables son una fuentes de recurso inagotables. Hoy en día las energía renovables o también llamadas energías limpias más utilizada son la energía fotovoltaica, y la energía eólica.

La energía limpias libre de emiciones de carbono, generadas con fuentes de energía renovables,es necesaria para reducir los impactos por emisiones de gases de efectos invernadero, que contribuyen a agravar el problema del cambio climático.

Por lo indicado, se debe maximizar el aprovechamiento de las energías renovables, siendo una de las opciones la optimización de la tecnología para su aprovechamiento, como es el caso de los generadores eólico.

II. PROBLEMA

El diseño de las aspas de un generador eólico más complejo en lugares donde existe poco viento, pues se debe optimizar dicho diseño para obtener la máxima cantidad de energía en función de la resistencia de las aspas sobre el flujo del viento, por lo cual será necesario llevar a cabo un diseño de las aspas tal que permita generar una fuerza de sustentación lo suficientemente grande para iniciar el giró del rotor a bajas velocidades de viento [1].

Disenar las aspas de un generador eólico tiende a ser un problema crítico donde se deben considerar factores de seguridad, pues el diseño que se haga procurará aprovechar la máxima potencia disponible del recurso eólico y a su vez resistir la carga aerodinámica distribuidas a lo largo de su longitud [2].

Los materiales usados para la elaboración de las aspas de un generador eólico son muy alto costó en el mercado, materiales tales como Fibra de Boro, Fibra de aramidas, Fibra de Vidrio tipo E, Fibra de Vidrio tipo S, Fibras metálicas [3].

Actualmente no existe mayor información sobre el diseño de la geométría de las aspas de un generador eólico, aplicando topología interna, tal que permita lograr una geometría óptima en cuanto a su aerodinámica, su resistencia y el peso del material [4].

III. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto se origina a partir de la problemática de la escasa optimización de las aspas de un aerogenerador las cual presenta desafíos de diseño que son críticos. Por lo tanto, se nuestra como alternativa el diseñar un prototipo de aspa de un generador eólico, usando topología, actividad que va a mejorar el rendimiento del generador eólico y permitirá validar la eficiencia de la energía generada.

Este proyecto constituye un estudio técnico que permitirá validar la eficiencia y optimización de las aspas de un generador eólico. Como alternativa se desarrollarán varios prototipos a escala de las aspas de un generador eólico, con el uso de la simulación y topología en solidworks lo cual permitirá analizar y seleccionar cuál diseño sería mejor y más eficiente en producir energía eléctrica [5].

IV. OBJETIVOS

IV-A. Objetivo general

Desarrollar un prototipo de aspas de generador eólico considerado un diseño topológico.

IV-B. Objetivos específicos

- Diseñar varios modelos de aspas de un generador eólico para la selección del mejor modelo de simulación aplicando conceptos topológicos.
- Fabricar las aspas que permitan su implementación en generador eólico.
- Validar el prototipo mediante la comparación de la energía generada por las aspas originales.

V. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

V-A. Función del generador eólico

Generar energía eólica es un proceso que aprovecha un recurso renovable e inagotable generado por el viento. Este proceso se lleva a cabo mediante las aspas de un generador eólico o aerogenerador, transformando la energía cinética del viento en energía eléctrica [6].



Figura 1. Generador eólico. Fuente: Autor .

El generador de energía eólica está compuesto por aspas, que giran en movimiento rotatorio al pasar el viento por su estructura. Este está conectado a diferentes tipos de engranaje que con ello convierten la energía cinética en energía eléctrica [7].

V-B. Cómo se obtiene la energía eólica

V-C. Captura del viento

Los generadores eólicos están ubicados en lugares estratégicos donde hay vientos constantes y de magnitud adecuada, aprovechando así la máxima eficiencia para la generación de energía. Para esto se construyen torres de gran altura, considerando que la velocidad del viento es mayor conforme se incrementa la altura [8].

V-D. Potencia generada

La energía mecánica del generador eólico producida por el viento se transfiere mediante el giro rotatorio de un eje, a un generador eléctrico, obteniéndose como resultado energía eléctrica. La ecuación general para calcular la potencia extraíble mediante un aerogenerador es la siguiente.

$$E = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot U^3$$

Donde:

- ρ : Densidad del aire, en $\frac{Kg}{m^3}$.
- A : Área de barrido de las palas del aerogénador, en m^2 .
- U : Velocidad media del viento a la altura de las palas, en $\frac{m}{s}$.

No obstante, existen limitantes aerodinámicas y mecánicas que impiden extraer la totalidad de energía del viento, razón por la cual el máximo de la potencia ocurre cuando la relación entre la velocidad del aire, de entrada al aerogénador y la velocidad del aire de salida es un tercio tal que la potencia se modifica por su factor de $\frac{16}{27}$. A esta proporción se la conoce como límite de Betz. La ecuación de la potencia eólica máxima, incluido el límite de Betz, es por tanto la siguiente [9].

$$P_{max} = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho * U^3 * A \right)$$

Diversos factores inciden en la eficiencia de la extracción de energía del viento, entre los que se deben listar los siguientes:

- La topografía del lugar y la presencia de obstáculos.
- La altura a la cual se localiza, la turbina eólica respecto al suelo.
- Cambios en magnitud y dirección del viento, durante el día y durante períodos del año.
- El comportamiento aerodinámico de las aspas del aerogénador, que depende de su forma, peso, dimensiones, entre otros.
- La orientación de las aspas con respecto a la dirección del viento.
- El número de aspas que tiene el aerogénador.

V-E. *Potencia del viento*

La potencia del viento representa la capacidad del viento para realizar trabajo, siendo medida por la cantidad de energía cinética que puede transmitir. Calcular esta energía cinética implica considerar la masa de aire, desplazada por unidad de tiempo a través de una superficie expuesta al viento [10].

$$E = \frac{1}{2} m * v^2$$

- E = Energía cinética.
- m = Masa del viento .
- V= Velocidad del viento.

V-F. Sistema de transmisión

La electricidad que se generó del generador eólico es transportada a través del sistema de transmisión eléctrico, adaptándose a la frecuencia de la red [11].

V-G. Tipos de materiales

Los diferentes tipos de materiales usados en las palas de un aerogenerador son fibras de origen natural, sintético o artificial. Incluye materiales de uso de aeroespacial y automotriz, para la elaboración de piezas con el menor peso y mayor resistencia y rigidez posibles [12].

V-H. Fibra de Vidrio

Se trata de un material compuesto, conformado por hebras de material de sílice y de filamentos de vidrio; es un material muy fuerte y rígido lo que hace que tenga una buena resistencia, durabilidad y propiedades de aislante térmico. A su vez, la Fibra de Vidrio es un material muy liviano, y es muy utilizado en procesos de manufactura donde se busca reducir el peso en piezas de uso aeroespacial y automotriz [13].



Figura 2. Fibra de Vidrio. Fuente: Autor.

V-I. Fibra de Carbono

Pertenece al grupo de materiales compuestos, y está conformado por filamentos de carbono. Es un material muy utilizado en variedades de aplicaciones por su alta resistencia, flexibilidad, bajo peso; posee una rigidez tal que puede mantener su forma cuando está bajo cargas muy grandes. Tiene una alta tolerancia a las altas temperaturas. Su aplicación abarca diversidad de áreas tales como la industria aeroespacial, la industria automotriz, artículos deportivos y en la construcción [14].



Figura 3. Fibra de Carbono. Fuente: Autor.

VI. EXPERIENCIA CON EL USO DE MATERIALES EN LA FABRICACIÓN DE ASPAS

VI-A. *Aspas de poliéster*

Este tipo de aspas están hechas de materiales livianos, pero a su vez rígidos y muy resistentes; el poliéster es usado por su durabilidad lo que permite que pueda girar con eficiencia y con velocidades de viento moderados [15].

VI-B. *Aspas Fibra de Vidrio*

En este tipo de diseño y fabricación, las aspas de Fibra de Vidrio son ligeras por estar huecas, pero son sumamente resistentes; se usan para para optimizar la generación de energía eólica por lo que resulta en una alta eficiencia y una baja carga de operación, además de permitir una operación silenciosa y libre de vibración. En su funcionamiento, pueden trabajar con altas velocidades de viento dando una mayor optimización en la generación de energía [16].



Figura 4. Aspas material de Fibra de Vidrio. *Fuente: Autor.*

VI-C. *Aspas Fibra de Carbono*

En el diseño de aspas de Fibra de Carbono, dicho material es fuerte y ligero tal que permite la optimización de la generación de energía eólica; su alcance es mucho mayor [17].



Figura 5. Aspas material Fibra de Carbono. *Fuente: Autor.*

VI-D. Topología

Es el estudio que se realiza a un diseño o un prototipo tal que permite su optimización en la elaboración de una nueva pieza a desarrollar, mejorándola desde su origen, para poder tener el mejor modelo posibles reducción de masa y a la vez manteniendo su capacidad de soportar las cargas, pero con menos material que en un inicio, De esta forma se puede obtener una pieza mejorada, en el presente caso un aspa, que será integrada en la estructura de un generador eólico [18].

La optimización topológica busca:

- Piezas con menos peso y más ligeros desde su origen.
- Obtener rigidez-peso.
- Minimizar masa de la pieza, a la cual se le está aplicado el análisis topológico.
- El Objetivo de la topología es la reducción de peso y siempre minimizar la masa.
- Obtener una pieza o un componente más eficiente.

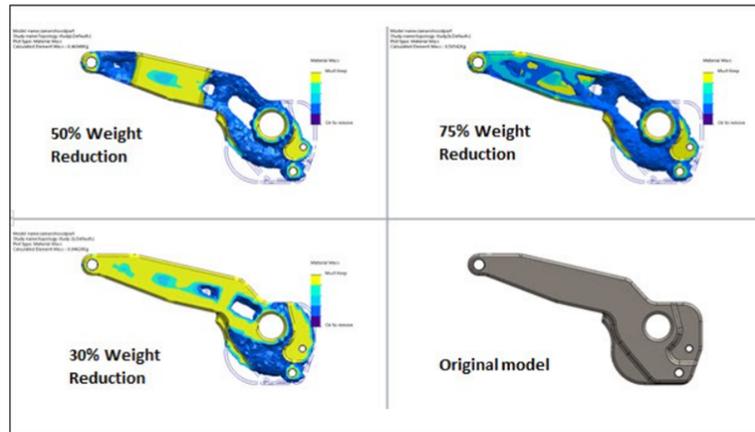


Figura 6. Topología. Fuente: Autor.

VI-E. Variables del diseño de las aspas

VI-F. Peso

El diseño de las aspas de un generador eólico siempre debe de considerar el peso de las mismas, el cual puede aumentar durante el proceso de fabricación según los materiales empleados; en principio, el peso actúa en la dirección de la gravedad y la fuerza centrífuga en la dirección radial, generando esfuerzos sobre el eje de rotación de las aspa [19].

VI-G. Resistencia

Es la capacidad de los materiales para soportar las cargas y tensiones generadas por la acción del viento sobre las aspas, por lo que hay que tener en cuenta la variabilidad de propiedades de resistencia de los materiales utilizados [20].

VI-H. Deflexión del aspas

La deflexión de las aspas de un generador eólico es motivo de análisis, a fin de determinar cómo las cargas y tensiones afectan la integridad y el rendimiento de las aspas. Dicha deflexión se puede calcular mediante métodos basados en modelos de elementos finitos [21].

VI-I. Fatiga

Sirve para identificar los casos de cargas críticas que puedan afectar el tiempo de vida de aspas del aerogenerador, las que podrían fracturarse debido al daño acumulado por fatiga del material [22].

VI-J. Esfuerzos cortantes

Está relacionado con los esfuerzos producidos sobre un material, por las fuerza que actúan en una dirección paralela a una superficie específica y en sentido contrario dentro de un material, las cuales tiende a causar deslizamiento o deformación. Se calcula como fuerza por unidad de área y se expresa en unidades de presión, como pascales (Pa) o megapascales (MPa).

se calcula utilizando la siguiente formula:

$$T = \frac{F}{A}$$

- T = Es el esfuerzo cortante .
- F = Es la fuerza aplicada paralela a la superficie .
- A = Es el area sobre la cual se aplica la fuerza.

VI-K. Herramientas para la elaboración de generador eólico

VI-K1. Motor eléctrico: Se utilizó un motor eléctrico como generador, esto a fin de llevar a cabo la toma de datos de la generación del voltaje producido por diferentes tipos de aspas. La corriente y el voltaje se producen en el motor debido a la interacción de los campos magnéticos producidos por las bobinas ubicadas dentro del motor cuando se produce el giro del eje.



Figura 7. Motor eléctrico. Fuente: Autor.

VI-K2. *Base de las aspas de material de aluminio:* Se diseñó una base fabricada con aluminio que sirvió de soporte de las aspas del modelo de generador eólico.



Figura 8. Base de aspas. Fuente: Autor.

VI-K3. *Cables:* Cable de hilos de cobre de número 12.



Figura 9. Cable número 12. Fuente: Autor.

VI-K4. *Soporte metálico :* Estructura metálica usada para la colocación de motor junto con la base y las aspas, a fin de poder accionar el mecanismo y tomar dato de voltaje y corriente.



Figura 10. Soporte metálico del generador eólico. Fuente: Autor.

VI-K5. *Multímetro*: Permitirá la obtención de datos, básicamente la medición de voltaje y corriente, cuando el mecanismo con las aspas se encuentre girando.



Figura 11. Multímetro. Fuente: Autor.

VI-K6. *Fibra de Vidrio*: Es un material que tiene numerosos filamentos basados en dióxido de silicio. Es muy resistente y es usado en la elaboración de pieza por su alta resistencia y poco peso.



Figura 12. Filamento de Fibra de Vidrio. Fuente: Autor.

VI-K7. *Resina*: la resina es un polímero que se usa adicional al catalizador para endurecer la Fibra de Vidrio refuerza la Fibra para poder realizar la fabricación de piezas.



Figura 13. Resina. Fuente: Autor.

VI-K8. *Catalizador*: Es una sustancia que se usa con la Fibra de Vidrio, se utiliza para iniciar la polimerización con la resina y hacer que se endurezca.



Figura 14. Catalizador. *Fuente: Autor.*

VI-K9. *Fibra de carbono*: Es una fibra sintética de filamentos compuestos principalmente por carbono. se utiliza para fabricar pieza automotriz y pieza aeroespacial por ser resistente y ligera.



Figura 15. Filamento Fibra de Carbono. *Fuente: Autor.*

VII. MARCO METODOLÓGICO

El objetivo del presente proyecto es diseñar, 3 tipos de prototipo a escala de aspas para un generador eólico aplicando conceptos topológicos. Para analizar la energía generada, cada prototipo se optimizará por medio de solidworks que permitirá su análisis y posterior fabricación, Las aspas serán de Fibra de Vidrio y Fibra de Carbono, su principal función consiste en mejorar la eficiencia en la energía producida al tener poca resistencia al viento, siendo a su vez muy resistentes debido a las cargas a las que están expuestas. Es decir, durante su operación o estado estacionario, las aspas deberán ser ligeras y resistentes para tener un mejor rendimiento. A su vez, la energía cinética, la cual se obtiene del movimiento del viento a través de las aspas, será aprovechada para convertirla en energía eléctrica mediante el movimiento de las aspas que harán girar un rotor produciendo así energía eléctrica [23].

VII-A. Software solidworks

Utilizar el programa de ingeniería y diseño industrial Solidworks para el diseño asistido por computadora (CAD), permite la creación de modelos en 3D y la generación de planos detallados. Con solidworks, es posible realizar simulaciones del comportamiento mecánico de las piezas diseñadas, y llevar a cabo una variedad de tareas relacionadas con el diseño y la ingeniería [24].

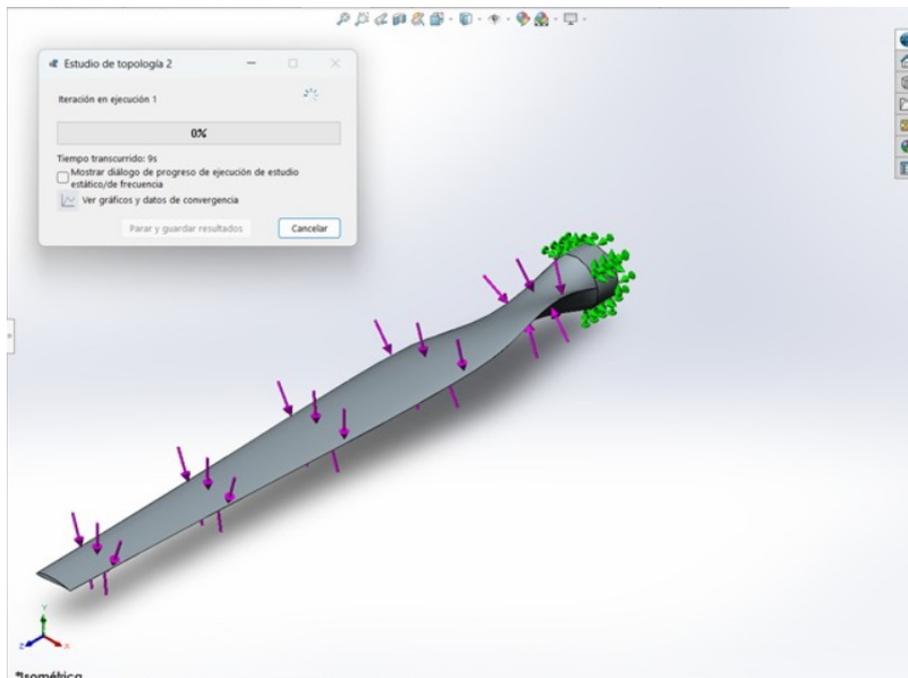


Figura 16. Uso de solidworks aplicado la topología. Fuente: Autor.

VII-B. Análisis aerodinámico

Para la optimización de la generación de energía eólica, se aplica el modelo topológico para el diseño aerodinámico en las aspas de poliéster, de Fibra de Vidrio y de Fibra de Carbono de la turbina eólica, usando el software de análisis de perfil aerodinámico de solidworks para obtener el coeficiente de rigidez del perfil [25].

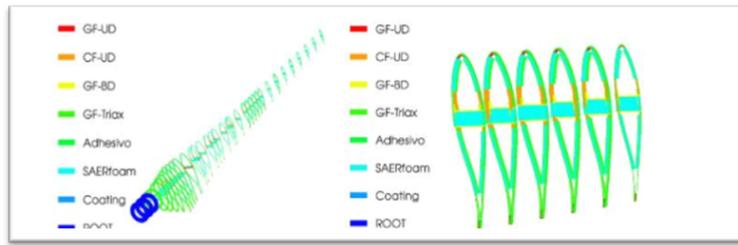


Figura 17. Análisis aerodinámico [26].

VII-C. Malla de elementos finitos

En una simulación computacional se usa una malla del elemento a analizar dentro del software solidworks, la cual se denomina malla de elementos finitos. Esta malla establece una determinada cantidad de puntos circunferenciales y radiales, que dividen al elemento en múltiples partes, para así poder realizar la simulación y optimización de la estructura del elemento [27].

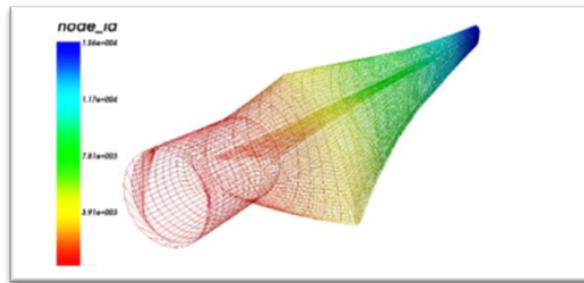


Figura 18. Malla de elemetos finitos [28].

VII-D. Pandeo

El pandeo es un modo de falla, visto como un fenómeno de flexión e inestabilidad elástica, para el presente caso produciría el cambio súbito de la configuración de las aspas, donde se alterará su estado de equilibrio tras experimentar una carga determinada [29].

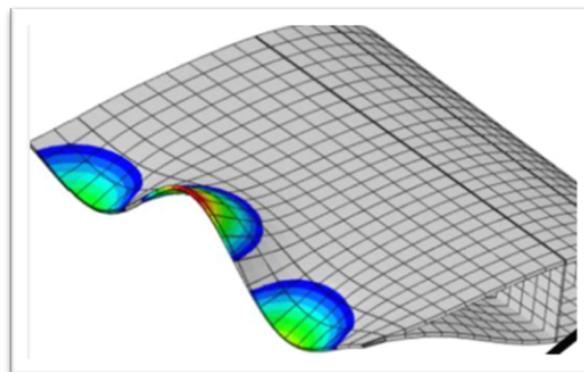


Figura 19. Piezas pandeo [30].

VII-E. Diseño modelos de aspas para la implemetación de materiales de Fibra de Carbono y de Fibra de Vidrio

Se empleará un modelo de aspas de generador eólico, al cual se lo reducirá a una escala adecuada, y se aplicará el cambio de materiales de Fibra de Vidrio y de Fibra de Carbono.

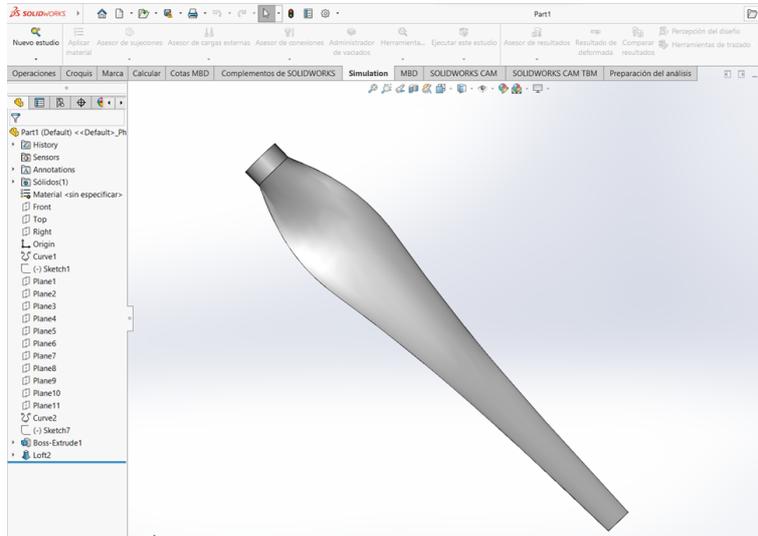


Figura 20. Diseño modelos de aspas. Fuente: Autor.

Cambio de escala para elaborar los prototipos de aspas y los moldes a escala para la fabricación de las aspas de fibra de vidrio en impresión en 3D.

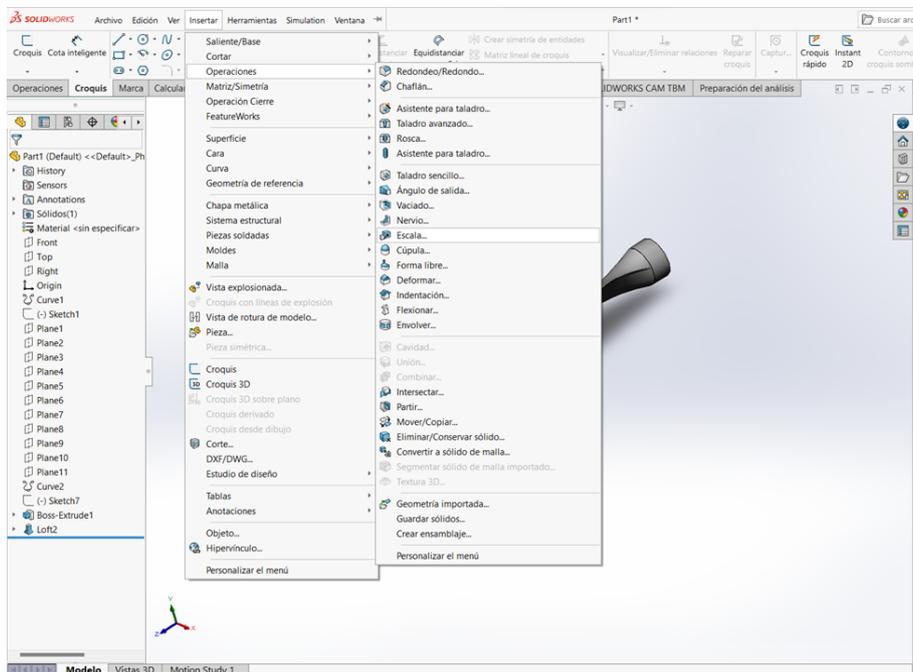


Figura 21. Uso de la herramientas de escala en software. Fuente: Autor.

Se genera un prototipo de aspas a escala para poder realizar su impresion en 3D.

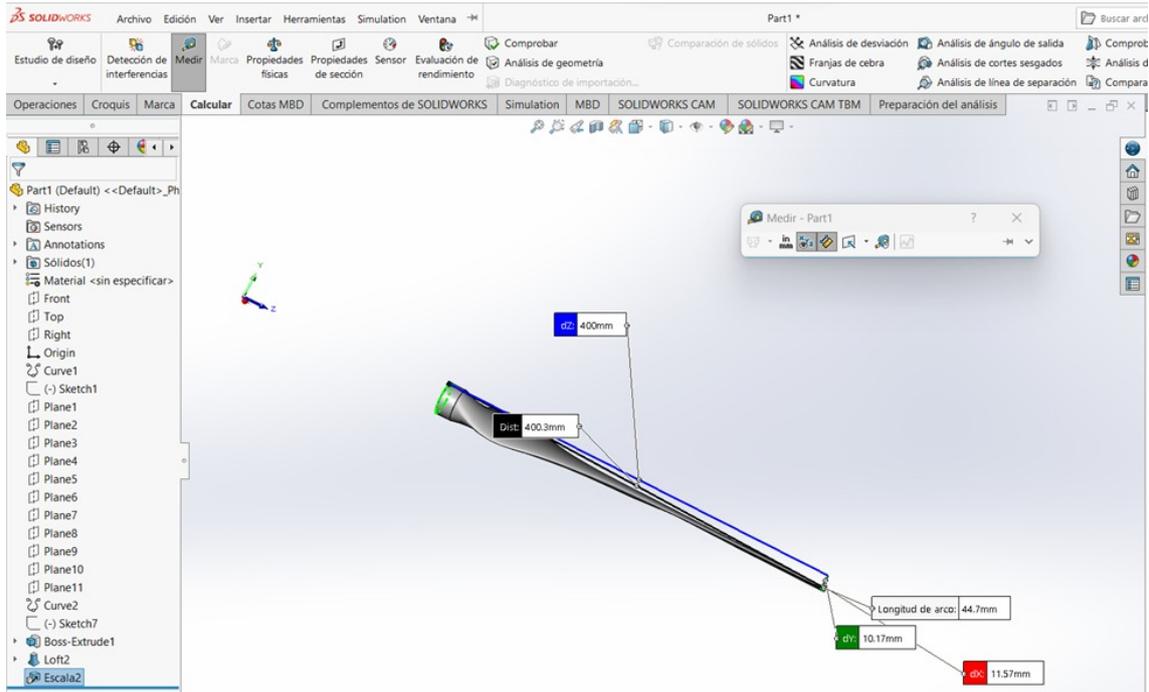


Figura 22. Prototipo a escala. Fuente: Autor.

VII-F. Diseño de aspas de Fibra de Vidrio

En siguiente imagen se muestra el Cambio de material en el aspas de Fibra de Vidrio.

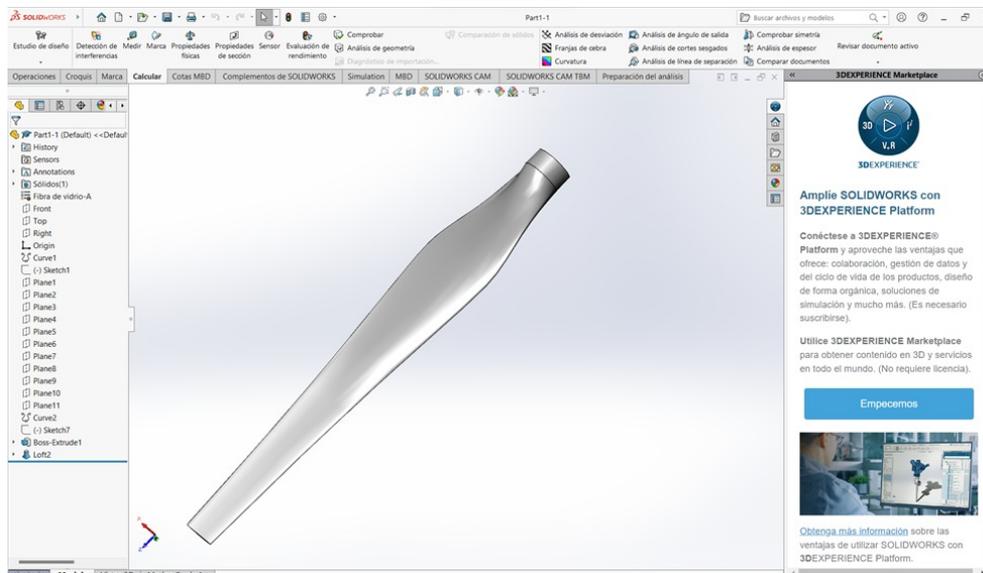


Figura 23. Diseño de aspas de Fibra de Vidrio. Fuente: Autor.

En la figura siguiente se muestran las propiedades físicas del material de Fibra de Vidrio. Estas propiedades las provee el software solidworks a partir de su base de datos.

Propiedades de material

No se pueden editar los materiales en la biblioteca predeterminada. Para editar un material, cópielo primero a una biblioteca personalizada.

Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Guardar tipo de modelo en la biblioteca

Unidades: SI - N/mm² (MPa)

Categoría: fibra de vidrio

Nombre: Fibra de vidrio-A

Criterio de fallos predeterminado: Desconocido

Descripción:

Origen:

Sostenibilidad: No definido

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	72	N/mm ²
Coeficiente de Poisson	0.3378	N/D
Módulo cortante		N/mm ²
Densidad de masa	2440	kg/m ³
Límite de tracción		N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	1970	N/mm ²
Coeficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica		W/(m·K)
Calor específico		J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Guardar... Guardar Config... Aplicar Cerrar Ayuda

Figura 24. Tabla de propiedades Fibra de Vidrio. Fuente: Autor.

Diferentes Propiedades Físicas del material de Fibra de Vidrio generados a partir de la base de datos del software solidworks.

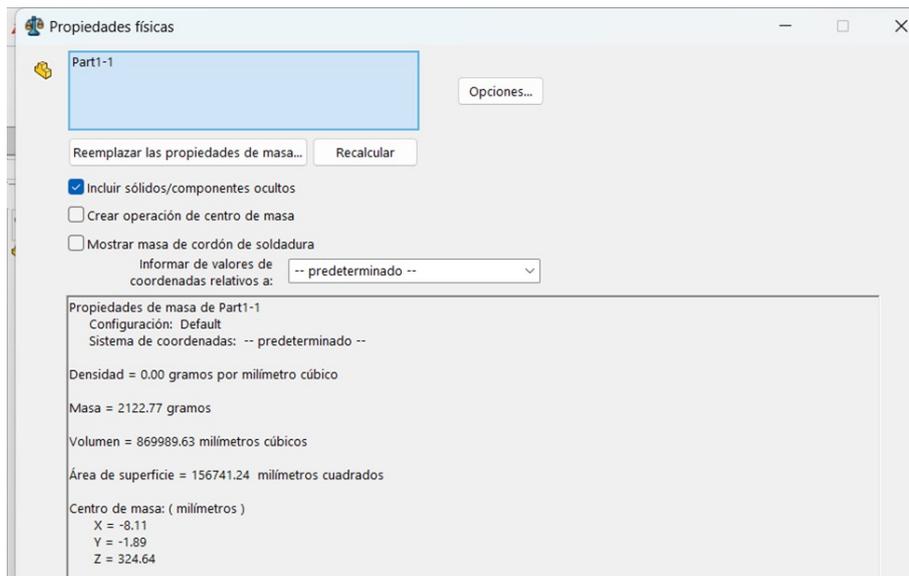


Figura 25. Propiedades física de Fibra de Vidrio. Fuente: Autor.

VII-G. Diseño de aspas de Fibra de Carbono

Aspas de material de Fibra de Carbono .

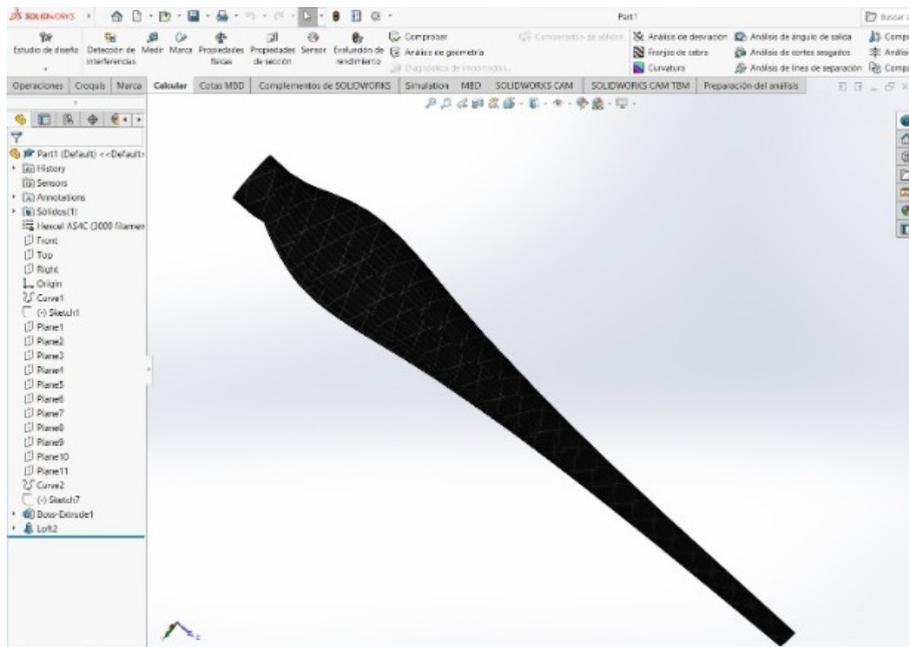


Figura 26. Diseño de aspas de Fibra de Carbono. Fuente: Autor.

En la figura siguiente se muestran las propiedades físicas del material de Fibra de Carbono. Estas propiedades las provee el software solidworks a partir de su base de datos.

Propiedades Tablas y curvas Apariencia Rayado Personalizado Datos de aplicación

Propiedades de material
No se pueden editar los materiales en la biblioteca predeterminada. Para editar un material, cópielo primero a una biblioteca personalizada.

Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Guardar tipo de modelo en la biblioteca

Unidades: SI - N/mm² (MPa)

Categoría: fibra de carbono

Nombre: Hexcel AS4C (3000 filamentos)

Criterio de fallos predeterminado: Desconocido

Descripción:

Origen:

Sostenibilidad: Hexcel AS4C (3000 filamentos) en solidworks materials: l

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	500	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.28	N/D
Módulo cortante		N/mm ²
Densidad de masa	1780	kg/m ³
Límite de tracción		N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	2500	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica	100	W/(m-K)
Calor específico		J/(kg-K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Figura 27. Tabla de densidad Fibra de Carbono. Fuente: Autor.

Diferentes Propiedades Físicas del material de Fibra de Carbono datos se genera del software solidworks.

Propiedades físicas

Part1

Incluir sólidos/componentes ocultos

Crear operación de centro de masa

Mostrar masa de cordón de soldadura

Informar de valores de coordenadas relativos a: -- predeterminado --

Propiedades de masa de Part1
Configuración: Default
Sistema de coordenadas: -- predeterminado --

Densidad = 0.00 gramos por milímetro cúbico

Masa = 1548.58 gramos

Volumen = 869989.63 milímetros cúbicos

Área de superficie = 156741.24 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)
X = -8.11
Y = -1.89
Z = 324.64

Figura 28. Propiedades de Fibra de Carbono. Fuente: Autor.

VII-H. Fabricación de los dos tipos de aspas propuesto en diferentes materiales

Prototipo escalado para realizar la impresiones de material de Fibra de Carbono y de Fibra de Vidrio y realizar el molde para la elaboración de la aspas de Fibra de Vidrio .

Se pasó el archivo de las aspas de generador eólico, diseñás soliworks a archivo STL, para poder realizar la impresión en 3D de las aspas propuestas.

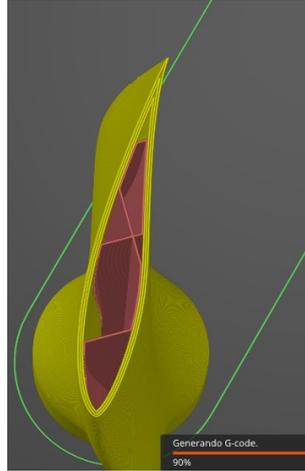


Figura 29. Diseño de aspas para realizar los prototipos. *Fuente: Autor.*

Elaboracion de aspas a escala del prototipo a realizar impresiones 3D de material de Fibra de Carbono y Fibra de Vidrio, así como elaborar el molde correspondiente aspas de Fibra de Vidrio.

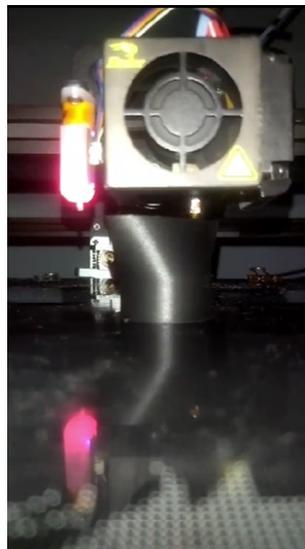


Figura 30. Impresión en 3D de Fibra de Carbono. *Fuente: Autor.*

VIII. RESULTADOS

VIII-A. Aplicación de topología en aspas del material de Fibra de Vidrio

Se aplicó la optimización de topología para la reducción de material en las aspas de Fibra de Vidrio.

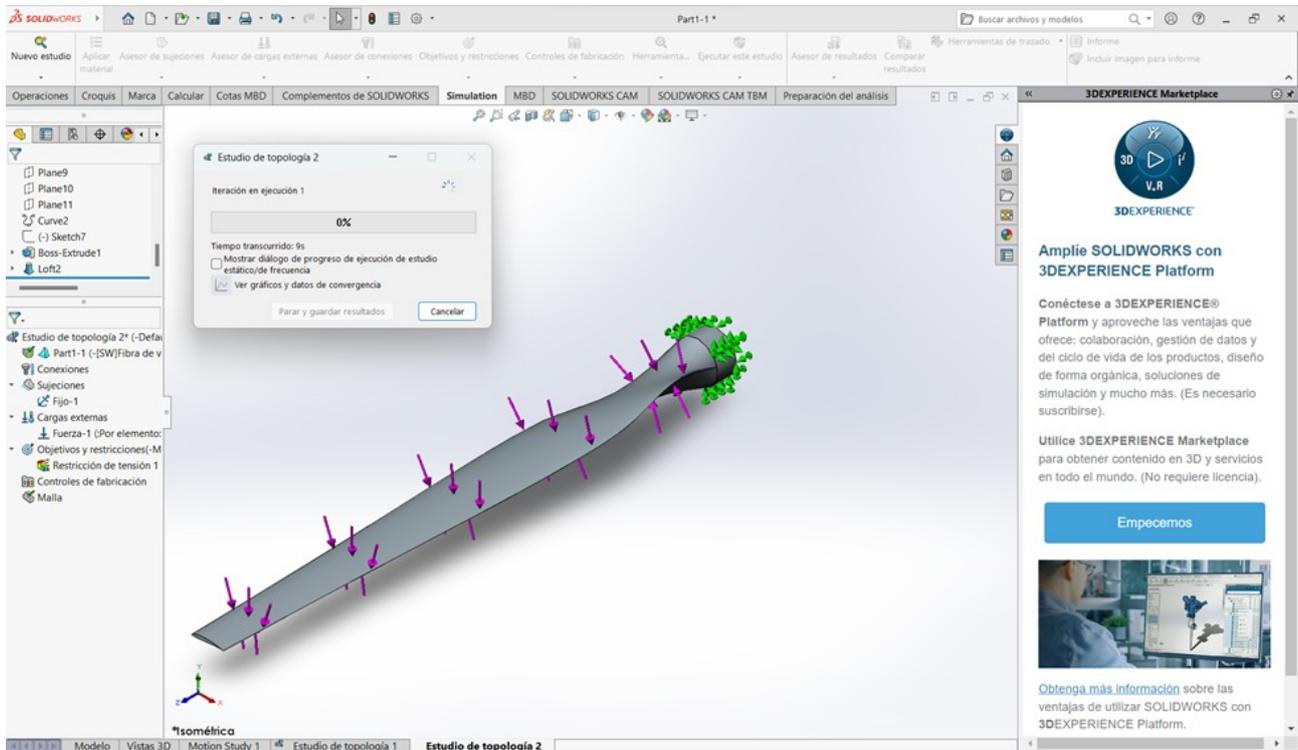


Figura 31. Inicío de aplicación topología en aspas de Fibra de vidrio. Fuente: Autor.

En la figura siguiente se muestra el resultado de la reducción de material de Fibra de Vidrio, donde se muestra la masa que tenía originalmente la pieza antes de la optimización topológica, y la masa final resultante de dicho proceso de optimización. Este proceso es realizado mediante el software solidworks.

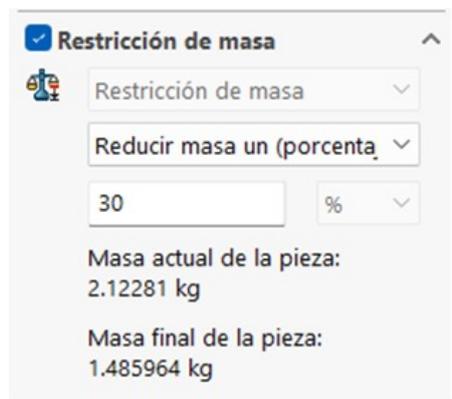


Figura 32. Reducción de masa de Fibra de Vidrio. Fuente: Autor.

En la siguientes imagen se puede observar el resultados final de aplicación optimización topología en reducción de material en las aspas de Fibra de Vidrio.

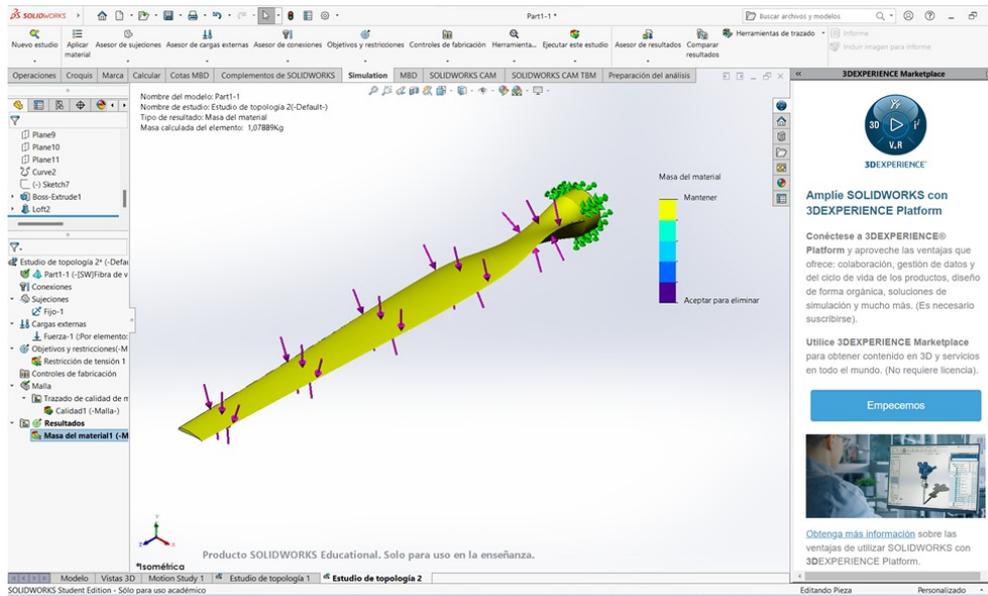


Figura 33. Resultado de topología de Fibra de Vidrio. Fuente: Autor.

VIII-B. Aplicación de topología en aspas de Fibra de Carbono

Se aplicó la optimización topología en las aspas de material de Fibra de Carbono para realizar la reducción de material.

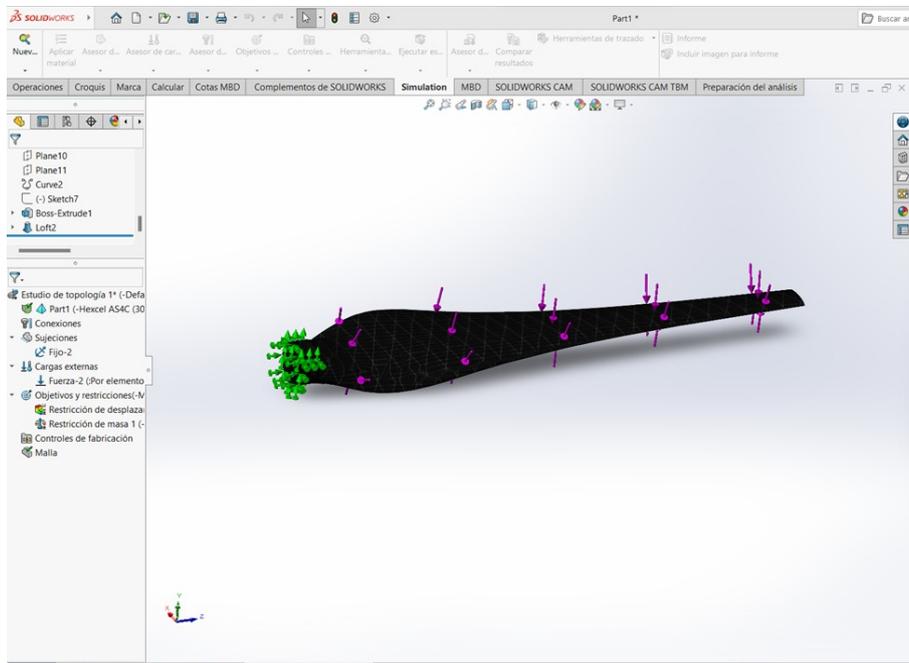


Figura 34. Inicio de aplicación topología en aspas de Fibra de Carbono. Fuente: Autor.

En la figura siguiente se muestra el resultado de la reducción de material de Fibra de Carbono, donde se muestra la masa que tenía originalmente la pieza antes de la optimización topológica, y la masa final resultante de dicho proceso de optimización. Este proceso es realizado mediante el software solidworks.

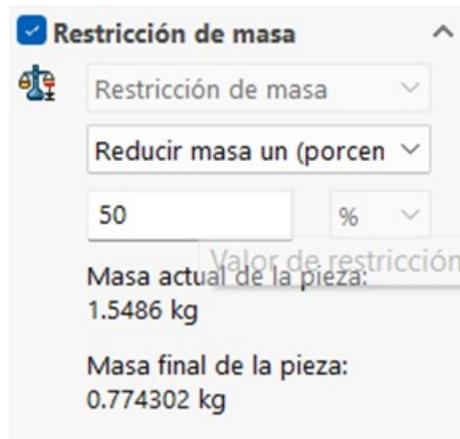


Figura 35. Reducción de masa. Fuente: Autor.

Se inició de aplicación de optimización topología para reducción de material en las Fibra de Carbono.

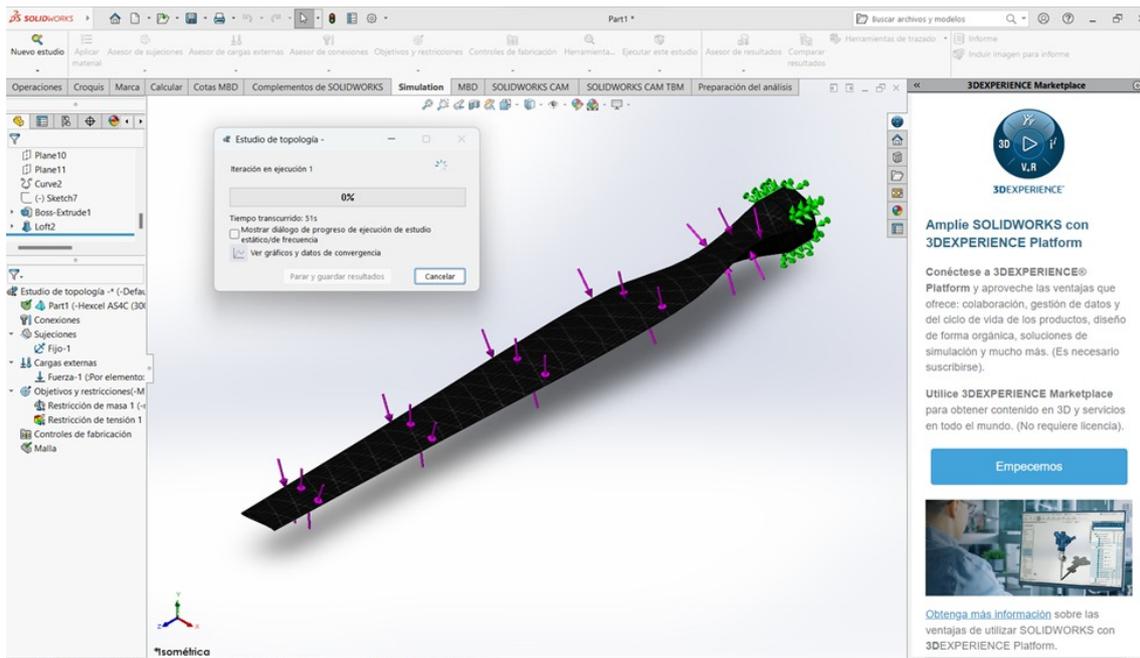


Figura 36. Inicio de optimización topología. Fuente: Autor.

A continuación se muestra el resultado final de la aplicación de la optimización topológica para la reducción de material en aspas de Fibra de Carbono.

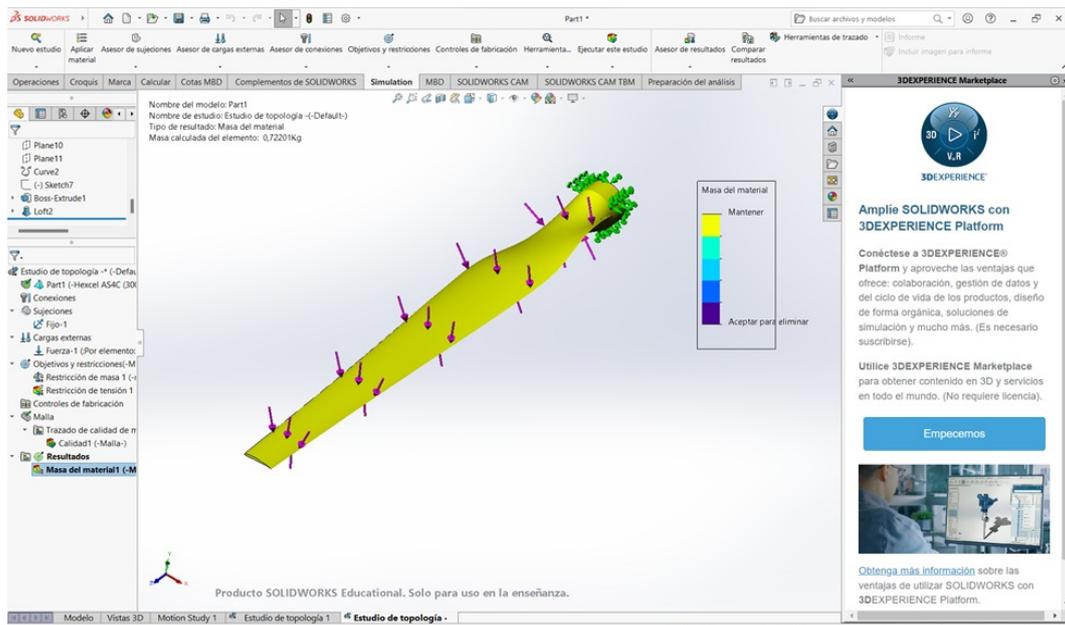


Figura 37. Resultado final de optimización topología. Fuente: Autor.

VIII-C. Diseño en físico aspas de Fibra de Vidrio

Se muestran los resultados obtenidos para las aspas de material de Fibra de Vidrio y su respectivo peso, luego de la aplicación de la optimización topológica para la reducción de su peso.



Figura 38. Peso de aspas de Fibra de Carbono. Fuente: Autor.

Finalmente se procedió con la implementación de las aspas de material de Fibra de Vidrio para la realización de las pruebas, así como la toma de datos de la energía que se genera.



Figura 39. Implementación de aspas de Fibra de Vidrio. Fuente: Autor.

Resultado de cuánto voltaje genero aspas del material de Fibra de Vidrio.

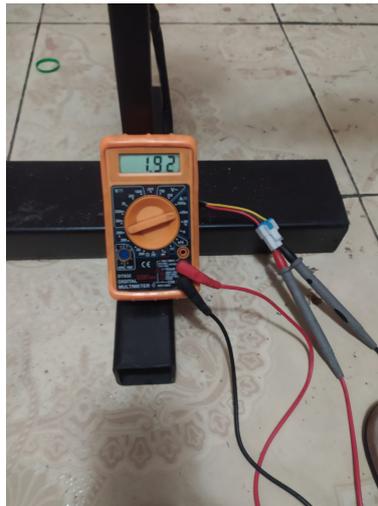


Figura 40. Voltaje que genero la aspas de Fibra de Vidrio. *Fuente: Autor.*

VIII-D. *Diseño en físico de la aspas de Fibra de Carbono*

Se muestra el resultado del diseño de las aspas de material de Fibra de y su respectivo peso, luego de la aplicación de la optimización topológica para la reducción de su peso.



Figura 41. Peso de aspas de Fibra de Carbono. *Fuente: Autor.*

Implementación del aspas de material de Fibra de Carbono, para la tomas de datos de cuántos voltaje genera.



Figura 42. Implementación Fibra de Carbono. *Fuente: Autor.*

Resultado de la energía generada por las aspas del material de Fibra de Carbono.



Figura 43. Voltaje que genero el aspas de Fibra de Carbono. Fuente: Autor.

VIII-E. Potencia de corriente alterna

En corriente alterna, se debe considerar el factor de potencia, el cual indica la eficiencia con la que la corriente se convierte en potencia activa. La potencia activa es aquella potencia consumida por cualquier equipo eléctrico, al estar conectado a un circuito de corriente alterna.

Donde su fórmula es la siguiente.

- P = La potencia en vatios.
- V = La tensión en voltios.
- I = La corriente en amperios.
- $\cos\phi$ = Valor de potencia de coseno de “fi”

$$P = V * I * \cos \phi$$

Tabla I
TABLA DE DATOS CUÁNTO GENERA LAS TOMAS DE DATOS DE LOS DOS TIPOS DE ASPAS

Test	Aspa Fibra de Vidrio			Aspa Fibra de Carbono		
	Voltaje	Corriente	Potencia	Voltaje	Corriente	Potencia
1	0.85	0.1	0.085	0.45	0.0	0
2	0.10	0.2	0.02	0.95	0.1	0.095
3	0.53	0.0	0	0.74	0.0	0
4	0.48	0.1	0.048	0.99	0.1	0.099
5	0.77	0.1	0.074	0.64	0.2	0.128
6	0.23	0.1	0.023	1.12	0.1	0.112
7	1.54	0.0	0	1.21	0.1	0.121
8	1.78	0.1	0.17	0.77	0.2	0.154
9	1.33	0.0	0	1.0	0.2	0.2
10	1.48	0.2	0.296	1.37	0.1	0.137
11	1.88	0.1	0.18	1.30	0.1	0.13
12	1.96	0.2	0.392	1.46	0.2	0.028

Para determinar el rendimiento de diferentes tipos de aspas propuestos para un generador eólico, se tomaron datos de voltaje y corriente alterna (AC) con un multímetro. Una vez obtenidos estos datos, se calcula la potencia aparente multiplicando el voltaje por la corriente por $\cos \phi$. Esto permite comparar el rendimiento de diferentes tipos de aspas propuestas para el generador eólico y saber cuál es la potencia generada.

IX. CRONOGRAMA

Tabla II
TABLA DE PRESENTACIÓN DE PLAN DE ACTIVIDADES.

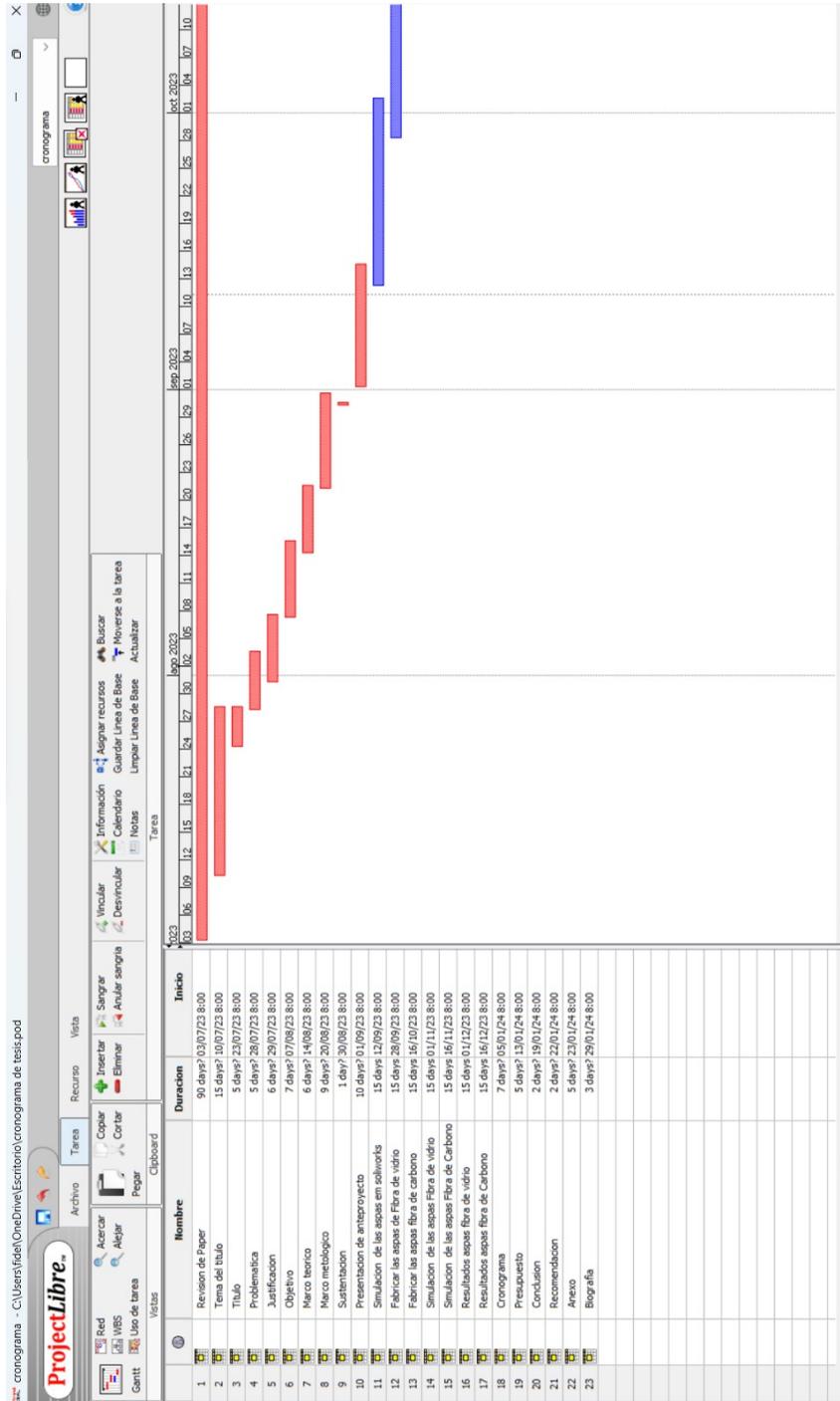
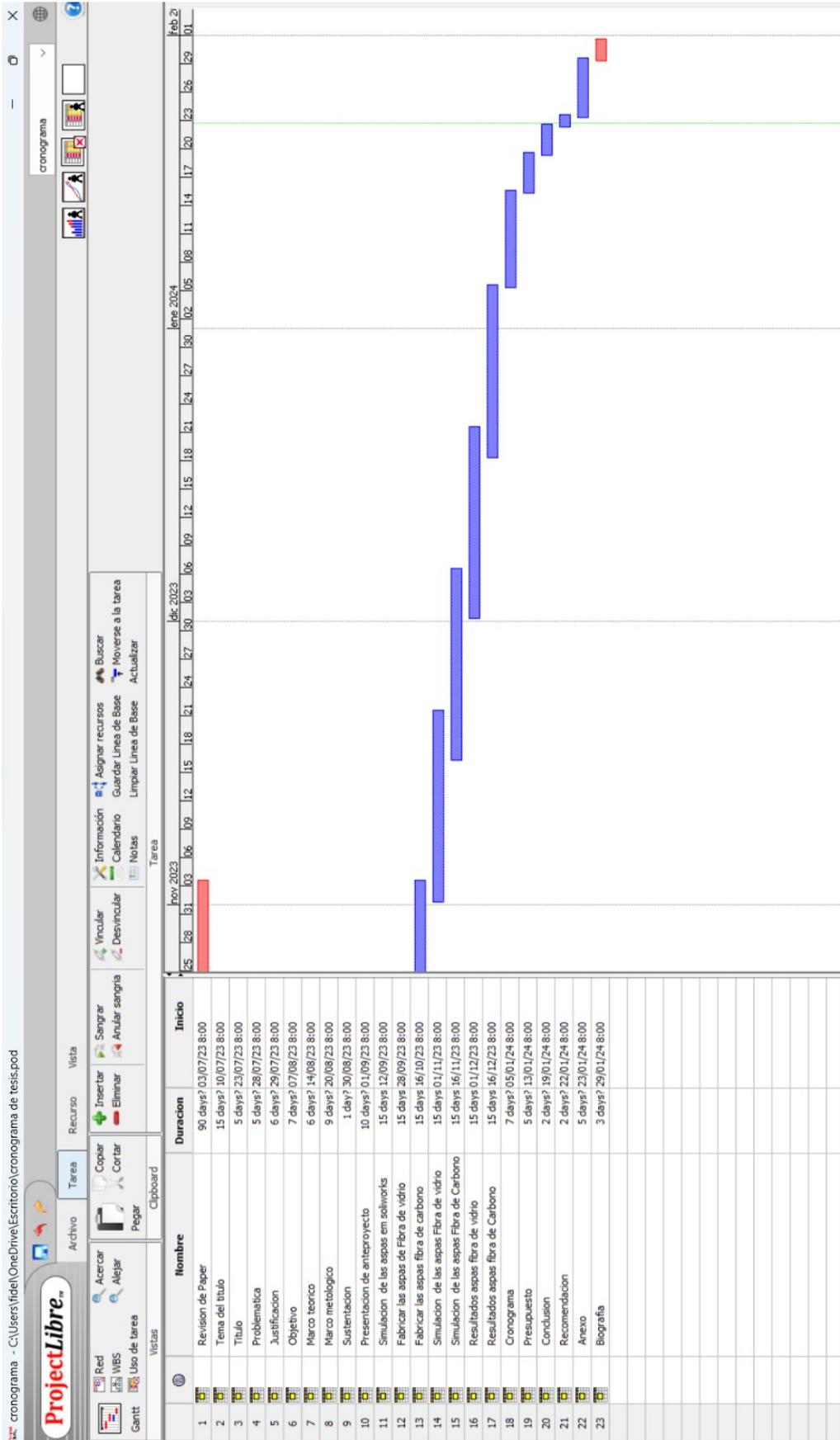


Tabla III
 TABLA DE PRESENTACIÓN DE PLAN DE ACTIVIDADES.



X. PRESUPUESTO

Tabla IV
COSTO DE MATERIALES USADO PARA LA ELBORACIÓN DE LA TESIS .

Nombre del elemento	Descripción	Cantidad	Valor total
Fibra de vidrio	3 metros	3	25\$
Aspa para sacar molde	Molde para Fibra de Vidrio	1	15\$
Resina	Dos litros	2	20 \$
Secante	Dos onzas de secante	2	10 \$
Cera	Un Pomo	1	5 \$
Aspa de Fibra de Carbono	Impresion en 3D	3	75\$
Base metálica	Soporte del motor	1	30 \$
Motor eléctrico	Utilizado para medir la producción de potencia eletrica	1	60 \$
Cable		1	5 \$
Soporte de Aspas		1	45 \$
Multimetro		1	30\$
Perno		6	1.50 \$
Tuerca		6	1.50 \$
Transporte	Transporte público y gasolina		50 \$
Pintura	Dos litros pintura negra	1	10 \$
TOTAL			383\$

XI. CONCLUSIONES

Se realizó el diseño de las aspas del generador eólico, aplicando la herramientas de optimización de solidWorks para la reducción del material en el diseño propuesto, con el fin de optimizar su estructura. Luego, se procedió a fabricar los modelos de las aspas propuestos para evaluar cuál es el más eficiente en términos de material, comparando la Fibra de Vidrio y la Fibra de Carbono. Este proceso permitirá determinar cuál de las opciones ofrece un mejor rendimiento y durabilidad.

La elaboración de un prototipo de las aspas propuestas muestra que el material de Fibra de Vidrio es más resistente y hueco en su parte interna, mientras que el material de Fibra de Carbono es más liviano pero frágil en comparación con el uso del material Fibra de Vidrio.

Al nivel de prototipo en los que se han fabricado las aspas y se han efectuado las pruebas, no es factibles evaluar exhaustivamente la potencia generada por cada alternativa, sin embargo, con las aspas de Fibra de Vidrio se observa una ligera tendencia a producir mayor potencia si se compara con las aspas de Fibra de Carbono.

La implementación de las aspas estaba prevista sobre un generador eólico de uno de los laboratorios de la universidad, sin embargo, por motivos de la integridad de dicho equipo no fue factible implementar las aspas de esta forma. En su lugar se creó un prototipo de aerogenerador a escala, que sirvió para validar la generación de energía con las aspas fabricadas.

XII. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un análisis topológico antes de la instalación de las aspas prototipo antes de su fabricación e instalación en un dispositivo real.

Se podría diseñar el generador eólico a escala con un sistema de engranajes para aumentar la velocidad de rotación del eje, con lo que se podría generar energía de una forma más estable que la observada, tal como ocurre en un generador eólico real.

Según los resultados obtenidos, el aspa de material de fibra de vidrio es más recomendable de usar ya que posee mejor resistencia.

REFERENCIAS

- [1] M. Z. Akhter, A. R. Ali, H. K. Jawahar, F. K. Omar y E. Elnajjar, «Performance enhancement of small-scale wind turbine featuring morphing blades,» 2023.
- [2] S. Fu, *Study on aerodynamic performance and wake characteristics of a floating offshore wind turbine under pitch motion*, 2023. dirección: <https://www.salud.gob.ec/wp-content/uploads/2018/08/PIANE-2018-2025-final-compressed-.pdf>.
- [3] B. Ji, K. Zhong, Q. Xiong, P. Qiu, X. Zhang y L. Wang, «CFD simulations of aerodynamic characteristics for the three-blade NREL Phase VI wind turbine model,» 2022.
- [4] Z. Han, H. Chen, Y. Chen et al., «Aerodynamic performance optimization of vertical axis wind turbine with straight blades based on synergic control of pitch and flap,» 2023.
- [5] M. Zare, «Stochastic unit commitment to determine frequency response ramp rate including wind turbines with synthetic inertia and virtual synchronous generator,» 2022.
- [6] S. A. R. Khan, H. M. Zia-Ul-Haq, P. Ponce y L. Janjua, «Re-investigating the impact of non-renewable and renewable energy on environmental quality: A roadmap towards sustainable development,» 2023.
- [7] S. Verde y E. N. Lages, «A comparison of anchor loads, planar displacement, and rotation for nylon and polyester moored systems for a 15 MW floating wind turbine in shallow water,» 2023.
- [8] S. S. B. Ibadí, «DOUBLE-STAGE SAVONIUS AND DARRIEUS WIND TURBINES FOR URBAN AREAS USING publisher,» 2022.
- [9] M.-Y. Shen, Z.-H. Guo y W.-T. Feng, «A study on the characteristics and thermal properties of modified regenerated carbon fiber reinforced thermoplastic composite recycled from waste wind turbine blade spar,» 2023.
- [10] M. Garbayo-Salmons Romaní, «Colgajo en molinillo de viento: Una nueva opción reconstructiva,» 2023.
- [11] A. Verde, O. Lastres, G. Hernández, G. Ibañez, L. Vereá y P. Sebastian, «A new method for characterization of small capacity wind turbines with permanent magnet synchronous generator: An experimental study,» 2018.
- [12] F. Martínez-Rodrigo, S. de Pablo, D. Ramírez, L. C. Herrero-De Lucas y Z. A. Aljawary, «MMC-based topology for grid connection of wind generators with phase and arm power balancing,» 2023.
- [13] S.-B. Muñoz Townsend, «Viscoelastic layer insertion to reduce the propagation of energy by vertical impacts on GFRP laminates,» 2020.
- [14] F. Shen Guo, «A study on the characteristics and thermal properties of modified regenerated carbon fiber reinforced thermoplastic composite recycled from waste wind turbine blade spar,» 2023.
- [15] Y. Li, S. Yang, F. Feng y K. Tagawa, «A review on numerical simulation based on CFD technology of aerodynamic characteristics of straight-bladed vertical axis wind turbines,» 2023.
- [16] H. Martín, «Design, manufacturing and testing of inversed taper NACA 4412 airfoil with blade made of hybrid empty fruit bunch bio-composites,» 2022.
- [17] R. S. de Villaverde A, «refuerzo estructural de fibra de carbono,» 2021.
- [18] R. González, «Metodología para la fabricación híbrida de piezas mecánicas usando optimización topológica,» 2022.
- [19] X. Ji Zhong, «CFD simulations of aerodynamic characteristics for the three-blade NREL phase VI wind turbine model,» 2022.
- [20] Ortega-Yago, «Resistencia mecánica de matrices óseas de ácido poliláctico desarrolladas POR impresión 3D para la reconstrucción de defectos óseos,» 2024.
- [21] Z. Chen EL-Refaie, «Evaluation of a contra-rotating flux- Modulated machine featured with dual flux-modulation for wind power generation,» 2022.
- [22] L. Xu Yu, «Design and performance evaluation of additively manufactured composite lattice structures of commercially pure ti (CP-ti),» 2021.
- [23] Li, «A review on numerical simulation based on CFD technology of aerodynamic characteristics of straight-bladed vertical axis wind turbines,» 2023.

- [24] K. Vardaan, «Design, analysis, and optimization of thresher machine flywheel using Solidworks simulation,» 2022.
- [25] E. Hasan, Eltayesh, I. Awaad y M. El-Batsh, «Experimental examination for the electric power generation of a commercial small-scale wind turbine with modified aerodynamic design,» 2023.
- [26] J. A. D. Pacheco, «Diseño, análisis y simulación estructural de un aspa para un aerogenerador de 30 kW»,» 2017.
- [27] A.-L. Yang, W. Mao, S.-M. Chang et al., «Computational evaluation of the axis-blade angle for measurements of implant positions in trochanteric hip fractures: A finite element analysis,» 2023.
- [28] I. H. Arriaga, «Diseño, análisis y simulación estructural de un aspa para un aerogenerador de 30 kW»,» 2017.
- [29] M. M. P. F. G. Pirrera, «Structural Design of Wind Turbine Blades with an Additively Manufactured Graded Lattice Core using Topology Optimisation,» 2023.
- [30] A. G. Canales, «Diseño, análisis y simulación estructural de un aspa para un aerogenerador de 30 kW»,» 2017.

ANEXOS

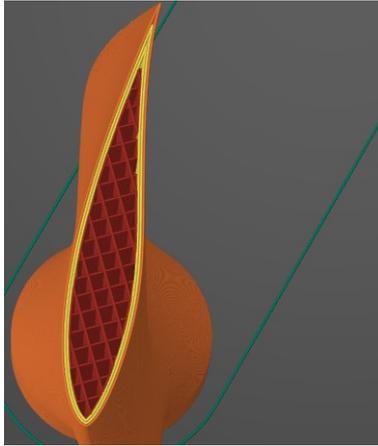


Figura 44. Prototipo de aspas escala para impresión 3D.

Fuente: Autor.

Escala del prototipo a realizar impresiones de material de Fibra de Carbono y fibra de vidrio, así como elaborar el molde correspondiente aspas de Fibra de Vidrio.

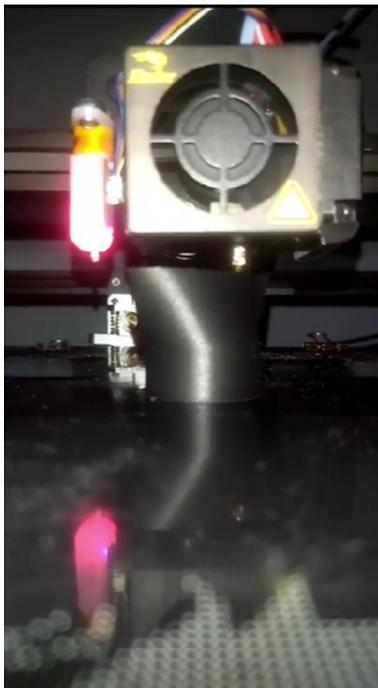


Figura 45. Impresión en 3D de Fibra de Carbono.

Fuente: Autor.



Figura 46. Aspas Fibra de Carbono.
Fuente: Autor.

Las 3 aspas a escala del generador eólico de Fibra de Carbono, se realizó en impresora de 3D.



Figura 47. 3 aspas Fibra de Carbono.
Fuente: Autor.



Figura 48. Molde para diseño de aspas de Fibra de Vidrio.
Fuente: Autor.



Figura 49. 3 aspas de Fibra de Vidrio.
Fuente: Autor.



Figura 50. Pruebas de aspas de Fibra de Vidrio.
Fuente: Autor.



Figura 51. Perfil de aspas de Fibra de Vidrio.
Fuente: Autor.



Figura 52. Pruebas de aspas Fibra de Carbono.
Fuente: Autor.