



**Evaluación de materiales reciclables para la fabricación de los álabes de una turbina eólica
H-Darrieus**

Andrés Felipe Olivera Castillo

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Ingeniería Mecánica

Director

Henry Alonso Colorado Lopera, Doctor (PhD) en Materiales

Codirector

Edwin Lenin Chica Arrieta, Doctor (PhD) en Energías Renovables.

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería Mecánica
Medellín, Antioquia, Colombia
2023

Cita	(Olivera Castillo et al, 2023)
Referencia	Olivera Castillo, A., Colorado, H. & Chica Lenin, E. (2023). <i>Evaluación de materiales reciclables para la fabricación de los álabes de una turbina eólica H-Darrieus</i> [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Maestría en Ingeniería Mecánica, Cohorte Seleccione cohorte posgrado.

Grupo de Investigación CCComposite & GEA



Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi madre que me apoyo en todo momento para poder vencer las adversidades y a mi padre que me guía siempre desde el cielo.

Índice

Índice	4
Lista de Figuras	5
Lista de Tablas	7
Resumen	8
Palabras Clave	8
Abstract	8
Keywords	8
Capítulo 1	9
Introducción.....	9
Planteamiento del problema	9
Objetivos de la investigación	11
Impacto y productos esperados	11
Capítulo 2: Marco teórico	11
Potencia eólica instalada a nivel mundial y sus residuos	12
Fabricación típica de los álabes en turbina eólicas.....	15
Disposición final turbina eólicas	16
Capítulo 3: Estado del arte	19
Capítulo 4: Metodología de la investigación	30
Parametrización de impresora 3D	30
Fabricación de probetas de ensayo	33
Caracterización de materiales	37
Selección de la mejor muestra.....	54
Diseño, fabricación y ensamblaje de turbina eólica H-Darrieus.....	55
Pruebas de funcionamiento prototipo y Obtención de curva de potencia.....	64
Análisis de ciclo de vida para álabes de turbina eólica a escala de laboratorio	67
Capítulo 5: Análisis de resultados	70
Análisis de las pruebas mecánicas, térmicas y exposición U.V.....	70
Capítulo 6: Conclusiones	73
Referencias	75

Lista de Figuras

Figura 1. Tipo de turbina eólica horizontal (a) y vertical (b). Fuente: [16]	12
Figura 2. Capacidad global de energía del viento y adiciones anuales Fuente: [16].....	13
Figura 3. Capacidad global de energía del viento y adiciones anuales Fuente: [17].....	13
Figura 4. Composición típica pala turbina eólica. Fuente: Fuente: [8].	15
Figura 5. Fabricación de alabe para turbina vertical de 17 metros hecha por Alcoa en 1970. Fuente: [35]	16
Figura 6. Uso anual de materiales compuesto para álabes de turbinas eólicas. Fuente [8]	16
Figura 7. Opciones de disposición y reciclaje para álabes de turbinas eólicas Fuente: (EWEA,2012)	17
Figura 8. a) Probetas de Tracción; b) MóduloMódulo de elasticidad; c) Resistencia ultima a la tensión. Fuente: [41]	19
Figura 9. a) Diseño de rotor con el larguero incrustado en el alabe. b) Alabe impresa en 3D durante pruebas en el túnel de viento; c) Sección transversal alabe en Diseño. d) Sección transversal alabe fabricada.	20
Figura 10. a) Pruebas en el tunel de viento; b) Potencia vs la rotación de velocidad TIP: [41].	20
Figura 11. a) Diseño de turbina tipo H helicoidal [45]	21
Figura 12. a) Flujos de dominio computarizados. b) Detalle del mallado sobre el alabe [45]	21
Figura 13. a) Diseño en sándwich de alabe. b) Detalle del refuerzo de fibra de vidrio con matriz epóxica. [45].....	22
Figura 14. a) Diseño en sándwich de alabe. b) Detalle del refuerzo de fibra de vidrio con matriz epóxica. [45].....	22
Figura 15. Segmentos de ABS de los álabes obtenidos por método FDM. a) Área de puntos de conexión de la espada. b) Tres segmentos ensamblados al final de la hoja. c) El prototipo de pala cubierto por GFRP.....	23
Figura 16. Diseño de turbina eólica Savonius. Fuente: [46]	23
Figura 17. a) Resistencia a la tensión en MPa. b) MóduloMódulo de elasticidad en GPa. Fuente: [46]	24
Figura 18. a) Resistencia al impacto J/mm. b) Energía absorbida en Jules. Fuente: [46]	24
Figura 19. Tejidos BX45° NCF: a) carbono (Chomarat Co., Ltd., Le Cheylard, Francia) y b) vidrio (HANKUK Carbon Co.,Ltd., Seúl, Corea) fuente: [49]	26
Figura 20. Proceso de fabricación de las muestras de impacto. Fuente: [49]	26
Figura 21. a) Condiciones de contorno, b) malla de una sola capa, c) Restricciones de amarre entre capas y contacto de zona cohesiva en regiones de interfaz y d) malla impactadora de dos grados de libertad. Fuente: [49]	27
Figura 22. Mediciones de fuerza máxima numérica versus experimental en función de los niveles de energía de impacto para diferentes fibras y sistemas de resina.	28
Figura 23. Componentes de un alabe típico de aerogenerador fuente:	29
Figura 24. Impresora 3D makeR PEGASUS Lite, Fuente: Autor.	30
Figura 25. Medidas de muestras según clasificación ASTM D638 – 14 [54]......	33
Figura 26. a) Diseño CAD probeta para ensayo de tensión. b) Diseño en programa Cura, formato STL, c) probetas tensión impresas en 3D fuente: Autor.....	33
Figura 27. a) Diseño CAD, b) Diseño formato STL en programa Cura, c) Probetas de flexión obtenidas en impresión 3D. fuente: Autor.....	34
Figura 28. a) Medidas para muestras de ensayo de impacto Izod, según norma D256 – 10, b) Diseño CAD muestras de impacto. c) Muestras en software Cura, para impresión en 3D, d) Muestras de impacto fabricadas bajo modelo de impresión 3D. Fuente: Autor.	35
Figura 29. a) Probeta de dureza en modelo CAD, b) Muestras en software Cura, para ser impresas en 3D, c) Muestras de dureza impresas en 3D. Fuente: Autor.....	35
Figura 30. a) Muestras listas para entrar al horno para la exposición termina durante 8 horas. b) Muestras organizadas en la base giratoria para prueba de exposición U.V. Fuente: Autor	36
Figura 31. a) velocidades según el tipo de probeta. b) Muestras de tensión fabricadas bajo modelo de impresión 3D, según norma ASTM D638 –14. Fuente: Autor.....	38
Figura 32. Resistencia a la tensión en cuatro (4) materiales fabricados en impresión 3D a diferentes temperaturas, Fuente: Autor.....	39
Figura 33. Esfuerzo (Megapascuales) vs deformación unitaria (mm/mm) para los 4 materiales probados en la máquina de ensayos de tensión, con la mejor resistencia promedio de cada uno, Fuente: Autor.	40
Figura 34. a) grafica del porcentaje de ductilidad para los 4 materiales probados, b) Grafica de resiliencia (Jules/metrocuadrado) Fuente: Autor.	40
Figura 35. Imágenes SEM de probetas fracturadas de tensión. Fuente: Autor	42

Figura 36. Muestras de flexión fabricadas bajo modelo de impresión 3D, según norma ASTM D638 – 14, Fuente: Autor	43
Figura 37. Resistencia a la flexión en 4 materiales fabricados a diferentes temperaturas, Fuente: Autor.	44
Figura 38. Esfuerzo (Megapascuales) vs deformación unitaria (mm/mm) para los 4 materiales probados en la máquina de ensayos de flexión, con la mejor resistencia promedio de cada uno, Fuente: Autor.	45
Figura 39. a) Muestras de impacto fabricadas bajo modelo de impresión 3D. b) Probeta en máquina de ensayo al impacto método Izod, según norma D256 – 10, Fuente: Autor.	45
Figura 40. Esfuerzo (Megapascuales) vs deformación unitaria (mm/mm) para los 4 materiales probados en la máquina de ensayos de flexión, con la mejor resistencia promedio de cada uno, Fuente: Autor.	46
Figura 41 a) Muestras de impacto fabricadas bajo modelo de impresión 3D. b) toma de dureza con medidor shore D Fuente: Autor.	47
Figura 42. Esfuerzo (MPa) vs deformación unitaria (mm/mm) para los 4 materiales probados en la máquina de ensayos de flexión, con la mejor resistencia promedio de cada uno, Fuente: Autor.	48
Figura 43. a) Muestras listas para entrar al horno para la exposición termina durante 8 horas. b) Exposición térmica de muestras a 80°C Durante 5 horas. Fuente: Autor.	49
Figura 44 Fuente: Autor.	51
Figura 45. a) Muestras organizadas en la base giratoria para prueba de exposición U.V. b) Muestras durante la exposición U.V. a 405nm, por un periodo de 8 horas. Fuente: Autor.	52
Figura 46. Esfuerzo (Megapascuales) vs deformación unitaria (mm/mm) para los 4 materiales probados en la máquina de ensayos de flexión, con la mejor resistencia promedio de cada uno, Fuente: Autor.	53
Figura 47. Disco actuador en un tubo de flujo [61].	55
Figura 48. Obtención de máximo coeficiente de potencias vs el factor flujo, fuente: Autor.	57
Figura 49. Coeficiente de potencia en función de la TSR, para distintas configuraciones de turbinas eólicas en comparación con el límite de Betz [9].	58
Figura 50. Fuerza sobre el elemento de un alabe en los diferentes cuadrantes [64]	59
Figura 51. Momento par sobre una turbina de eje vertical en función de la posición angular [61].	60
Figura 52. Longitud de cuerda (mm) vs Angulo azimut. fuente: Autor.	61
Figura 53. Perfil del alabe con configuración NACA 0024. Fuente: Autor.	62
Figura 54. a) Diseño del alabe con configuración NACA 0024 con longitud de cuerda de 35.96 mm y una longitud de 210 mm, b) discos de soporte de los álabes de 220 mm de diámetro y 5 mm de espesor c) eje de 300 mm de largo y 12 mm de diámetro; d) Buje de conexión eje y discos.4, Fuente: Autor.	63
Figura 55. Ensamblaje turbina en software CAD, Fuente: Autor.	63
Figura 56. a) turbina ensamblada, b) turbina acoplada al banco de pruebas, Fuente: Autor.	64
Figura 57. Turbina H-Darrieus en prueba, en túnel de viento Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Fuente: Autor.	65
Figura 58. Coeficiente de potencia vs Velocidad TSR para turbina eólica. Fuente: Autor.	66
Figura 59. Grafica de potencia vs Velocidad RPM para turbina eólica. Fuente: Autor.	66
Figura 60. Grafica de torque vs tiempo (segundos) para turbina eólica. Fuente: Autor.	67
Figura 61. Etapas de un ACV [84].	67
Figura 62. Etapas de ACV para la los álabes de la turbina eólica H-Darrieus. Fuente Autor.	69

Lista de Tablas

Tabla 1. Valores de tensión y módulo de elasticidad. Fuente [46]	24
Tabla 2. Valores de resistencia al impacto y energía absorbida. Fuente [46]	24
Tabla 3. Casos de análisis propuestos. Fuente [49]	25
Tabla 4. Propiedades de los materiales como fibra de carbono, fibra de vidrio, Fuente [51].	29
Tabla 5. Parámetros de impresión 3D, en impresora makeR PEGASUS Lite, Fuente: Autor.	31
Tabla 6. Configuración Aleatoria de orden de fabricación de las 216 probetas para los 6 ensayos, Fuente: Autor	32
Tabla 7. Clasificación de materiales según rendimiento, Fuente: Autor.....	37
Tabla 8. Resistencia a la tensión promedio para los 4 materiales. Fuente autor	38
Tabla 9. Calificación de materiales para prueba de tensión, Fuente: Autor	40
Tabla 10. Medidas de la resistencia a la flexión promedio para los 4 materiales a probar. Fuente autor	44
Tabla 11. Calificación de materiales para prueba de flexión. Fuente autor	44
Tabla 12. Clasificación de la resistencia al impacto promedio para los cuatro (4) materiales a probar. Fuente autor	46
Tabla 13. Calificación de materiales para prueba de impacto. Fuente autor.....	47
Tabla 14. Clasificación de Dureza promedio para los cuatro (4) materiales a probar. Fuente autor.....	48
Tabla 15. Calificación de prueba de dureza para los 4 materiales. Fuente autor	49
Tabla 16. Clasificación de Dureza promedio para los cuatro (4) materiales a probar. Fuente autor.....	50
Tabla 17. Promedio de dureza por materiales durante 5 horas expuestos. Fuente autor.....	50
Tabla 18. Clasificación de Dureza promedio para los cuatro (4) materiales después de ser expuestos al envejecimiento térmico durante 5 horas. Fuente autor.....	51
Tabla 19. Clasificación de Dureza en los materiales según su porcentaje de variación en la exposición térmica. Fuente autor.....	51
Tabla 20. Clasificación de Dureza en los materiales según su porcentaje de variación en la exposición térmica. Fuente autor.....	53
Tabla 21. Clasificación de Dureza en los materiales según su porcentaje de variación en la exposición térmica. Fuente autor.....	53
Tabla 22. Comparativo de materiales según resultado obtenido en cada prueba. Fuente autor	54
Tabla 23. Comparativo del material seleccionado vs el material común de fabricación de álabes. Fuente autor.....	54
Tabla 24. Parámetros para el diseño de la turbina eólica H-Darrieus con perfil NACA 0024.....	62

Resumen

Actualmente la energía eólica es la segunda energía renovable y limpia con mayor generación de electricidad en el mundo. Sin embargo, los álabes de las turbinas eólicas son un foco de contaminación ambiental, principalmente por la dificultad de reciclarlos. Esta investigación compara 2 materiales termoplásticos: ácido poliláctico (PLA) y poliéster de glicol (PETG); y también 2 materiales compuestos: PLA reforzado con fibra de carbono (PLA+F.C.) y poliéster de glicol reforzado con fibra de carbono (PETG+F.C.). Los 4 materiales fueron impresos en una impresora 3D de deposición por filamento fundido (FDM). De dichos resultados, se eligió el mejor material para la fabricación de los álabes de una turbina eólica vertical.

Todos los materiales fueron expuestos a pruebas de tensión, flexión, impacto, dureza, envejecimiento térmico y exposición a radiación U.V. Los resultados mostraron que el material PETG+F.C. es el más indicado para imprimir los álabes de la turbina eólica bajo los parámetros seguidos en este trabajo. Dicho material presenta mejores condiciones de resistencia a la tensión, flexión, elasticidad, resistencia térmica y mejora su dureza con la exposición a la radiación ultravioleta, que los otros materiales analizados. Posteriormente se realizó la impresión de la turbina eólica tipo H-Darrieus a escala de laboratorio de 20 cm de altura y 22 cm de diámetro. El coeficiente máximo de potencia obtenido en la turbina fue de 0.21. La potencia eléctrica obtenida de la turbina eólica fue de 0.52 W a 198 RPM con una velocidad del viento de 6 m/s.

Palabras Clave: Turbina H-Darrieus, Reciclaje de termoplásticos, Reciclaje de álabes, economía circular, impresión 3D.

Abstract

Wind energy is currently the second clean and renewable energy with the highest electricity generation in the world. However, wind turbine blades are a source of environmental contamination, mainly due to the difficulty of recycling them. This research compares 2 thermoplastic materials: polylactic acid (PLA) and glycol polyester (PETG); and also 2 composite materials: PLA reinforced with carbon fiber (PLA+F.C.) and glycol polyester reinforced with carbon fiber (PETG+F.C.). The 4 materials were printed on a fused filament deposition (FDM) 3D printer. From these results, the best material for the manufacture of the blades of a vertical wind turbine was chosen.

All the materials were exposed to tests of tension, bending, impact, hardness, thermal aging and exposure to UV radiation. The results showed that the PETG+F.C. is the most indicated to print the blades of the wind turbine under the parameters followed in this work. This material presents better conditions of resistance to tension, bending, elasticity, thermal resistance and improves its hardness with exposure to ultraviolet radiation, than the other materials analyzed. Subsequently, the impression of the H-Darrieus type wind turbine was made on a laboratory scale of 20 cm in height and 22 cm in diameter. The maximum power coefficient obtained in the turbine was 0.21. The electrical power obtained from the wind turbine was 0.52 W at 198 RPM with a wind speed of 6 m/s.

Keywords: H-Darrieus turbine, thermoplastic recycling, blade recycling, circular economy, 3D printing.

Capítulo 1

Introducción

Durante el siglo 21 la humanidad entera ha vivido las manifestaciones del cambio climático, en aspectos tales como: aumento de la temperatura de la tierra, disminución de la extensión de nieves y hielos, aumento del nivel del mar, aumento de la actividad ciclónica tropical, mayores precipitaciones, y periodos de olas de calor, entre otras cosas [1]. En la conferencia de Naciones Unidas sobre el cambio climático (COP21) celebrada en París, se creó el histórico acuerdo para adoptar soluciones coordinadas con una cooperación internacional, con el fin de que todos los países avancen hacia una economía descarbonizada [2].

La producción de energía limpia es un pilar importante que debe sostener las necesidades básicas de los seres humanos, a través de fuentes de energía renovables como: la energía eólica, solar, geotérmica, mareomotriz, entre otras. El incremento en la producción de álabes para turbinas eólicas generará para el 2050 cerca del 5% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, equivalente a 43 millones de toneladas de desechos [3]. Los nuevos diseños de turbinas eólicas, están pensadas para que los materiales de fabricación sean todos 100% reutilizables y reciclables. Esta investigación se fundamentó en encontrar un material sustituto de fácil reciclaje, caracterizando y comparando dos materiales termoplásticos y dos materiales compuestos, mediante pruebas mecánicas, térmicas y de exposición ultravioleta. El mejor material fue seleccionado para la fabricación de los álabes de una turbina eólica H-Darrieus.

Al interior del documento se encuentra en el Capítulo 1, la introducción, planteamiento de problema, objetivos de la investigación e impactos y productos esperados. En el Capítulo 2 se describe el marco teórico, donde se explica los países líderes en generación eólica, también se aborda el tema de fabricación de los álabes y ciclos de vida de los mismos. Para el Capítulo 3 se encuentra el estado del arte el cual servirá como sustento para la investigación, debido a que las investigaciones descritas en este apartado, evidencian el interés y la necesidad para seguir trabajando sobre este tema abordado. En el Capítulo 4 se menciona la metodología empleada para el desarrollo del trabajo de investigación, incluyendo desde la parametrización de la impresora 3D, fabricaciones de las piezas, caracterización y comparación, para obtener el mejor material. También se muestra el desarrollo de la turbina una vez obtenido el material. Se muestran los datos tomados en las pruebas en campo y por último de este apartado se analiza el ciclo de vida para los álabes fabricados. El Capítulo 5 presenta el análisis de resultados obtenidos, incluyendo las pruebas de los 4 materiales y la capacidad de generación obtenida por la turbina construida. Por último, en el Capítulo 6 se evidencian las conclusiones y referencias del trabajo de investigación.

Planteamiento del problema

La industria de la energía eólica va en aumento y representa uno de los sectores con más alto consumo de materiales compuestos. Según la publicación realizada en julio del 2022 por la agencia internacional de energías renovables, la energía eólica se muestra como la segunda energía renovable con mayor producción para el año 2020, con una total 1.589 TWh generados, equivalente al 21 % producción total mundial [4]. La vida útil promedio de una turbina eólica puede estar entre los 20 a 25 años y en la actualidad existen muy pocas formas de reciclar los álabes de una turbina eólica de una manera rápida, económica y sostenible [5]. Distintos investigadores a nivel mundial consideran que en los próximos 25 años se va a producir alrededor de 225.000 toneladas en desechos de álabes de turbinas eólicas [6].

Según el panel intergubernamental sobre cambio climático, la energía eólica tiene buen desempeño ambiental con bajas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) cuyas emisiones están a un nivel entre $\left(8 - 20 \frac{\text{gCO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}\right)$. El cual se encuentra en el mismo rango que los valores de emisión de la energía nuclear $\left(8 - 45 \frac{\text{gCO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}\right)$, hidroeléctrica $\left(3 - 7 \frac{\text{gCO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}\right)$ y solar concentrada $\left(14 - 32 \frac{\text{gCO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}\right)$, los impactos ambientales son muy bajos comparados con otro tipo de producción de energía como lo son los combustibles fósiles que pueden llegar a niveles entre $\left(230 - 300 \frac{\text{gCO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}\right)$ [7]. La industria de la energía eólica, requiere diseñar métodos que mejoren los procesos de reciclaje, para maximizar los beneficios ambientales de la energía eólica a través de un enfoque de ciclo de vida. La mayoría de las partes de una turbina eólica, como los cimientos, la torre, los componentes de la transmisión y el generador, son reciclables y se tratan en consecuencia. Sin embargo, los álabes del rotor representan un desafío debido a la complejidad de su composición y los materiales utilizados [8].

Los álabes de las turbinas eólicas se fabrican con materiales termoestables, compuestos de una matriz de resina reforzados con fibra de vidrio (GF), fibra de carbono (CF) o una mezcla entre ambas, sin embargo los compuestos son difíciles de reciclar debido a la reticulación presente en su matriz, los cuales no permiten ser fundidos o remodelados, esto se basa en su inherente naturaleza de la heterogeneidad molecular en los compuestos de los termoestables [9]. La combinación de fibras de vidrio y polímeros, también conocidos como compuestos de polímero reforzado (GFRP), representan la mayoría de la composición del material de los álabes (60–70% de fibras de refuerzo y 30–40% resina en peso) [10].

En la actualidad, se han desarrollado tecnologías de reciclaje para materiales compuestos termoestables, las cuales se pueden clasificar principalmente en tres: reciclaje mecánico, reciclaje térmico y reciclaje químico.

En el proceso mecánico los compuestos se trituran o se muelen a diferentes tamaños de partículas o fibras cortas los cuales pueden usarse como relleno o refuerzo en nuevos compuesto, una de las ventajas es la recuperación de las fibras y resina, sin embargo este proceso tiene como desventaja que la estructura de la fibra en el proceso de recuperación es en gran medida afectada, evitando así la posibilidad de obtener de nuevo fibras largas, en consecuencia se presenta una disminución de las propiedades mecánicas y a su vez el uso potencial del producto reciclado [11].

El proceso de reciclaje térmico consiste en descomponer la matriz de la resina a través del aire o calor de gas inerte para recuperar la fibra de vidrio o fibra de carbono, las ventajas de este proceso son la alta retención de las propiedades mecánicas, una potencial recuperación de materia prima química de la resina y no se usan productos químicos como disolventes, las desventajas serían un posible carbonizado de la fibra ubicada en las caras del material, sensibilidad de las propiedades de las fibras y liberación de gases peligrosos para el medio ambiente.

El proceso de reciclaje químico utiliza los reactivos químicos para convertir la matriz de resina del residuo de material compuesto, en pequeñas moléculas para propósito de la recuperación de fibra, las ventajas se reflejan en que mantienen las propiedades mecánicas y la buena longitud de la fibra, además de un alto potencial para la recuperación de la resina, las desventajas son que la resina pierde reducción a la adhesión de otros polímeros además de un posible impacto ambiental si los solventes son mal utilizados. [12].

Las tendencias futuras en materiales para la construcción de los álabes están relacionadas con la optimización de la rigidez, la fatiga y el ciclo de vida; promover procesos de fabricación rentables

para los álabes con fibra de carbono, debido a que el material compuesto tiene mejores propiedades mecánicas y es financieramente más atractivo para recuperar en comparación con la fibra de vidrio; se deberán investigar materiales alternativos que sean reciclables, por ejemplo, los termoplásticos con incrustaciones de fibras celulósicas y bio-resinas [13].

Se plantea la siguiente pregunta de investigación *¿Es posible emplear un material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibra de carbono con buenas propiedades mecánicas y de fácil reciclaje, para la fabricación de álabes en turbinas eólicas?*

Objetivos de la investigación

Objetivo General

- Caracterizar materiales plásticos reforzados con fibra de carbono con el fin de ser usados en la fabricación de los álabes de turbinas eólicas.

Objetivos específicos

- Determinar las propiedades mecánicas, propiedades de envejecimiento térmico y pruebas UV de los materiales propuestos PLA, PLA con fibra de carbono, PETG y PETG con fibra de carbono, para ser comparados con las propiedades de la resina Epoxy con fibra de vidrio.
- Fabricar una turbina eólica tipo H-Darrieus a escala de laboratorio empleando el material seleccionado y trazar su curva de potencia.
- Realizar un estudio de ciclo de vida (LCA) para el alabe fabricado.

Impacto y productos esperados

Este trabajo de investigación es una guía en la búsqueda de nuevos materiales termoplásticos-compuestos para la fabricación de turbinas eólicas, por ende, incentivar este tipo de proyectos con aliados estratégicos en el sector privado o público, ayudará a fortalecer el desarrollo tecnológico en la región, creado por estudiantes para dar solución a necesidades básicas de la ciudadanía colombiana.

- Se construirá un prototipo a escala de laboratorio de una turbina eólica H-Darrieus, el cual servirá como base en el estudio e implementación de materiales reciclables para turbinas eólicas.
- Se presentarán los resultados en una conferencia.
- Se enviarán los resultados para publicación en una revista indexada.

Capítulo 2: Marco teórico

Las turbinas eólicas son dispositivos que, mediante su rotación convierten la energía cinética del viento en energía mecánica. Suelen clasificarse según el tipo de fuerza aerodinámica que provoca el

giro del rotor. Así, hay turbinas que son impulsadas por la fuerza de arrastre aerodinámico y otras por la fuerza de sustentación aerodinámica. Las turbinas de alta velocidad están impulsadas por la fuerza de sustentación aerodinámica, y tienen el mismo principio de funcionamiento que los perfiles de los álabes de los aviones [14].

Las turbinas también suelen ser clasificadas de acuerdo a la disposición de su eje de rotación. Existen de eje vertical y horizontal como se observa en la figura 1 siendo las de eje horizontal las más comúnmente usadas para el desarrollo de parque eólicos de gran capacidad. Las turbinas, constan de una, dos o tres álabes y tienen la ventaja de que los álabes están situadas a elevada altura, con lo cual la velocidad media del viento es mayor, y la intensidad de turbulencia es menor, que a nivel del piso [15]. Por otro lado, existen las turbinas de eje vertical las cuales tienen la ventaja de no requerir algún mecanismo para orientarse, debido a que en cualquier dirección del aire igual va incidir sobre la superficie de los álabes, generando el torque necesario para hacer girar la turbina, además por la posición del generador y la caja de engranajes, los cuales se encuentran a nivel del piso, facilita el montaje y acceso para el mantenimiento periódico de sus componentes. Sin embargo estas turbinas de eje vertical presentan una desventaja, el par aerodinámico varía fuertemente con la posición de las álabes, aun teniendo viento constante, causando una importante fatiga en el material de los álabes, además el generador podría verse afectado durante el ciclo por la variación constante del torque y la potencia podría producir un recalentamiento en el bobinado del motor, es por eso que los componentes de esta turbina tienden a requerir un mayor mantenimiento en comparación con la turbina de eje horizontal. [16]

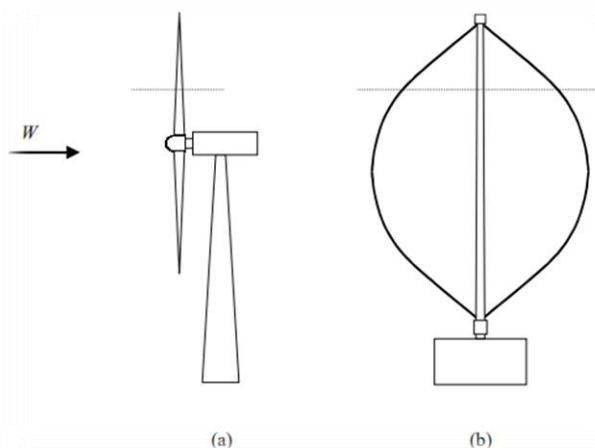


Figura 1. Tipo de turbina eólica horizontal (a) y vertical (b). Fuente: [16]

Potencia eólica instalada a nivel mundial y sus residuos

Según el reporte entregado por REM21 la cual aglomera a comunidad científica, gobiernos, ONG y el sector industrial, se estimó que para el año 2021 se agregaron 102 gigavatios (GW) de energía eólica a la capacidad instalada a nivel mundial, donde 83 GW se instalaron onshore y alrededor de 19 GW fueron instalados offshore. Es así como la capacidad total de energía eólica mundial creció en un 13,5% con respecto a 2020 posicionándose en los 845 GW de energía instalada a nivel mundial; de esos 791 GW corresponden a sistemas onshore y el restante offshore [17]. La capacidad anual y el incremento anual de los últimos 10 años se puede visualizar en la figura 2.

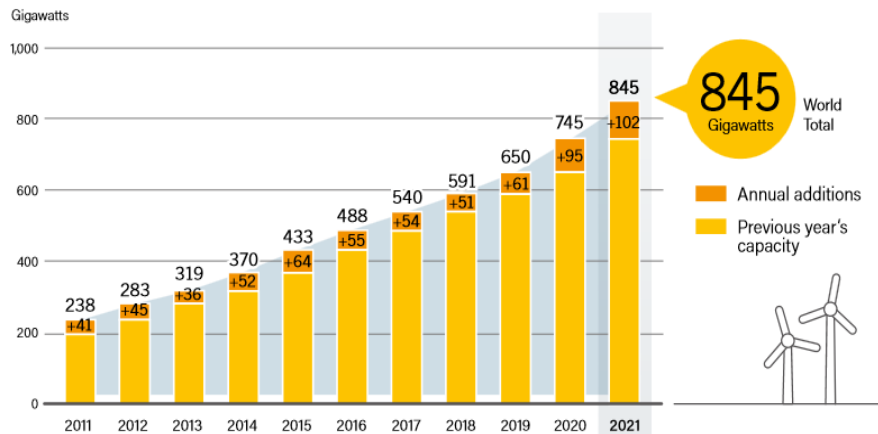


Figura 2. Capacidad global de energía del viento y adiciones anuales Fuente: [16]

La capacidad de energía eólica en operación en todo el mundo contribuyó con un 7% de generación eléctrica total en 2021. Sin incluir a China las instalaciones globales aumentaron más del 14% respecto al 2020 [18]. Nuevos parques eólicos alcanzaron plena operación comercial en al menos 55 países, frente a 49 en 2020. Por ejemplo, Arabia Saudita, habilitó su primer proyecto comercial de 0,4 megavatios MW. Debido al calentamiento global visto en las últimas décadas países como China, Estados Unidos, Alemania, India y España están impulsando la gran transición de la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles a las energías renovables siendo los 5 países más representativos para el 2021 [19].

Principales mercados:

Dentro de los principales países a nivel mundial que más agregaron energía eólica tal como se ve en la figura 3, por decimotercer año consecutivo Asia principalmente **China**, fue el mercado más grande a nivel mundial para el año 2021, representando alrededor del 61.4% de la capacidad energética agregada para este año, frente a casi el 60 % agregada en el 2020. Dentro de este mercado **India** se destacó por ser el segundo generador más grande de este continente. Mientras tanto en el continente americano, **Estados Unidos** representó en su capacidad agregada un 13,8% y se posicionó en el segundo lugar, mientras que **América Latina y el Caribe** generaron un 5,7% de la energía total agregada. Dentro del continente europeo el cual representó un 15,6% de la energía agregada, **Alemania** lideró el primer lugar y el tercero a nivel mundial, mientras que **España** se posicionó en el quinto lugar [20].

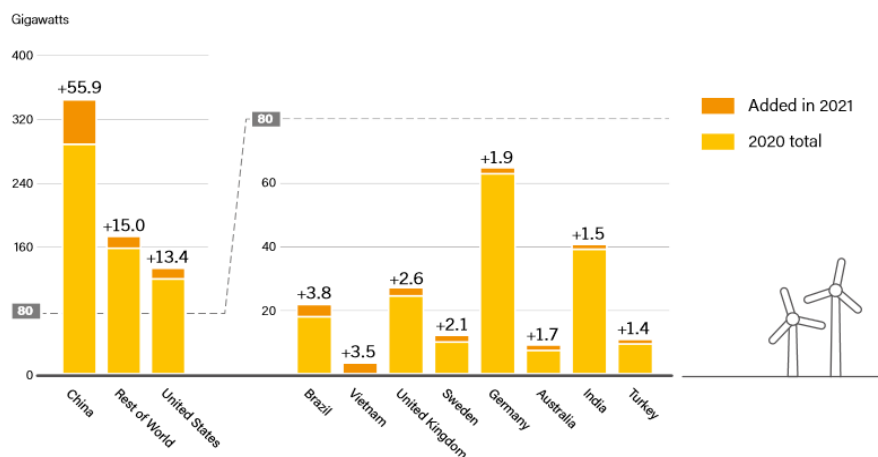


Figura 3. Capacidad global de energía del viento y adiciones anuales Fuente: [17]

China: Es el cuarto país más extenso del mundo con una superficie aproximada de 9.6 millones de km², es el país más poblado del globo con más de 1300 millones de habitantes. Debido a su gran extensión territorial, su gran longitud de costas, su geografía y el clima, China es rica en diferentes tipos de energía, destacándose por ser líder en el mundo en la generación de energía eléctrica a partir de energía eólica. [21].

Las instalaciones totales de energía eólica de China aumentaron casi un 2,8% en 2021 a un nuevo récord, y el país representó más de la mitad de las adiciones globales [22]. Dentro de los 55,9 GW agregados al año, 41,4 GW fueron instalados en tierra y 14,5 GW en alta mar agregado obtenido China a un aproximadamente 346,7 GW Cerca de 47,6 GW se integraron a la red nacional. La utilización de la energía eólica en China promedió el 96,9 % en 2021.

Los fabricantes chinos de turbinas representan alrededor de la mitad de fabricación mundial; la mayoría de sus turbinas continúan siendo instalados en el país, aunque la demanda de instalación en tierra está disminuyendo, provocando que los fabricantes recurran a otros mercados; MingYang fue el primer fabricante chino de turbinas en anunciar planes para construir fábricas en Europa [23]. 6 de los 10 principales productores de turbinas en 2021 tienen su sede en China, los 4 restantes son Vestas (Dinamarca), Siemens Gamesa (España), GE (EE. UU.) y Nordex Group (Alemania) [24].

Por otra parte, China se convierte en el mayor generador de residuos eólicos; Se estima que para el 2022 se generen alrededor de 59.000 toneladas de residuos, este número se duplicará en 8 años según la capacidad instalada [25].

Estados Unidos: Con 9.83 millones de km² y con una población de más de 316 millones de habitantes, es el quinto país más grande del mundo. Debido a su posición geográfica el país tiene buenos recursos eólicos, solares e incluso geotérmicos o en biogás [26].

Estados Unidos volvió a ocupar el segundo lugar a nivel mundial en energía adicionada con 13,4 GW (12,9 GW netos, todos onshore) instaladas durante 2021, por un total de 135 GW [27]. Sin embargo, las instalaciones se han visto detenidas frente al 2020, por varios factores, incluida la cadena de suministro y restricciones comerciales, desafíos logísticos, interconexión colas y costos crecientes, todo lo cual afectó la economía de proyectos. La incertidumbre sobre el entorno político también retrasó inversión; Los precios de los PPA eólicos aumentan un 19,2% en promedio en relación con 2020. Para fines de año, EE. UU. incluyeron 23,9 GW de capacidad en tierra y 17,5 GW offshore, con este último impulsado principalmente por la contratación estatal. La energía eólica representó el 9,1% de los servicios públicos de EE. UU. para el 2021, frente al 8,4% en 2020 [28].

Europa: En su conjunto ocupó el segundo lugar después de Asia en participación regional de nuevas instalaciones globales, con casi 16 GW añadidos (más del 18% sobre 2020) por un total de 225 GW. Puesta en marcha de nuevos proyectos en toda Europa, sin embargo, presentan problemas de la cadena de suministro y un cuello de botella por la generación de los permisos. Los cinco principales Países europeos con más adiciones en la capacidad eólica para el 2021, fueron España, Reino Unido, Suecia, Alemania, Países Bajos (1,3 GW) y Francia (1,2 GW) – representó casi el 58% del total de la región (frente a 60,6% para los cinco primeros en 2020) [29]. Un porcentaje pequeño de generación es debido a las instalaciones totales de Croacia, Dinamarca, Finlandia y el Federación Rusa. cada uno agregó cantidades récord de nueva capacidad. La mayor parte de la nueva capacidad en Europa fuera del Reino Unido fue instalado en la Unión Europea (UE), donde se conectaron 11 GW, principalmente en tierra (10 GW, o 91%), para un total de fin de año de 188,9 GW (173,3 GW en tierra y 15,6 GW en alta mar).⁷³ En toda la EU-27 [30]. 18 países agregaron capacidad durante

2021, en comparación con 17 el año anterior. Sin embargo, las instalaciones totales aumentaron solo ligeramente sobre los 10,5 GW agregados en 2020. La UE necesita instalar 32 GW al año para alcanzar el objetivo de la región satisfacer el 40% de su consumo final de energía con renovables fuentes para 2030 [31]

India: Se ubicó entre los 10 principales países del mundo en adiciones en 2021, subiendo al noveno lugar con 1,5 GW agregado, lo que representa un aumento del 30% con respecto a las adiciones de 2020, para un total aproximado de 40,1 GW (todo en tierra) [32]. Al igual que en Australia, India aumento su capacidad, debido en gran medida a la puesta en marcha de proyectos retrasados. El COVID-19 tuvo impactos significativos en la economía india, con la cadena de suministro y los desafíos laborales afectaron las instalaciones de energía eólica; una disminución temporal del consumo de electricidad también detuvo algunos proyectos. India continúa apuntando a 60 GW de capacidad de energía eólica para 2022 y 140 GW para 2030 [33]

Fabricación típica de los álabes en turbina eólicas

Para manufacturar un alabe se debe tener en cuenta que este componente cumpla con todas o al menos la mayoría de las siguientes características: alta rigidez para mantener un rendimiento aerodinámico óptimo, baja densidad para reducir las fuerzas de gravedad y fatiga prolongada para reducir la degradación del material [34].

Los álabes típicos para turbinas horizontales HAWT (Horizontal axis wind turbine) se fabrican a partir de moldes ya prefabricados, donde se generan dos caparazones haciendo uso de resinas y fibras, estos refuerzos están elaborados normalmente con un 75% de fibra de vidrio y un 25% fundido en resina epoxi o resina de poliéster las cuales se disponen en capas, posteriormente se realiza vacío al sistema compuesto para retirar burbujas de aire que puedan afectar el curado del material, una vez se obtienen las dos secciones, pasan a ser ensambladas y unidas usando una junta adhesiva de epoxi. En medio de estos componentes debe existir un mástil cuya función es servir como columna central para soportar las cargas del viento como se observa en la figura 4, posteriormente se le dan unas capas de pinturas protectoras para la intemperie y para evitar que los rayos tengan efectos adversos al material en caso de verse en una situación de estas [8].

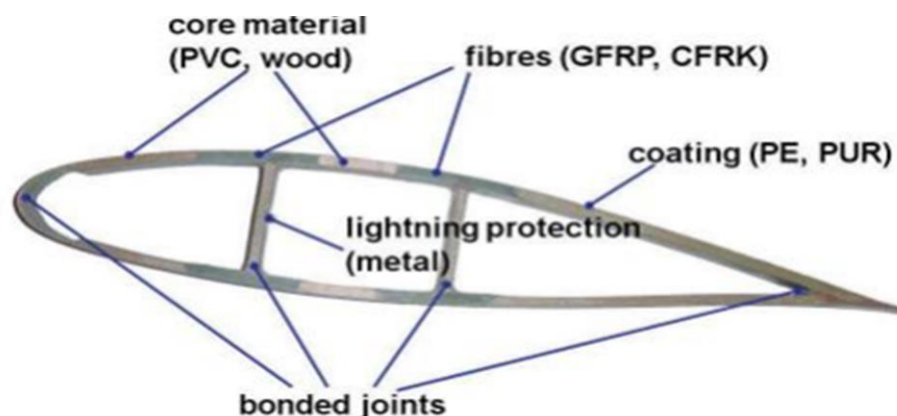


Figura 4. Composición típica pala turbina eólica. Fuente: Fuente: [8].

Para algunas turbinas verticales VAWT (Vertical axis wind turbine), existen procesos de fabricación que puede llegar a ser mucho más sencillos que para las turbinas horizontales HAWT, debido a que

el perfil aerodinámico se puede hacer uniforme en todo el tramo del alabe, siempre y cuando el diseño de sus álabes sean rectos, como se evidencia en la figura 5 donde se desarrolló un alabe, mediante extrusión de aleación de aluminio doblado, con un bajo costo en la mano de obra y en los costos por materiales. Esta técnica es aplicable en polímeros reforzados con fibra de vidrio o fibra de carbono para la fabricación de los álabes en las turbinas VAWT [35].

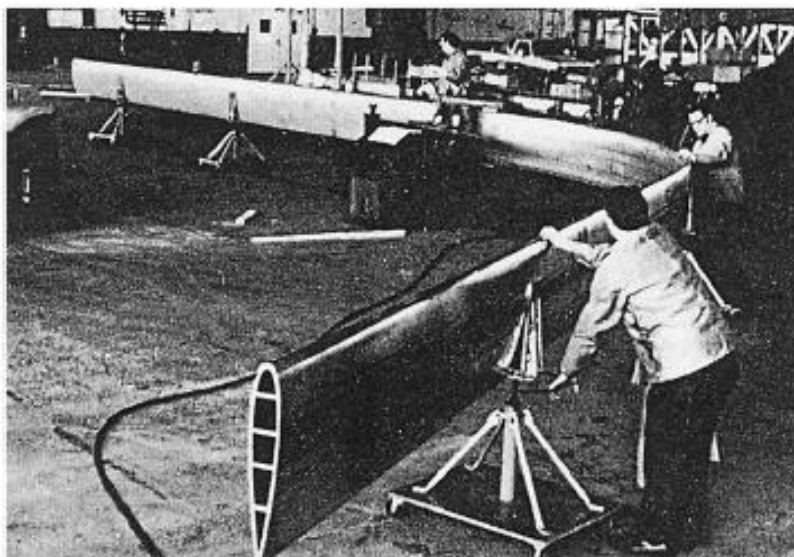


Figura 5. Fabricación de alabe para turbina vertical de 17 metros hecha por Alcoa en 1970. Fuente: [35]

Disposición final turbina eólicas

De las turbinas eólicas se puede reciclar materiales como metales, madera y algunos plásticos, si se necesitan 12 a 15 toneladas de material, para generar 1 Megawatt de energía eléctrica, es así como en la figura 6 se visualiza el crecimiento en el uso de compuestos para álabes en un período de tiempo del año 2000-2030. También se analiza que existe un incremento gradual hasta el año 2021, para el periodo de tiempo comprendido entre 2021-2026, se podría estar disminuyendo el uso de materiales [8].

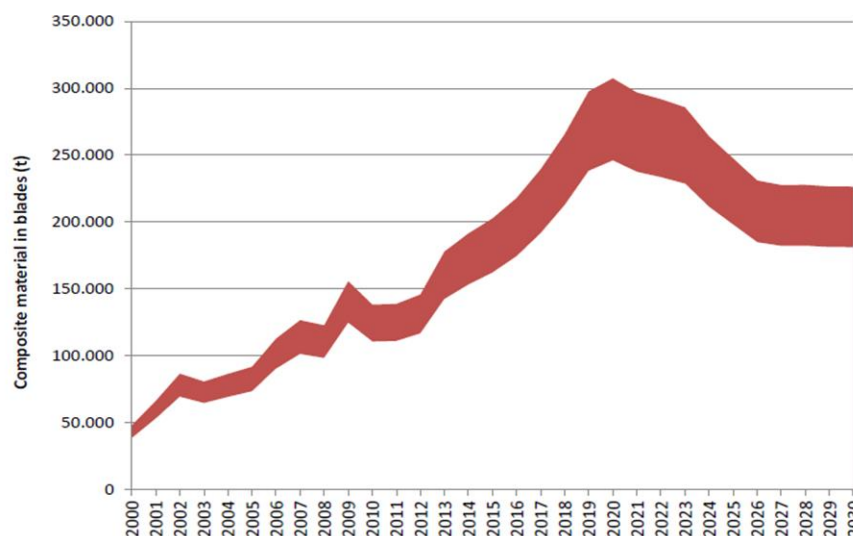


Figura 6. Uso anual de materiales compuesto para álabes de turbinas eólicas. Fuente [8]

Las opciones de gestión de residuos compuestos que actualmente están disponibles para la eliminación y reciclaje de turbinas eólicas se muestran en la figura 7.

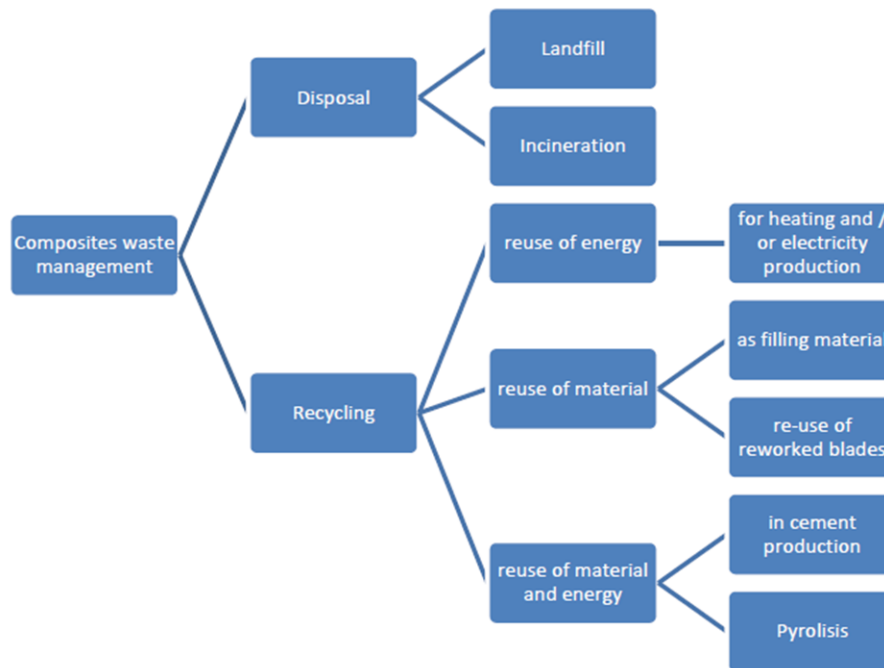


Figura 7. Opciones de disposición y reciclaje para álabes de turbinas eólicas Fuente: (EWEA,2012)

La disposición de los álabes de las turbinas eólicas se puede clasificar en 2 grupos:

Los que van a un relleno sanitario:

Actualmente el relleno sanitario representa la opción más barata. La legislación de cada país podría incentivar en algunos casos el desarrollo de soluciones alternativas como en la creación de un mercado de reciclaje para garantizar un mejor manejo de estos residuos.

Los que son incinerados

La ventaja de este método es que ya existen numerosas instalaciones (plantas de incineración). La desventaja es que no se pueden incinerar piezas grandes; y que tiene un alto contenido de cenizas (alrededor del 50%) que debe rellenarse posteriormente, y también tiene residuos de escoria que pueden causar problemas en el sistema de limpieza de gases de combustión.

Por otra parte, el reciclaje se puede clasificar en 3 grandes grupos:

Mecánico

El reciclaje mecánico utiliza un molino para descomponer el material por trituración, molienda u otro proceso mecánico similar. Las piezas de desecho resultantes se pueden separar tamizándolas en productos en polvo (ricos en resina) y productos fibrosos (ricos en fibras). La ventaja es que tiene un costo de reciclaje bajo, aunque suele ser difícil de mezclar debido a los componentes de esta mezcla, aunque existen algunas industrias que utiliza de manera efectiva este residuo y es la industria de la construcción, para rellenos de maderas, asfaltos o cemento. De igual manera se establece que el reciclaje mecánico se utiliza más en polímeros reforzados con fibra de vidrio [36]

Pirólisis

La Pirólisis, es la descomposición térmica de moléculas orgánicas en una atmósfera inerte, es uno de los métodos de reciclaje más extensos para recuperar fibras reforzadas en polímeros. Durante el proceso de pirólisis, el material se calienta desde 450°C hasta unos 700°C en una atmósfera de ausencia de oxígeno, en horno de cinta con atmósfera controlada para evitar la formación de carbonilla; la matriz del polímero volatiliza en moléculas de menor peso, mientras que las fibras de carbono son principalmente inertes y finalmente se recuperan [37]. Las ventajas de este proceso es que los materiales expuestos al calor conservan muy bien las propiedades mecánicas, además se logra recuperar gran parte de la resina y las fibras, además este proceso no usa productos químicos como disolventes. Las desventajas del método es que las fibras expuestas al calor en su mayoría las de la superficie del material podrían verse carbonizadas, afectando la sensibilidad de las propiedades de las fibras y además genera una liberación de gases, siendo peligroso y contaminante para el medio ambiente; En EE. UU. La empresa Materials Innovation Technologies RCF (MIT-RCF) fue creado por el homónimo "soluciones de materiales avanzados, con el fin de gestionar estos residuos de manera eficiente a través del mecanismo de reciclaje de pirolisis [38].

Químico

Los métodos químicos para el reciclaje de la fibra de carbono, se basan en un reactivo como el alcohol bencílico y fluidos supercríticos (SCF), varios tipos de SCF se han utilizado para el reciclaje de fibras de carbón, como el metanol, etanol, acetona y propano. Los fluidos supercríticos (SCF) son fluidos a temperaturas y presiones típicamente justo por encima del punto crítico. En esta etapa, el líquido se presenta en una sola fase supercrítica, mientras que tiene características combinadas como densidad similar a un líquido, poder de disolución, viscosidad y difusividad similares a las de un gas. Los SCF pueden, por lo tanto, penetrar sólidos porosos y disolver materiales orgánicos, sin dejar de ser relativamente inocuo en condiciones atmosféricas. El reciclaje químico con fluidos supercríticos un enfoque más reciente, es reconocido para producir fibras de carbón prácticamente sin degradación mecánica, especialmente cuando se usa propanol. Para permitir la recuperación sustancias químicas útiles de la matriz como la resina, se utilizan condiciones de baja temperatura típicamente menores a 350 °C, así se obtiene que la resina polimérica se descompone, mientras que la fibra de carbono permanezca inerte, para posteriormente ser recolectados. Las ventajas que tiene este proceso es que ofrecen una muy buena retención en las propiedades mecánicas y se obtiene fibras de carbón con buenas longitudes, además que se recupera la resina. La desventaja es que la resina pierde adhesión a otros polímeros y además es contaminada con el producto químico, este se podría liberarse utilizando una pirolisis posterior a este proceso. Otra desventaja es que podría tener un impacto ambiental si los solventes son mal utilizados pudiendo llegar a ser liberados por accidente al ambiente [39].

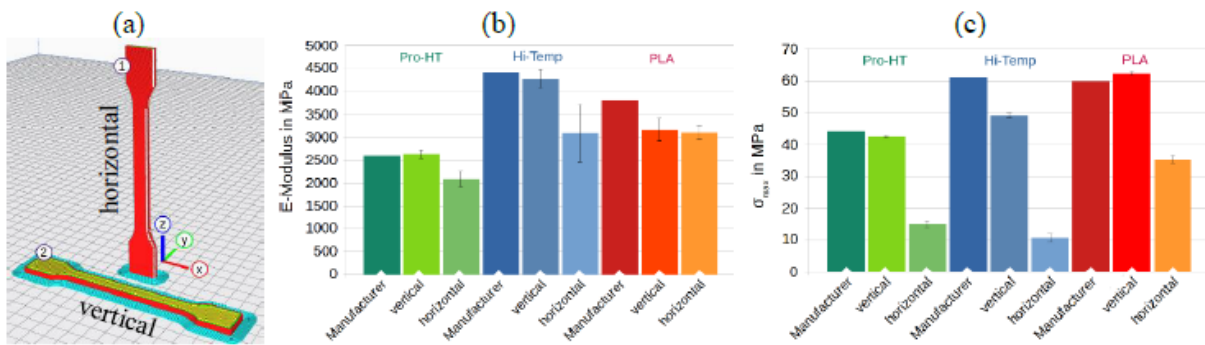
En Japón, trabajan en la recuperación de fibra de carbón y resina epoxi utilizando un proceso que utiliza alcohol bencílico y un catalizador en una atmósfera de N₂. En esa planta se incluye un sistema de destilación para la limpieza el fluido. Ya se ha logrado la recuperación de fibras de carbono en componentes de la industria deportiva y aeronáutica [40].

Capítulo 3: Estado del arte

De acuerdo a la problemática abordada anteriormente sobre el material de fabricación de los álabes, se investiga en la literatura para validar que investigaciones han abordado el tema de fabricación de álabes para turbinas eólicas, utilizando materiales alternativos. Además, se indaga sobre que teorías gobiernan sus diseños, que métodos usaron para desarrollar sus teorías y cuáles son los resultados más significativos, los cuales pudieran nutrir esta investigación.

En la investigación, titulada “Álabes de rotor impresas en 3D para un aerogenerador de investigación: Diseño y ensayos aerodinámicos y estructurales”. El objetivo fue la fabricación aditiva de un rotor con radio de 1 metro. Las consideraciones aerodinámicas incluyeron la selección del perfil aerodinámico, el cálculo de la geometría de la pala y la simulación de carga. Las consideraciones estructurales están soportadas por tres aspectos: los materiales imprimibles, las estructuras de relleno y un larguero de carga. Los materiales probados para la fabricación de los álabes en impresión 3D hacen parte de la familia del PLA, esto debido a que se considera biodegradable, no tóxico y neutro en CO₂. El primer material es el **Pro-HT** (T_v = 115 °C), el segundo denominado el (High Temperature) **Hi-Temp** (T_v = 160 °C), ambos materiales biodegradables y el tercero es el **PLA** (T_v = 60 °C). En comparación con el PLA estándar, los materiales Pro-HT y Hi-Temp se caracterizan por una mayor temperatura de reblandecimiento Vicat (T_v) y es la temperatura a la cual el material pierde sus propiedades.

Se fabricaron probetas para pruebas de tensión, con una altura de la capa de 0,5 mm y 24 probetas estándar, es decir, 4 probetas por cada material, en ambas direcciones de impresión horizontal y vertical como se ilustra en la Figura 8a; en la figura 8b y 8c, se visualiza las medidas del módulo de elasticidad y la resistencia última a la tensión, obteniendo valores que oscilan entre 2000-4000 MPa para el módulo de elasticidad y 10-60 MPa para resistencia a la tensión. Las probetas de PLA fabricadas de manera vertical paralelo a la cama, son las más resistentes en comparación con los otros dos materiales. Sin embargo, el material Hi-Temp obtiene aproximadamente un 12 % más de elasticidad respecto al PLA [41].



Además, se encuentra que la máxima resistencia a la tensión del PLA se alcanza si la relación entre el diámetro de la boquilla y la altura de la capa es superior a 1,6. En el caso actual, esta relación es 2 La Figura 8b muestra el módulo de elasticidad (E) [18]. La dirección de impresión vertical, es la recomendada en las especificaciones del fabricante y fue la que obtuvo un mayor módulo [42]. Sin embargo, en la dirección horizontal (posición vertical), (E) disminuye. Esta tendencia es significativamente más pronunciada en la resistencia última a la tensión, (σ_{max}). como se muestra en la Figura 8c. La razón es que, en la posición horizontal, las capas impresas tienen menos área de adhesión, por lo tanto, no van a tener una buena rigidez ni tampoco una buena resistencia [43].

Una vez seleccionado el material se procede a fabricar la carcasa del alabe, la cual fue reforzada por un larguero de carga hecho de plástico reforzado con fibra de carbono (CFRP). El larguero consta de 8 tubos prefabricados que se ensamblan en una configuración telescópica en relación con el espesor máximo de cada sección de pala, como se muestra en la Figura 9.

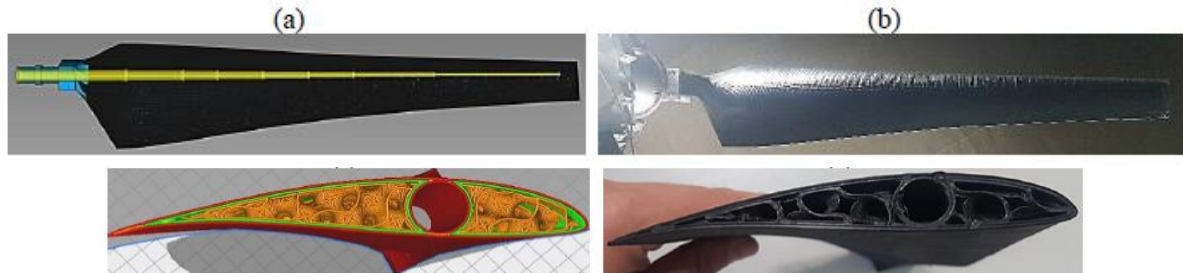


Figura 9. a) Diseño de rotor con el larguero incrustado en el alabe. b) Alabe impresa en 3D durante pruebas en el túnel de viento; c) Sección transversal alabe en Diseño. d) Sección transversal alabe fabricada.

Obteniendo los álabes se ensamblan y se obtiene una turbina eólica, la cual es puesta a prueba. Los resultados como se muestra en la figura 10 muestran que, a 3 diferentes velocidades de entrada, la potencia en watts obtenida es de $P = [64,124,216]$. En todos los casos, el coeficiente de potencia máxima es $C_{pmax} = 0,3 (\pm 0,01)$. El TSR de diseño fue de $\lambda_d = 4$. El TSR óptimo de los experimentos aumenta significativamente a $\lambda_{opt} = 5,4 (\pm 0,1)$. Como resultado, $c_p(\lambda_d)$ cae a 0,23. La razón del cambio de TSR es que el diseño de la pala se basa en el flujo libre en lugar de las condiciones del túnel de viento. Por lo tanto, dentro del túnel de viento, C_{pmax} se alcanza en $\lambda_{opt} = 5.4$, donde tanto el factor de inducción axial (a) como el ángulo de ataque (α_d) resultante están más cerca de los valores de diseño de $a = 1/3$ y $\alpha_d = 9^\circ$, respectivamente. Estos resultados se relacionan con los experimentos en túnel de viento basados en similares palas del rotor, es decir, la FX63-174, $R = 1,1$ m donde informan que el TSR de diseño se desplaza de $\lambda_d = 5$ a $\lambda_{opt} \geq 8$ debido a que los efectos del túnel de viento donde $C_{pmax} \leq 0,37$ [13].

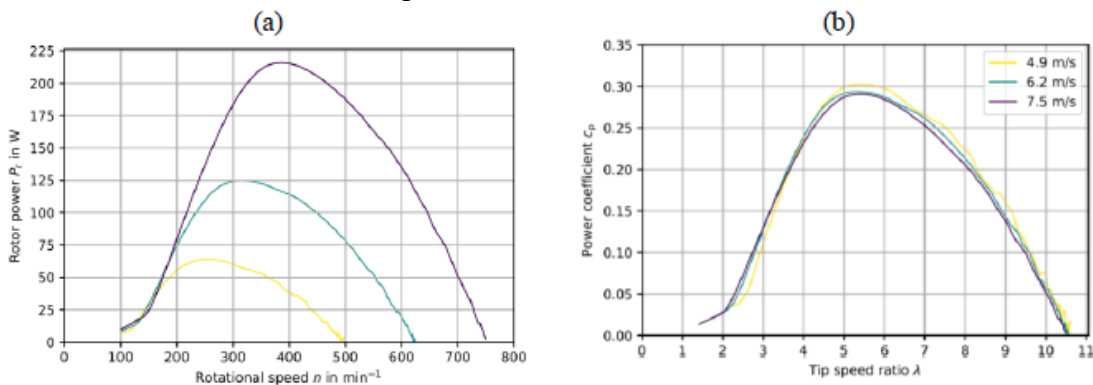


Figura 10. a) Pruebas en el túnel de viento; b) Potencia vs la rotación de velocidad TIP: [41].

En conclusión, esta investigación guía a nuevos investigadores en la fabricación de álabes para turbinas eólicas a baja escala, utilizando la tecnología de disposición fundida en este caso el PLA. Este material evidencia una buena eficiencia con un coeficiente de potencia sobre 0.23.

Complementario al estudio de investigación anterior, se presenta este nuevo desarrollo denominado “Método de diseño y fabricación de álabes de polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP) para Aerogenerador de eje vertical”. El autor sustenta su estudio, en una investigación que presenta el análisis de la turbina Darrieus de rotor H como un convertidor de energía eólica de alta velocidad. El análisis numérico presentado sirvió como solución para simular el movimiento de los álabes. En este trabajo se presentaron aspectos relacionados con el diseño, análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD), evaluación de la resistencia de la estructura y fabricación de los álabes para aerogeneradores de eje vertical. Para la obtención del prototipo del alabe se realizó por fabricación

aditiva usando una solución de modelado por deposición fundida (FDM) siendo ABS el material base y las fibras de vidrio un refuerzo, para mejorar las propiedades mecánicas de los álabes. Para este rotor se eligió el perfil aerodinámico simétrico NACA 0018 que se encuentra entre los más utilizados para VAWT.

Para determinar la potencia nominal de un rotor eólico se aceptó la velocidad del viento igual a 11 m/s. Este valor se ajusta al rango de velocidades del viento entre 10 y 12 m/s utilizado por la mayoría de los fabricantes de aerogeneradores. Según los parámetros de los aerogeneradores de eje vertical con álabes aerodinámicos existentes en el mercado, el coeficiente de potencia no supera el valor de 0,3 [44]. El coeficiente de potencia de diseño utilizado es de 0,22. Todos los cálculos fueron realizados en el software MathCAD. Para el diseño del rotor la relación de aspecto entre altura y diámetro fue aceptado cerca de 1. Dado que el rotor es un prototipo experimental, determinar la relación de aspecto óptima se logrará en condiciones reales de prueba. Entonces, el diámetro del rotor se obtuvo 1600 mm y su altura 1800 mm. La longitud de la cuerda del perfil aerodinámico de 110 mm. los rotores diseñados en Solidworks se presenta en la figura 11 [45].

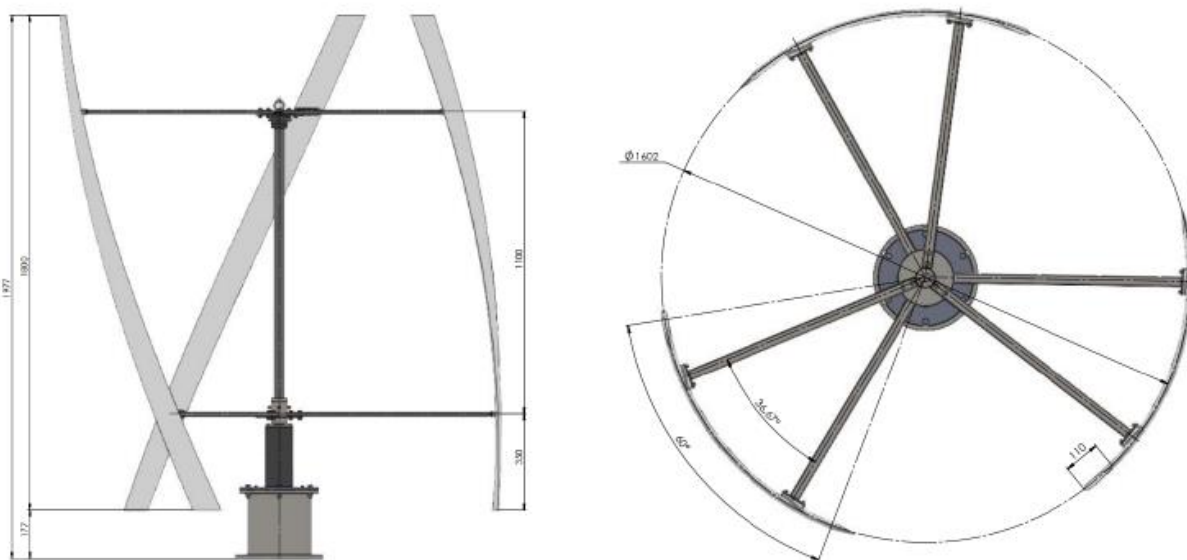


Figura 11. a) Diseño de turbina tipo H helicoidal [45]

El análisis CFD del modelo de rotor se utilizó para verificar la eficiencia del rotor. Se desarrolló un modelo CFD utilizando el software de análisis de elementos finitos ANSYS CFX. Para reducir el tiempo y los recursos de cómputo, solo se consideró la geometría del alabe. Las dimensiones del dominio fluido computacional se eligieron teniendo en cuenta las recomendaciones de los autores guías de esa investigación. En la figura 12a se ilustra los dominios fluidos, en la 12b se visualiza la malla utilizada para el análisis de métodos finitos del rotor.

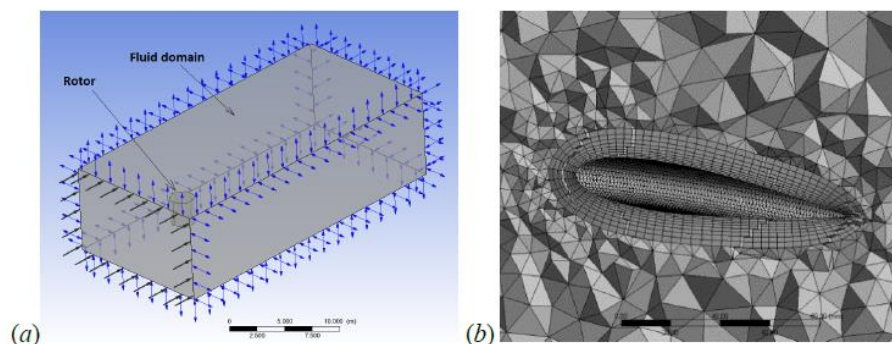


Figura 12. a) Flujos de dominio computarizados. b) Detalle del mallado sobre el alabe [45]

Para la evaluación de la carga centrífuga, con el fin de evitar la sobre ingeniería del rotor, la rotación máxima se aceptó una velocidad de 400 min^{-1} (equivalente a una velocidad del viento de $\approx 12 \text{ m/s}$). Se impusieron las siguientes restricciones para el diseño preliminar de la estructura de resistencia del alabe: La masa del alabe no debe exceder los 2 kg; esfuerzos cortantes máximos $[\sigma] = 40 \text{ MPa}$ (los esfuerzos cortantes de la falla estan alrededor de 80 MPa). Los esfuerzos cortantes son críticos para los materiales compuestos porque causan la degradación de la resina. La longitud de las palas era de 1800 mm. Debido a limitado volumen de trabajo de la impresora, los álabes fueron seccionadas en 8 segmentos y ensambladas finalmente en una sola pieza. La temperatura de impresión fue de 245 °C para el material. El grosor del filamento utilizado es de 1,75 mm y la boquilla del cabezal del extrusor diámetro 0,4 mm y el espesor de capa fue de 0,2 mm. La estructura de relleno "cuadrícula" fue del 85% a una velocidad de impresión de 60 mm/s. Antes de la creación del prototipo, la geometría del alabe se redujo en 1 mm para compensar el revestimiento de GFRP. Para los materiales reforzados se utilizaron 5 capas de fibra de vidrio tipo Twill con matriz de epoxi como se ve en la figura 13a y 13b.

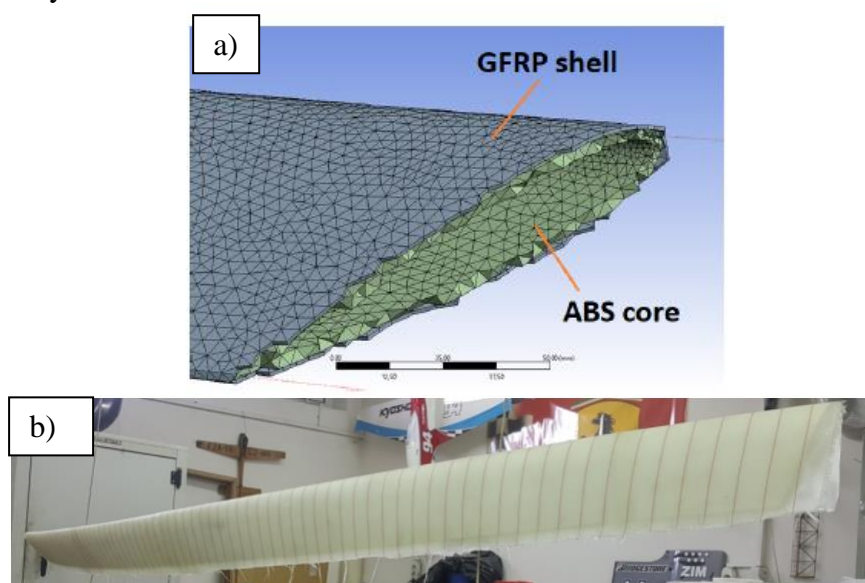


Figura 13. a) Diseño en sándwich de alabe. b) Detalle del refuerzo de fibra de vidrio con matriz epóxica. [45]

Basados en los cálculos en la aplicación Mathcad usando el coeficiente de potencia $C_p = 0,22$. Los resultados se sintetizan en la figura 14. Se puede notar en la figura que la potencia estimada por ANSYS CFX es menor debido a los efectos aerodinámicos 3D.

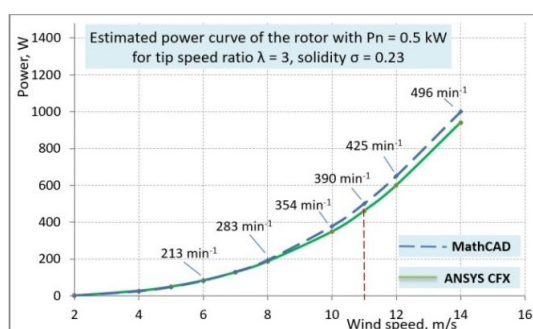


Figura 14. a) Diseño en sándwich de alabe. b) Detalle del refuerzo de fibra de vidrio con matriz epóxica. [45]

Por último, en la Figura 15 se presentan los segmentos obtenidos del prototipo ABS

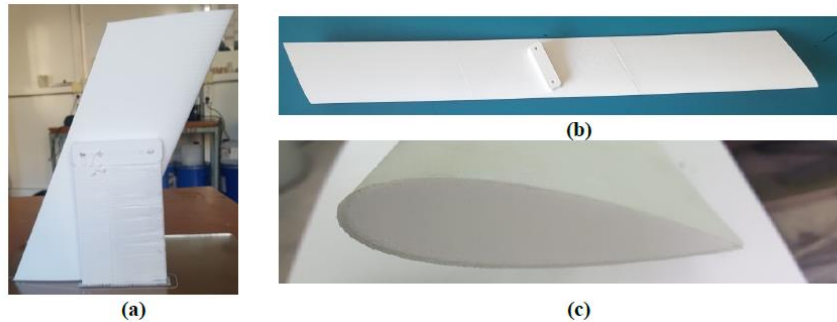


Figura 15. Segmentos de ABS de los álabes obtenidos por método FDM. a) Área de puntos de conexión de la espada. b) Tres segmentos ensamblados al final de la hoja. c) El prototipo de pala cubierto por GFRP.

En conclusión, nuevamente se analiza otro estudio de investigación, donde se utilizó la disposición fundida en impresión 3D para la fabricación de álabes de turbinas eólicas, obteniendo resultados muy favorables en temas de diseño y fabricación. Se utilizó un análisis computacional CFD, permitiendo ahorros de recursos importantes. La potencia obtenida y el coeficiente se enmarcaron en las potencias de turbinas comerciales a baja escala.

La tercera investigación citada se titula “Compuesto de fibra de vidrio para alabe vertical en la aplicación de una planta energía de turbina eólica”. En dicha investigación el autor utilizó una resina de base polimérica tipo poliéster como matriz, la cual mezcló con diferentes tipos de fibras de vidrio para obtener un compuesto el cual sirviera para la elaboración del alabe de una turbina eólica vertical tipo Savonius. Uno de los objetivos de este trabajo es realizar ensayos a los compuestos, mediante pruebas de impacto y tracción. El método utilizado es el laminado manual para la fabricación de los álabes. Se utilizó este método porque es el más económico, requiere menos equipos, se puede dar un ajuste al grosor y es fácil de ajustar la composición de la fibra. En la Figura 16 se puede ver que la altura del alabe del molino de viento Savonius es de 72 cm [46].

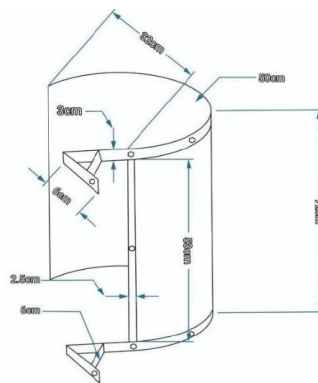


Figura 16. Diseño de turbina eólica Savonius. Fuente: [46]

Para las pruebas se fabricaron muestras de la siguiente manera: 2 capas de fibra aleatoria; 2 capas de WR200; 2 capas de fibra aleatoria y 2 capas de WR200. Luego, las muestras se formaron de acuerdo con el estándar de prueba de tracción ASTM D 638 y el estándar de prueba de impacto ASTM D 5942-96. El material matriz utilizado poliéster transparente. De los resultados se puede concluir lo siguiente: La prueba de tracción del compuesto en 2 capas de fibras aleatorias es de 43,08 MPa; Para 200gr de fibras roving tejidas de 2 capas WR200, la resistencia a la tracción promedio del compuesto es de 55,98 MPa, mientras que para fibras aleatorias y fibras tejidas roving 200gr WR200, la resistencia a la tracción fue de 49,52 MPa. Estos resultados de tracción se pueden ver en la figura 17 a. En la figura 17 b se puede visualizar el módulo de elasticidad. Posicionando en primer lugar a la fibra doble de WR200 con un valor 24.81 GPa, de segundo lugar

se ubicó la fibra aleatoria y la fibra WR200, con un módulo de 21.88 y por último la fibra doble aleatoria obtuvo 17.39 GPa.

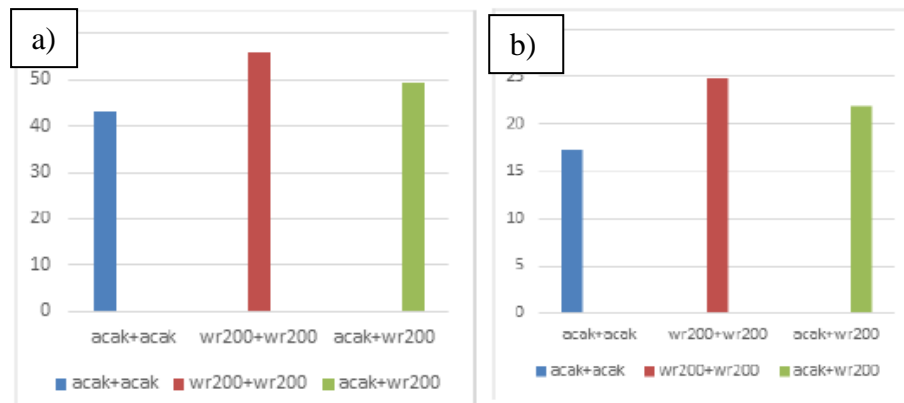


Figura 17. a) Resistencia a la tensión en MPa. b) Módulo de elasticidad en GPa. Fuente: [46]

Los valores de tensión y módulo de elasticidad, se resumen en la tabla 1.

Variación de materiales	Resistencia a la tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
2 fibras aleatorias	43.08	17.39
2 fibras WR200	55.98	24.81
2 fibras aleatorias y 2 fibras WR200	49.52	21.88

Tabla 1. Valores de tensión y módulo de elasticidad. Fuente [46]

Para las pruebas de impacto, la resistencia al impacto promedio del compuesto en fibras aleatorias es de 0,023 julios/mm² con una energía absorbida promedio de 0,6233 julios, para fibras roving tejidas de 200gr la resistencia al impacto promedio es de 0,035 julios/mm², con una energía absorbida de 0,7588 julios, mientras que para fibras aleatorias y roving tejido de 200gr de 2 capas la resistencia al impacto resultante es de 0,035 julios/mm² y la energía absorbida es de 0,7046 julios como se puede visualizar en las figuras 18 a y 18 b. En la siguiente tabla número 2 se visualizan los resultados obtenidos para la prueba de impacto.

Variación de materiales	Resistencia al impacto (J/mm)	Energía absorbida (J)
2 fibras aleatorias	0.023	0.6233
2 fibras WR200	0.035	0.7588
2 fibras aleatorias y 2 fibras WR200	0.035	0.7046

Tabla 2. Valores de resistencia al impacto y energía absorbida. Fuente [46]

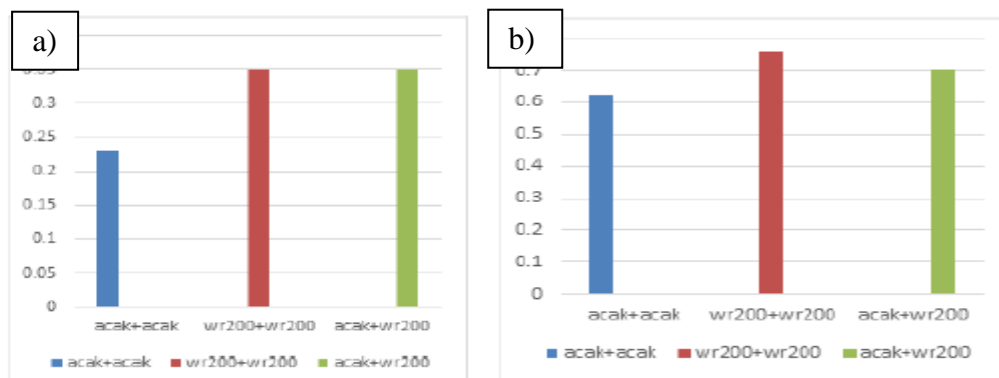


Figura 18. a) Resistencia al impacto J/mm. b) Energía absorbida en Jules. Fuente: [46]

El material a utilizar para la fabricación de los álabes finalmente fue el de doble capa de fibra de vidrio WR200, debido a que en comparación con los otros materiales, obtuvo una mejor resistencia a tracción, un buen módulo de elasticidad, mejor resistencia al impacto y mayor absorción de energía.

Esta investigación permite ver el beneficio de las fibras, al mejorar las propiedades mecánicas de los materiales con matriz polimérica como lo visto en el caso anterior, donde se utilizó un poliéster y se probaron con diferentes tipos de fibras de vidrio en pruebas mecánicas para validar cual era el mejor para la fabricación de los álabes similar al caso de estudio de este proyecto.

La cuarta investigación de base denominada “Comparación experimental y numérica del comportamiento de impacto entre compuesto termoplástico y compuesto termoestable para álabes de turbinas eólicas” afirma que los aerogeneradores desarrollan un desequilibrio entre las fuerzas de sustentación y arrastre [47]. Los historiales de carga cíclica de viento y la gravedad que existen en las distintas ubicaciones de los álabes sugieren que podría ser ventajoso usar diferentes materiales para diferentes partes del alabe para evitar fallas. Además de eso, la compleja geometría del alabe hace que los materiales compuestos avanzados sean la mejor opción de diseño, estos proporcionan una alta relación peso-rigidez y relaciones fuerza-peso, y resistencia adecuada a la fatiga y a la corrosión, con costos de producción controlados [48]. Los materiales de álabes de los aerogeneradores de compuestos están expuestos a los impactos que se pueden producir en el proceso de ensamblaje y operación (granizo, pájaros, etc.). Lo que lleva a el deterioro de la integridad estructural y la capacidad de carga. Otros daños que pueden sufrir son: El agrietamiento de la matriz, la delaminación y la fractura de la fibra, los cuales pueden amenazar la vida útil de los álabes.

La prueba de impacto de peso de caída [55] es un experimento diseñado para medir las propiedades de impacto aplicando una carga concentrada a un espécimen compuesto usando un dispositivo semiesférico de impacto. En los experimentos presentados, las propiedades de impacto del material termoplástico el cual se denominará “Elium” y compuesto termoestable se denominará “Epoxy”. Se compararon ocho configuraciones de muestras diferentes, para diferentes energías de impacto. En la Tabla 3 se presenta una breve descripción de la composición de cada muestra y la secuencia de colocación seleccionada. Las secuencias fueron elegidas arbitrariamente con el propósito de caracterizar termoplásticos vs termoestable, enfocándose en comprender el comportamiento del material.

	Reinforcement	Matrix	Layup Sequence
Carbon/ELIUM	Carbon NCF (Chomarat Co., Ltd., Paris, Paris Region France)	ELIUM 1880 (Arkema Co., Ltd., Lacq, Pyrénées-Atlantiques, France)	[(0/90)/(+45/-45)] _{2S}
Carbon/Epoxy		EPR-L20 (Hexion Co., Ltd., Columbus, OH, USA)	
Glass/ELIUM	Glass NCF (HANKUK Carbon Co., Ltd., Miryang-si, Gyeongsangnam-do, South Korea)	ELIUM 1880 (Arkema Co., Ltd., Lacq, Pyrénées-Atlantiques, France)	[(0/90)/(+45/-45)/(0/90)/(+45/-45)] _S
Glass/Epoxy		EPR-L20 (Hexion Co., Ltd., Columbus, OH, USA)	
Hybrid 1/ELIUM	Carbon NCF (Chomarat Co., Ltd., Paris, Paris Region France)	ELIUM 1880 (Arkema Co., Ltd., Lacq, Pyrénées-Atlantiques, France)	[(+45/-45) _G /(0/90) _C] _{4T}
Hybrid 1/Epoxy	Interleaved with Glass NCF (HANKUK Carbon Co., Ltd., Miryang-si, Gyeongsangnam-do, South Korea)	EPR-L20 (Hexion Co., Ltd., Columbus, OH, USA)	
Hybrid 2/ELIUM		ELIUM 1880 (Arkema Co., Ltd., Lacq, Pyrénées-Atlantiques, France)	[(+45/-45) _C /(0/90) _G] _{4T}
Hybrid 2/Epoxy		EPR-L20 (Hexion Co., Ltd., Columbus, OH, USA)	

Tabla 3. Casos de análisis propuestos. Fuente [49]

Los experimentos se realizaron considerando tres alturas iniciales diferentes de 300, 400 y 500 mm correspondientes a tres niveles de energía diferentes, respectivamente 57, 83 y 97 J. Se seleccionó la resina termoplástica ELIUM 1880 (Arkema Co., Ltd., Colombes, Francia) para compararse con una referencia de epoxi termoestable estándar, EPR-L20 (Hexion Co., Ltd., Columbus, OH, EE. UU.). Tanto resinas Elium (termoplásticas) como epoxi (termoestables) se les aplicaron capas de fibra

carbono, fibra de vidrio e híbridas para producir las pruebas de impacto para la prueba. Los tejidos no ondulados o (NCF) seleccionados se muestran en la figura 19.

El proceso de producción de las muestras se ilustra en la Figura 20, donde primero, se desarrolla una prensa con cinta selladora en una placa de aluminio. A continuación, el tejido seco se dispone en la caja laminada. Se instalan dos tubos en espiral, para que sirva como fuente de ingreso de la resina y drenaje a su vez. A continuación, el paquete se cubre con la película de embolsado. El vacío es impuesto al sistema y mantenidas para asegurar la ausencia de fugas. Finalmente, la resina se inyectó mediante succión a presión negativa. En el caso de la resina termoplástica Elium, la proporción de mezcla aplicada es ELIUM 1880 100% en peso y agente de curado BPO (benzoilo peróxido) 1,5% en peso.

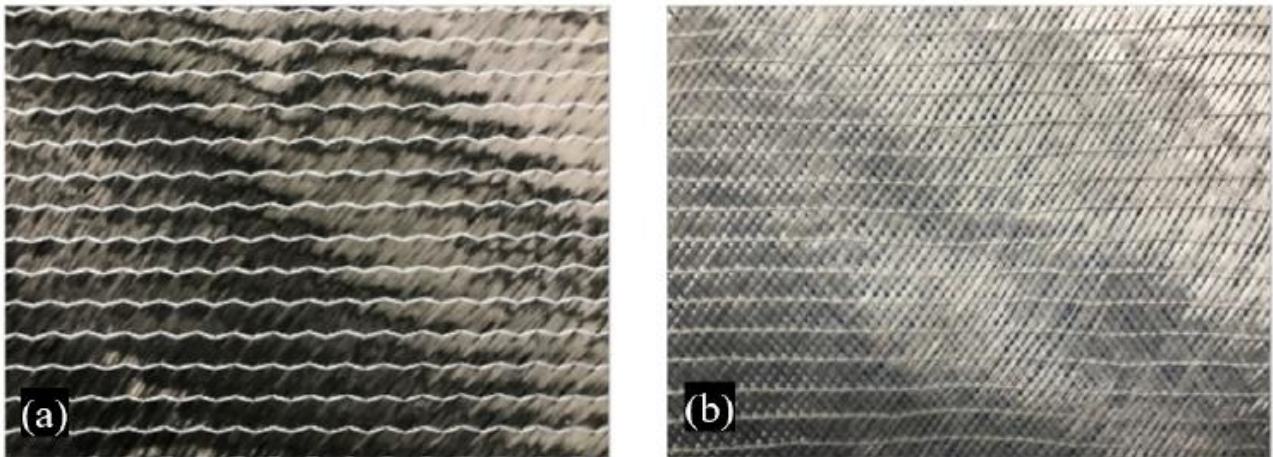


Figura 19. Tejidos BX45° NCF: a) carbono (Chomarat Co., Ltd., Le Cheylard, Francia) y b) vidrio (HANKUK Carbon Co.,Ltd., Seúl, Corea) fuente: [49] .

Para la resina epoxi EPR-L20, la relación de mezcla es L-20 100% en peso y agente de curado 33% en peso. Después de la inyección de resina, cada laminado se curó a temperatura ambiente durante 24 h. La resina epoxi EPR-L20 se post-curó a 60 °C durante 15 horas [49].

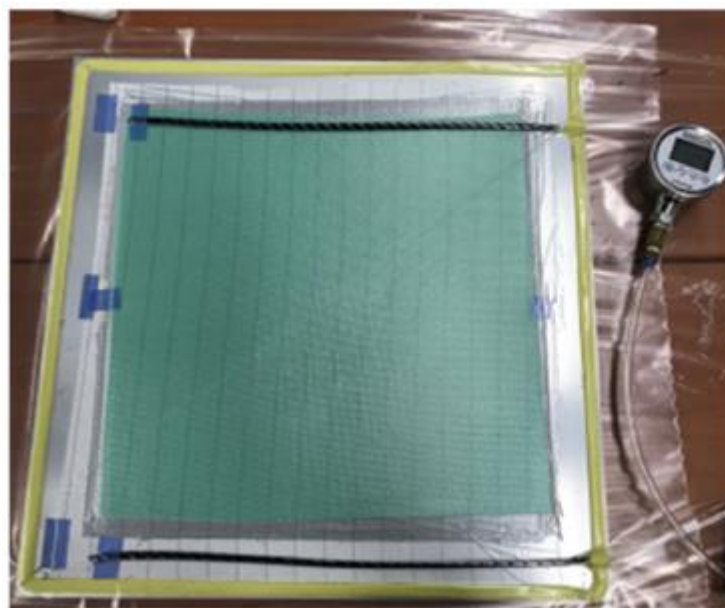


Figura 20. Proceso de fabricación de las muestras de impacto. Fuente: [49] .

Se desarrollaron simulaciones numéricas auxiliares para comprender mejor la física de prueba y los resultados. El elemento finito comercial que se seleccionó fue la solución explícita del software

ABAQUS (v.6.14) como simulación del modelo dinámico plataforma. Se desarrollaron ocho modelos diferentes de elementos finitos, considerando cada material en secuencias de colocación para las resinas Elium y Epoxy, como se presentó anteriormente, totalizando 30 configuraciones estudiadas experimentalmente. Los modelos fueron sometidos al mismo nivel de impacto de energía medidos en las pruebas. En la figura 21 se pueden visualizar en a) Las condiciones de contorno, b) malla de una sola capa, c) Restricciones de amarre entre capas y contacto de zona cohesiva en regiones de interfaz y d) malla impactadora de dos grados de libertad.

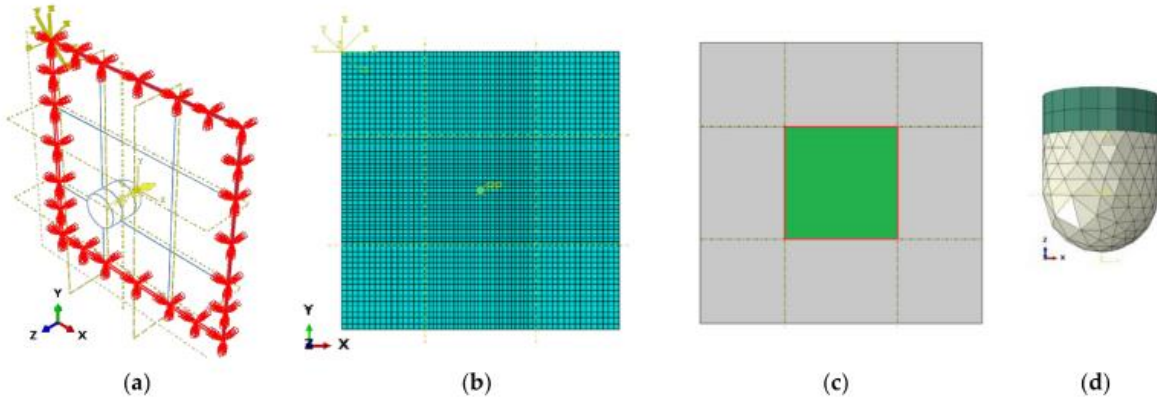


Figura 21. a) Condiciones de contorno, b) malla de una sola capa, c) Restricciones de amarre entre capas y contacto de zona cohesiva en regiones de interfaz y d) malla impactadora de dos grados de libertad. Fuente: [49].

Considerando tanto los resultados experimentales como los numéricos se presenta en la Figura 22, para cada caso estudiado, la mayor medición de fuerza de la celda de carga durante la prueba de impacto. Estos resultados se consideraron bastante adecuados para el elemento finito simplificado en modelos deterministas. Solo se realizó una prueba de impacto para cada configuración en cada nivel de energía.

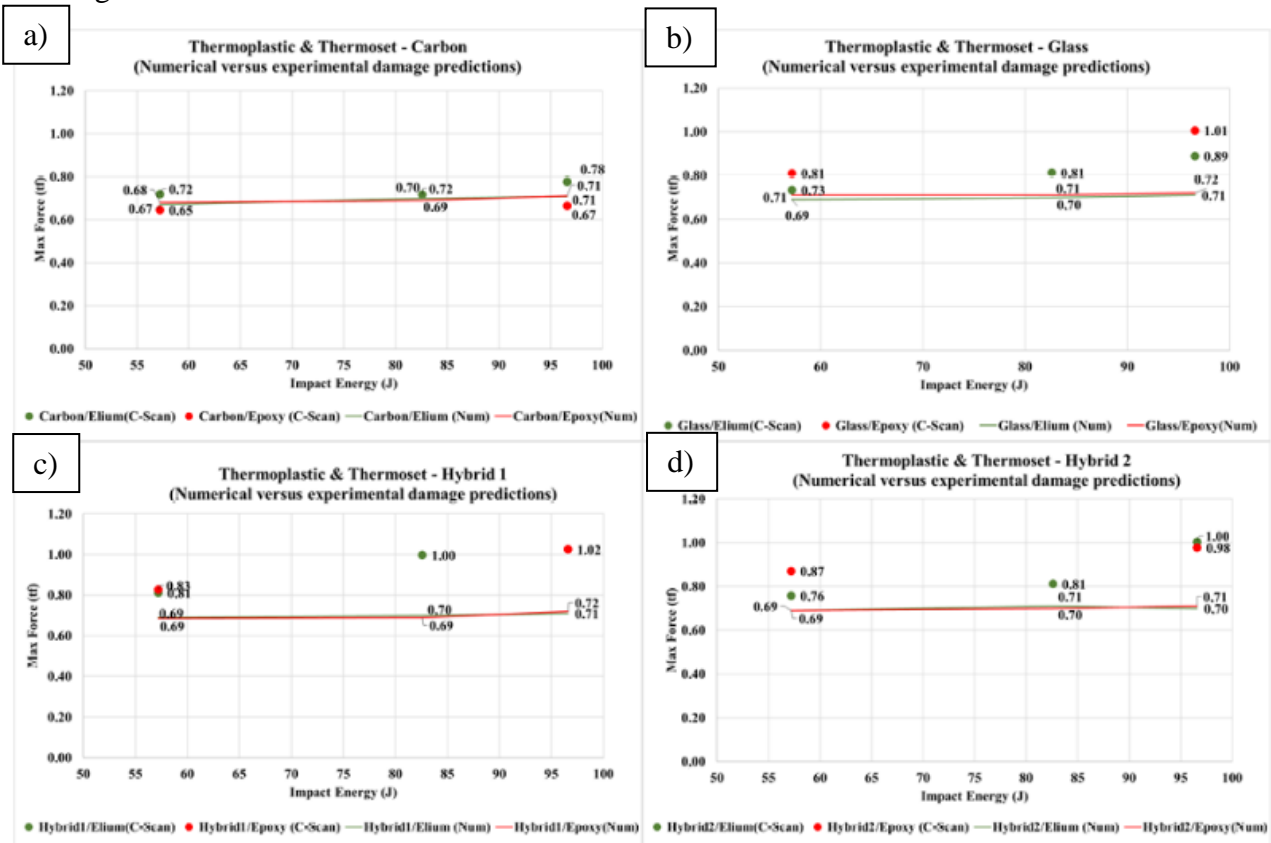


Figura 22. Mediciones de fuerza máxima numérica versus experimental en función de los niveles de energía de impacto para diferentes fibras y sistemas de resina.

De la figura 22 a, se puede analizar el compuesto Elium-carbono, el cual obtiene una medida de fuerza de 0.78 Toneladas Fuerza (tF) vs 0.72 del compuesto Epoxy-carbono a una energía de prueba 97 Jules. El resultado anterior muestra una buena cualidad de los termoplásticos al combinarse con fibras de carbono. Ahora estos mismos dos compuestos se evalúan pero con el vidrio, en la figura 22b, donde la configuración de Epoxy-vidrio obtiene el mejor resultado de fuerza con una medida de 1.01 tf vs el 0.89 de Elium-vidrio. Este resultado muestra que las resinas termoestables se configuran mejor con la fibra de vidrio lo cual va acorde con la realidad puesto que esta combinación es la más usada en la fabricación de álabes de aerogeneradores en la actualidad. Sin embargo como ya es sabido esta combinación tiene muchos problemas a la hora de reciclarse. De las figuras 22c y 22d se puede concluir que la combinación de ambas fibras (Vidrio y Carbón) para ambos polímeros (termoplásticos y termoestables), se obtienen fuerzas alrededor de 1 tf. Este valor es considerable y debería tenerse en cuenta para futuros estudios que utilicen una combinación de ambas fibras.

Los modelos numéricos se aplican comúnmente para ayudar y reducir los costos de las pruebas. Los modelos numéricos auxiliares aplicados en este trabajo, además de su sencillez, presentaron patrones si se comparan con los resultados experimentales, pero se debe tener precaución debido a que en algunos casos presentaron resultados no conservadores al comparar con los datos experimentales.

Aunque los compuestos de fibra de carbono son más ligeros y resistentes, las palas de los aerogeneradores se construyen comúnmente de compuestos de fibra de vidrio. Compuestos híbridos de fibra de carbono/vidrio se convierte entonces en una alternativa factible para equilibrar el costo-rendimiento de las palas de turbinas eólicas más grandes. La aplicación de la resina termoplástica Elium, puede verse como una opción prometedora con la posibilidad de mejorar el diseño de materiales compuestos avanzados. La resina Elium demuestra ser competitiva para reemplazar las opciones termoestables tradicionales, con ventajas relacionadas con una mejor capacidad de reutilización, facilidad de fabricación y buenas propiedades de tolerancia al impacto y al daño las cuales son premisas del proyecto principal aquí estudiado y sirve como base a esta investigación para reforzar la idea del uso de fibras de carbono en materiales termoplásticos, para mejorar propiedades que permitan obtener mejores eficiencias en las turbinas eólicas.

Por último, al analizar el artículo de revisión denominado “Materiales, Innovaciones e Investigaciones Futuras, oportunidades en palas de turbinas eólicas”, el enfoque para materiales innovadores en general, se basa en que el material del alabe debe poseer baja densidad y alta rigidez simultáneamente, para tener un mejor rendimiento y manipulación. Por ejemplo, un polímero reforzado con fibra de carbono, fibra de vidrio o fibras naturales son utilizados como material del alabe [50].

La figura 23 muestra las diversas partes de la turbina eólica. El alabe del rotor puede tener estructuras de soporte interno permitiendo la fabricación de álabes más ligeros con una reducción de peso significativa. Los compuestos tipo sándwich con un número optimizado de capas junto con una secuenciación personalizada de refuerzos de fibra, permiten obtener rigidez a la flexión y absorber cargas gravitatorias, esta es la función de las fibras las cuales están dispuestas en dirección axial del alabe en las tapas del mástil. Las fibras del mástil están orientadas a 45 para resistir cargas de corte y torsión.

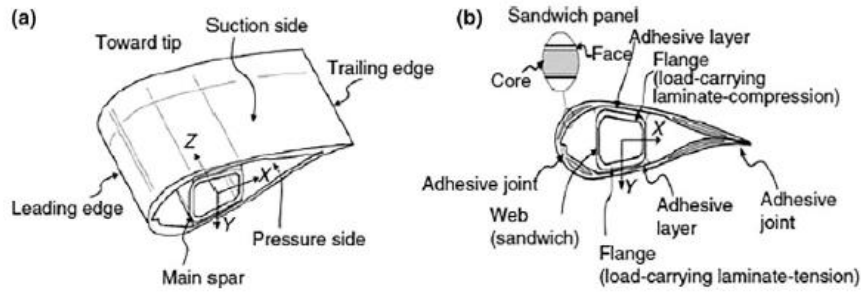


Figura 23. Componentes de un alabe típico de aerogenerador fuente: [51].

De otra parte los compuestos de fibra de vidrio y carbono se están implementando en los álabes de los aerogeneradores modernos de manera híbrida en sus estructuras, utilizando un material de matriz polimérica (PMC). El compuesto reforzado con fibra de vidrio es el compuesto mayormente utilizado debido al peso reducido, mientras que los compuestos reforzados con fibra de carbono se utilizan en la fabricación a gran escala. Además, se observó que la orientación de las fibras de carbono tiene un gran efecto de resistencia al pandeo de un aerogenerador [52]. Aunque el sistema híbrido en las estructuras de los materiales suele ser costosas, tienen la ventaja de reducir la cantidad de fibra de carbono, mediante el uso un sistema de refuerzos híbridos (E-vidrio/carbono, E-vidrio/aramida, Carbono/aramida, etc.). Se obtiene una mayor fuerza y ciclo de vida mejorado para los álabes, además de ser amigable con el medio ambiente al utilizar fibras naturales [53].

Investigadores de la Universidad Noruega encontraron que las fibras de carbono/vidrio analizadas en álabes de aerogeneradores híbridos con orientación variable de la fibra para comprender el efecto y la tendencia de variación en sus propiedades mecánicas como se indica en la Tabla 4.

Material	E(11) (GPa)	E(22) (GPa)	$\nu(12)$	ρ (kg/m ³)	G(12) (GPa)	G(13) (GPa)	G23 (GPa)
0° Glass	41.0	9.0	0.30	1890	4.10	4.10	3.30
0° Carbon	139.0	9.0	0.32	1560	5.50	5.50	4.40
Core	0.25	0.25	0.35	200	0.073	0.073	0.073
Lining	9.65	9.65	0.30	1670	3.86	3.86	3.86
Gel coat	3.44	3.44	0.30	1230	1.38	1.38	1.38

Tabla 4. Propiedades de los materiales como fibra de carbono, fibra de vidrio, Fuente [51].

En compuestos poliméricos, la distorsión estructural ocurre principalmente por falla por fatiga. Para hacer materiales compuestos, que tienen una alta fractura, la tenacidad ha sido crucial para la fabricación de pala de aerogenerador [51].

El estudio anterior muestra mejoras en las propiedades mecánicas de materiales compuestos con fibra de carbono, lo que es un soporte muy importante para este proyecto al ir de la mano con otras investigaciones realizadas a nivel mundial, sobre nuevos materiales utilizables para la elaboración de nuevos álabes con materiales innovadores para en las turbinas eólicas.

Capítulo 4: Metodología de la investigación

Dentro de la solución del problema de investigación, se plantea un método cuantitativo, para evaluar 4 materiales (PLA, PLA+F.C., PETG, PETG+F.C.) termoplásticos de fácil reciclaje y reutilización, para la fabricación de álabes de una turbina eólica vertical H-Darrieus. Los materiales serán expuestos a pruebas mecánicas, térmicas y de exposición U.V., para realizar dichas pruebas es necesario seguir los lineamientos establecidos en las normas internacionales.

Parametrización de impresora 3D

Para la fabricación de las probetas de ensayos, se utiliza el método de fabricación aditiva de material, utilizando como base una impresora 3D Pegasus makeR PEGASUS lite, como se visualiza en la figura 24.

Pegasus es una impresora robusta, lo que traduce en una mayor precisión en la fabricación de piezas otorgándoles un buen acabado. Sin embargo, no solo basta con tener una buena impresora para obtener piezas de buena calidad, es por esto que los parámetros de impresión son variables a tener en cuenta para obtener las piezas al mayor detalle posible. Estas variables se deberán ajustar de acuerdo al material a utilizar. La temperatura de impresión es una variable que cambia bastante, el punto de fusión varía significativamente entre materiales.



Figura 24. Impresora 3D makeR PEGASUS Lite, Fuente: Autor.

La temperatura de la cama permite que el choque térmico con las primeras capas no sea tan fuerte, además de garantizar la adhesión del material a la placa para que la estructura tenga un buen soporte. Otras variables como la velocidad permitirán que el material fundido se pueda adherir de mejor manera a las otras capas otorgando un mejor acabado en la superficie; Una velocidad alta podría provocar que se produzcan espacios dentro de la estructura lo que podría dar paso a fallas por agrietamiento en un futuro [54]. El relleno es otra variable a tener en cuenta. la mayoría de piezas en 3D se construyen optimizando material, por lo que se pueden fabricar piezas con rellenos entre el 20-70 %. Por efecto de las pruebas se deberá tener un relleno del 100%. Los parámetros principales se muestran en la tabla 5.

PARAMETROS DE IMPRESIÓN 3D	
Altura de capa	0.1 Mm
Altura de capa inicial	0.2 Mm
Ancho de línea	0.4 Mm
Grosor de pared	1.2 Mm
Grosor superior/inferior	0.8 Mm
Capas superiores/inferiores	4 Un
Patrón superior/inferior	Líneas
Relleno	100 %
Distancia línea de relleno	0.4 Mm
Patrón de relleno	Rejilla
Velocidad de impresión	50 mm/s
Velocidad de relleno	35 mm/s
Velocidad capa inicial	25 mm/s
Velocidad de desplazamiento	100 mm/s
Velocidad del salto en Z	10 mm/s
Distancia de retracción	6.5 Mm
Velocidad de retracción	35 mm/s
Velocidad del ventilador	100 %
Tipo de adherencia a la placa	Borde
Recuento de líneas de borde	4 Un
Secuencia de impresión	1 a 1
Dimensiones impresión	(300x300x300) mm
Origen impresión	(0, 0, 0)

Tabla 5. Parámetros de impresión 3D, en impresora makeR PEGASUS Lite, Fuente: Autor.

La temperatura de impresión es una de las variables importantes a analizar, esta puede aportar a mejorar condiciones de apariencia del material, pero también a mejorar su estructura molecular, lo que puede significar un mayor rendimiento. Es por esto que para validar en qué condiciones de temperatura los materiales tienen su mejor eficiencia, se fabricaron las muestras a 3 temperaturas dispuestas, así:

Para los materiales PLA y PLA+FC se fabricaron muestras a 190°C , 210°C y 230°C .

Para los materiales PETG y PETG+FC se fabricaron muestras a 230°C , 240°C y 250°C

Esta diferencia de temperaturas en la fabricación de las pruebas se debe a que el punto de fusión del PLA es de 180°C , mientras que el del PETG 220°C . Así que se decide optar por esas temperaturas de impresión para hacer más óptimo el rendimiento de los materiales a probar. Para calcular el número de piezas a fabricar debemos tener en cuenta lo siguiente: Se van a probar 4 materiales a 3 temperaturas, esto significa un total de 12 piezas por los 4 materiales. Estos materiales serán expuestos a 6 pruebas, por lo que en total necesitaría 72 piezas previamente. Para garantizar resultados más confiables y disminuir el error a lo mínimo, se realizaron 3 réplicas por los 4 materiales.

- 4 materiales a probar
- 3 temperaturas de impresión para las muestras
- 6 pruebas mecánicas, térmicas y exposición U.V.
- 3 réplicas para disminuir el error.

En total serian 216 piezas a fabricar, para realizar las pruebas con las réplicas necesarias, garantizando datos confiables. A continuación, se describen las técnicas y equipos necesarios para la realización de las pruebas, basadas en las normas internacionales según la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM).

Para la elaboración de las piezas a probar se realizó una configuración, la cual pudiera mitigar los errores sistemáticos, mediante la fabricación de manera aleatoria de las diferentes replicas. A continuación se presenta la configuración predeterminada llevada a cabo, en cada una de las probetas de las diferentes pruebas realizadas.

ORDEN FABRICACIÓN	REPLICA	MATERIAL	TEMPERATURA
4	1	PLA+FIBRA CARBONO	210
12	1	PLA+FIBRA CARBONO	230
17	3	PLA+FIBRA CARBONO	190
22	3	PLA+FIBRA CARBONO	230
28	2	PLA+FIBRA CARBONO	190
31	2	PLA+FIBRA CARBONO	210
32	1	PLA+FIBRA CARBONO	190
33	3	PLA+FIBRA CARBONO	210
34	2	PLA+FIBRA CARBONO	230
2	1	PLA	230
7	2	PLA	210
11	3	PLA	210
14	2	PLA	230
15	3	PLA	230
16	1	PLA	210
19	2	PLA	190
27	3	PLA	190
36	1	PLA	190
6	2	PETG+FIBRA CARBONO	240
8	2	PETG+FIBRA CARBONO	250
10	3	PETG+FIBRA CARBONO	230
13	1	PETG+FIBRA CARBONO	250
18	1	PETG+FIBRA CARBONO	240
23	2	PETG+FIBRA CARBONO	230
24	3	PETG+FIBRA CARBONO	240
25	3	PETG+FIBRA CARBONO	250
29	1	PETG+FIBRA CARBONO	230
1	1	PETG	240
3	2	PETG	230
5	3	PETG	230
9	3	PETG	250
20	2	PETG	240
21	2	PETG	250
26	1	PETG	230
30	3	PETG	240
35	1	PETG	250

Tabla 6. Configuración Aleatoria de orden de fabricación de las 216 probetas para los 6 ensayos, Fuente: Autor

Fabricación de probetas de ensayo

Probetas de tensión: Este método de prueba determinó la propiedad de la tensión para plásticos no reforzados y reforzados, basados en la norma ASTM D638 – 14, determina que las medidas de las muestras a utilizar, estas se deben acoplar a los parámetros dados a los plásticos semirrígidos y compuesto reforzados, los cuales para muestras con un espesor de hasta 7 mm (0,28 pulg.) se ajustan a la clasificación Tipo I como se muestra en la figura 25 [55].

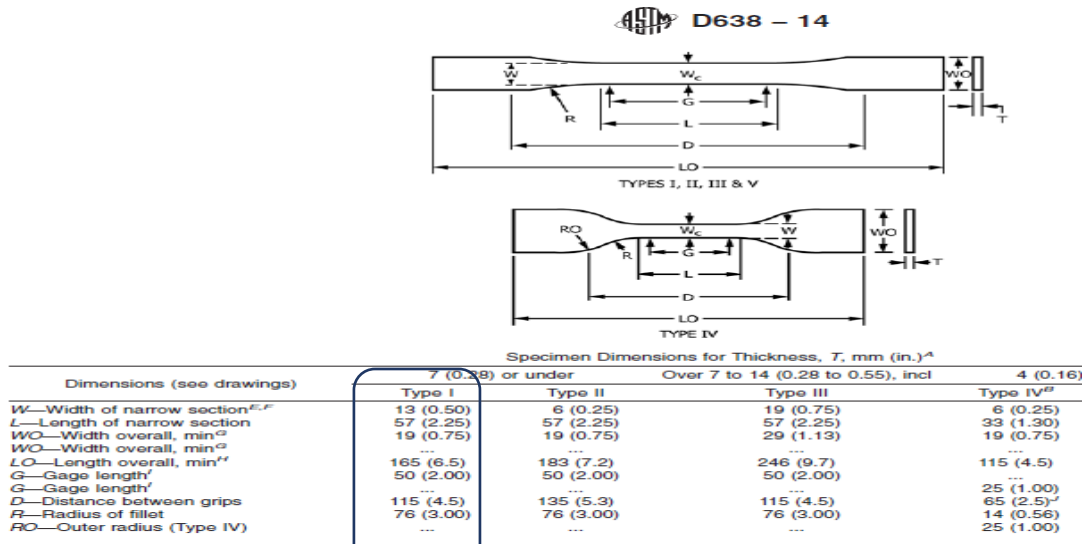


Figura 25. Medidas de muestras según clasificación ASTM D638 – 14 [55]

De acuerdo a los datos de la probeta tipo I, se procede a realizar el diseño de la muestra indicada, en un software de diseño CAD tal como se evidencia en la figura 26a, una vez obtenido el modelo se podrá exportar en un formato STL, el cual podrá ser interpretado por una impresión 3D, esto lo podemos visualizar en la figura 26b. Las probetas obtenidas se visualizan en la figura 26c.

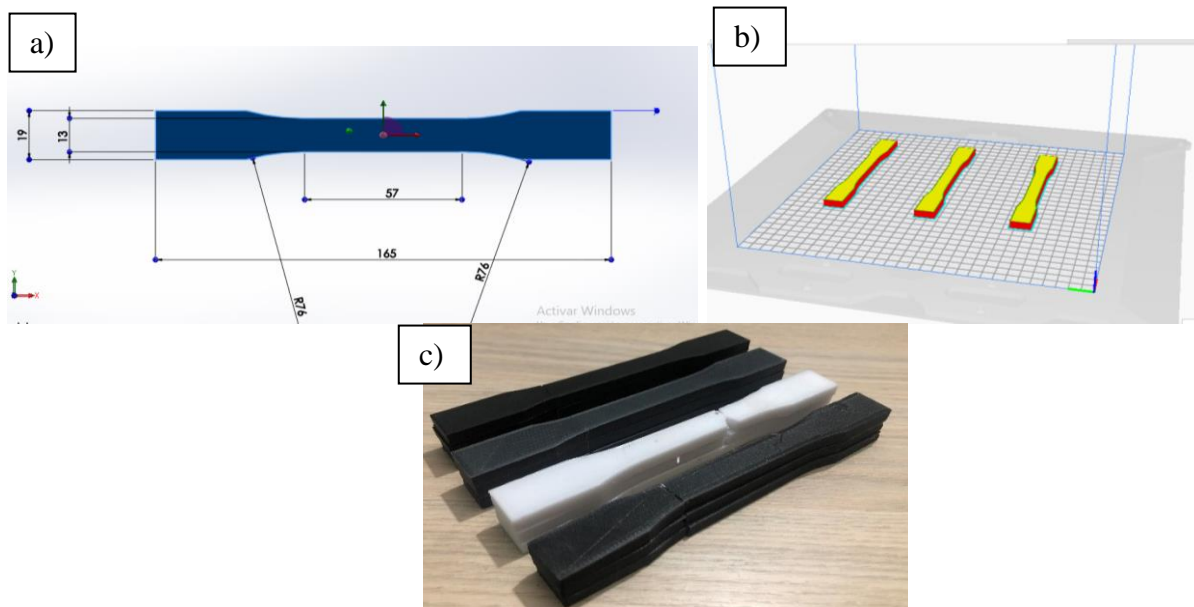


Figura 26. a) Diseño CAD probeta para ensayo de tensión. b) Diseño en programa Cura, formato STL, c) probetas tensión impresas en 3D PLA, PLA+F.C., PETF y PETG+F.C. fuente: Autor.

Es importante analizar el comportamiento a tensión sobre un material, es una fuerza que se ve reflejada en los álabes de los aerogeneradores, los cuales están expuestos a fuerzas Aerodinámicas,

gravitacionales e inerciales. Al descomponer las fuerzas aerodinámicas, se obtiene una fuerza de sustentación y otra fuerza de arrastre. La fuerza de arrastre va en dirección axial al alabe produciendo una fuerza tensional sobre el elemento. Es por esto que es importante analizar el comportamiento de los materiales al esfuerzo de tensión [56].

Probetas de flexión: Esta prueba se realizó bajo la norma ASTM D790-17 (D790-17), la cual define la medida de las de las muestras bajo la clasificación de materiales de moldeo (termoplásticos y termoestables) donde se establecen las dimensiones de 12.7 mm (0.5 pulg.) de ancho, 3.2 mm (0.125 pulg.) de espesor y 127 mm (5.0 pulg.) de largo, De esta manera se procede al diseño de la probeta en un software de diseño CAD como se observa en la figura 27a, por último generamos el archivo STL, para ser leído por el programa de impresión 3D como se ve en la figura 27b. Las probetas obtenidas se visualizan en la figura 27c. [57].

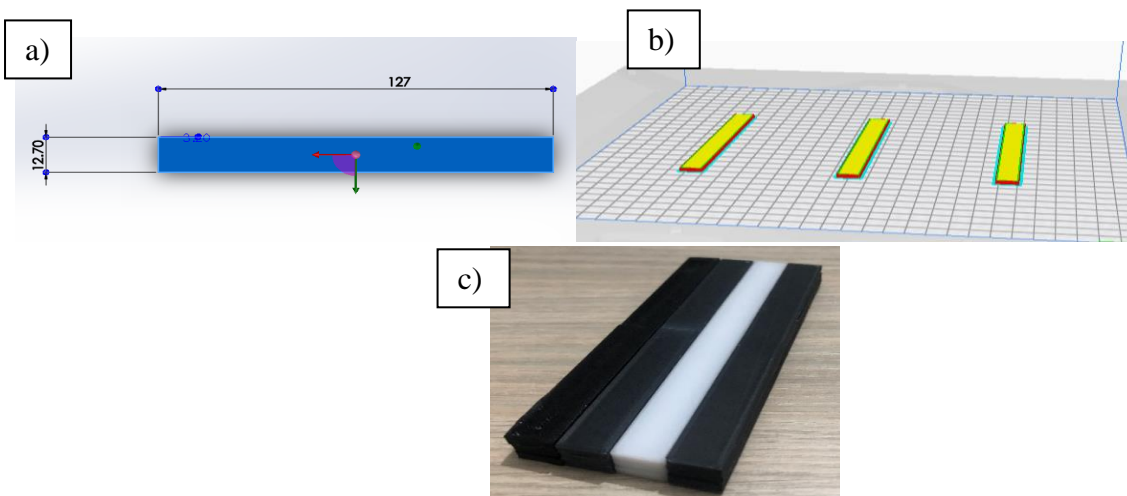
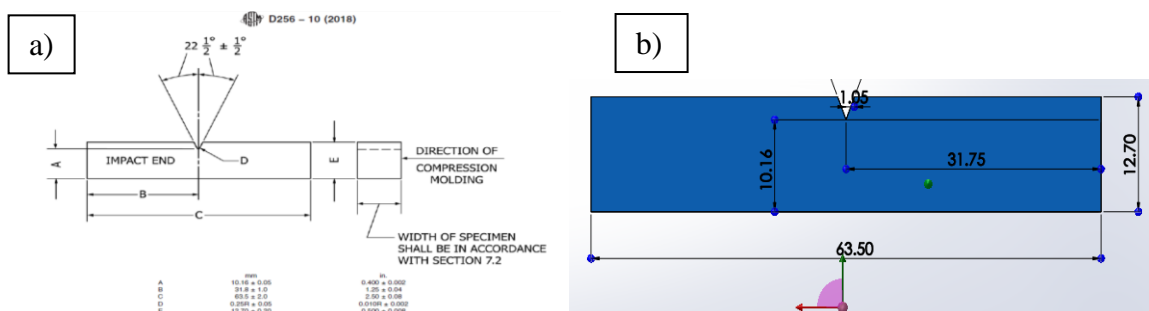


Figura 27. a) Diseño CAD, b) Diseño formato STL en programa Cura, c) Probetas de flexión obtenidas en impresión 3D PLA, PLA+F.C., PETF y PETG+F.C. fuente: Autor.

Al igual que en el caso anterior, en este caso la fuerza que actúa es la fuerza de sustentación. Esta imparte una acción flexionante al distribuirse transversalmente sobre algunos puntos del alabe e intentar curvarlo. Medir la cantidad de resistencia a la flexión es valor importante a la hora de seleccionar un material para álabes de una turbina eólica [56].

Probetas de resistencia al impacto: Esta prueba se basó en la norma D256 – 10, la cual establece las medidas de las muestras para ensayo de impacto son tomadas del texto y mostradas en la figura 28a, donde el ancho sería 10.16 mm, el largo de 63.50 mm con un espesor de 12.7 mm, en la figura 28b se puede ver el diseño de la probeta en el software CAD y por último se visualiza en la figura 28c las piezas listas para ser impresas en la impresora 3D exportadas en formato STL. Las probetas obtenidas se visualizan en la figura 28d



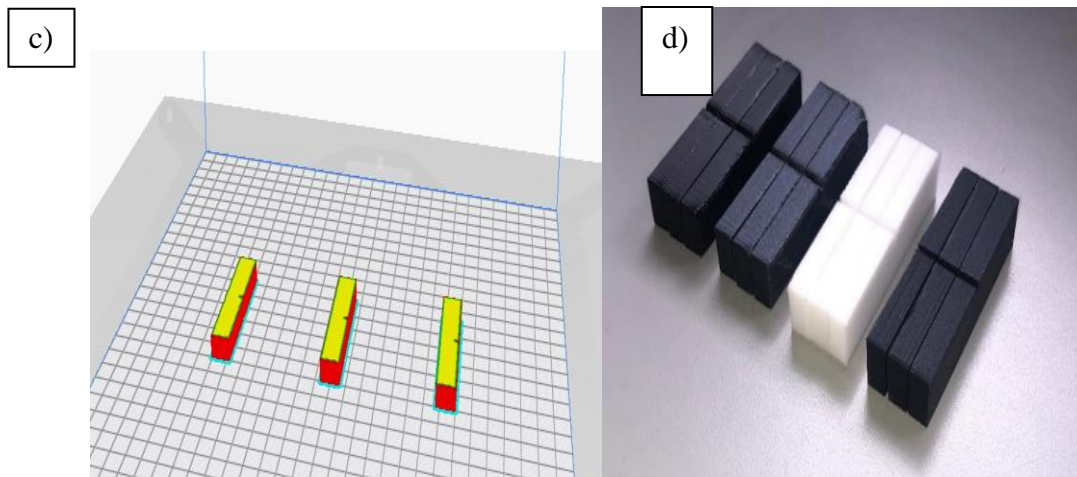


Figura 28. a) Medidas para muestras de ensayo de impacto Izod, según norma D256 – 10, b) Diseño CAD muestras de impacto. c) Muestras en software Cura, para impresión en 3D, d) Muestras de impacto fabricadas bajo modelo de impresión 3D PLA, PLA+F.C., PETF y PETG+F.C. Fuente: Autor.

El impacto es una propiedad mecánica, donde se mide la cantidad de energía que un material puede absorber antes de romperse. Al considerar que los álabes de las turbinas estarán expuestas a la intemperie, existen factores externos con los que fácilmente el alabe podría impactar como lo son las aves. Siendo estas una de la mayor causa de muerte de los animales al ser golpeados cada vez que pasan cerca de uno de ellos, si bien la condición de muerte es un factor a considerar, los materiales deberán soportar estos impactos antes de romperse para no ver afectado su rendimiento [58].

Probetas de resistencia a la dureza

Esta prueba está sujeta a la norma ASTM D785 – 08 la cual define las siguientes medidas (20x20x7) mm, esto lo podemos visualizar en la figura 29a, en la figura 29b se puede observar las piezas listas para ser impresas en 3D. Las probetas obtenidas se visualizan en la figura 29c

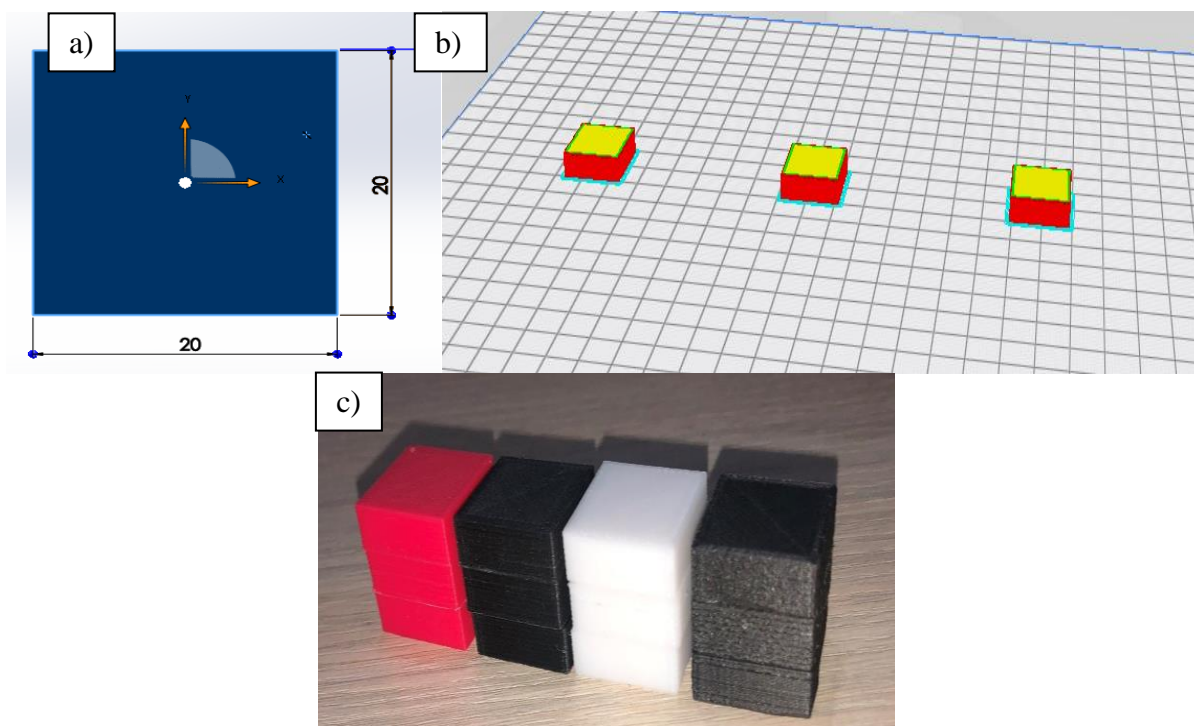


Figura 29. a) Probeta de dureza en modelo CAD, b) Muestras en software Cura, para ser impresas en 3D, c) Muestras de dureza impresas en 3D PLA, PLA+F.C., PETF y PETG+F.C. Fuente: Autor.

La dureza es una propiedad importante a estudiar, permite determinar la resistencia superficial a la deformación, además se puede relacionar con la resistencia al desgaste, condición importante para soportar condiciones ambientales fuertes. Además, se puede analizar la dificultad de mecanizado, y la influencia de tratamientos térmicos o mecánicos los cuales se pueden aplicar a los álabes después de realizado su proceso inicial de fabricación [56]

Probetas de envejecimiento térmico y prueba U.V.

La prueba de exposición térmica fue determinada por la norma ASTM D3045 – 18, la exposición ultravioleta está determinada por la norma ASTM D4329 – 13 la cual determina la práctica estándar para la exposición de plásticos con lámpara fluorescente ultravioleta (UV) [59]. Las dimensiones de las probetas de estas dos pruebas, fueron iguales a las dimensiones de las probetas utilizadas en las pruebas de dureza, esto con el fin de medir esta misma propiedad una vez hayan sido afectadas por la exposición térmica y la exposición U.V. En la figura 30a se visualiza las probetas para ser ingresadas al horno y expuestas a temperaturas. En la figura 30b se visualiza las probetas apiladas, listas para ser expuestas a la radiación U.V.



Figura 30. a) Muestras listas para entrar al horno para la exposición térmica durante 8 horas en el orden PLA, PLA+F.C., PETF y PETG+F.C.. b) Muestras organizadas en la base giratoria para prueba de exposición U.V. Fuente: Autor

Al considerar que los álabes de los aerogeneradores tendrán una vida útil de 20 a 30 años, es indispensable entender que estarán en constante exposición a cambios de temperatura y radiación ultravioleta producto de la radiación solar. Entender cómo se comportan los materiales expuestos en estas condiciones, permitirá seleccionar un material que mantenga sus propiedades y su composición conforme pase el tiempo [60].

Caracterización de materiales

Para la caracterización de los materiales se realizaron pruebas en los laboratorios de la Universidad de Antioquia. Los ensayos de tensión y flexión se realizaron en el laboratorio de resistencia de materiales, la prueba de impacto se realizó en el laboratorio de materiales con una máquina de impacto para polímeros, la cual maneja una escala menor en comparación con las usadas para metales. La prueba de dureza se realiza utilizando el durómetro y penetrando directamente sobre el material. Por último las pruebas térmicas y U.V. se realizaron en laboratorio de materiales donde reposa un horno con temperatura graduable, la cual permitió exponer las piezas a una temperatura constante durante un periodo de tiempo determinado y para la prueba U.V. el laboratorio cuenta con un dispositivo de generación de radiación U.V. en un entorno totalmente cerrado y seguro.

Debido a que los 4 materiales estarán expuestos a las mismas condiciones, en cada prueba realizada se realizara una calificación según su rendimiento y se clasificarán como lo indicado en la tabla 7.

Clasificación	Valor
Primer Lugar	5
Segundo Lugar	4
Tercer Lugar	3
Cuarto Lugar	2

Tabla 7. Clasificación de materiales según rendimiento, Fuente: Autor

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por cada tipo de ensayos. Al final de los resultados se encuentra la tabla resumen, con toda la sumatoria de los rendimientos y servirá como base para tomar la decisión del material seleccionado para la fabricación de los álabes del aerogenerador.

Prueba de Tensión

Este método de prueba determinó la propiedad de la tensión para plásticos no reforzados y reforzados, basados en la norma ASTM D638 – 14, el método de prueba funciona para materiales con hasta 14 mm de espesor. Las propiedades de tensión proporcionan datos útiles para la ingeniería de plásticos con propósitos de diseño en consecuencia, para obtener resultados comparativos y precisos, se deben contralar al máximo factores de velocidad y ambiente de la prueba.

La máquina de prueba es del tipo de cruceta y se compone esencialmente de un miembro fijo que lleva una empuñadura; un miembro móvil que lleva un segundo agarre; las mordazas para sujetar la muestra de ensayo entre el miembro fijo y el miembro móvil; un impulsor el cual es el mecanismo para impartir una velocidad uniforme y controlada al elemento móvil y un indicador de carga adecuado para mostrar la carga de tensión total soportada por la probeta de ensayo.

En la figura 31a, se ve la velocidad de referencia para la prueba de tracción en polímeros, usando la velocidad de 5 mm/min. En la figura 31b están las probetas luego de ser expuestas ala la prueba en este caso destructiva.

a)	Classification ^a	Specimen Type	Speed of Testing, mm/min (in./min)	Nominal Strain ^b Rate at Start of Test, mm/mm-min (in./in.-min)
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes		5 (0.2) ± 25 %	0.1
			50 (2) ± 10 %	1
	IV		500 (20) ± 10 %	10
			5 (0.2) ± 25 %	0.15
	V		50 (2) ± 10 %	1.5
			500 (20) ± 10 %	15
Nonrigid	III		1 (0.05) ± 25 %	0.1
			10 (0.5) ± 25 %	1
	IV		100 (5) ± 25 %	10
			50 (2) ± 10 %	1
			500 (20) ± 10 %	10
			50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15	



Figura 31. a) velocidades según el tipo de probeta. b) Muestras de tensión fabricadas bajo modelo de impresión 3D PLA, PLA+F.C., PETG y PETG+F.C., según norma ASTM D638 –14. Fuente: Autor

Durante la realización de las 36 pruebas en la máquina de ensayos para tensión (12 muestras por temperatura de impresión), se obtuvieron datos significativos de los 4 materiales, como se evidencia en la tabla 8, donde se visualizan las resistencias promedio de los 4 materiales a 3 diferentes temperaturas y las desviaciones estándar correspondientes.

En esta tabla se observa que el material con mejor resistencia a la tensión es el PETG+F.C. el cual presenta una resistencia a la tensión promedio de 52 MPa, en segundo lugar estaría el material PLA+F.C. el cual presenta una resistencia promedio de 49.3 MPa, en tercer lugar se ve que el material PLA obtiene una resistencia promedio de 48.6 MPa y por último y en cuarto lugar está el PETG el cual presenta una resistencia promedio de 42 MPa.

Material	Temperatura (°C)	Resistencia promedio a la tensión (MPa)	Desviación estándar	Módulo de elasticidad (MPa)
PLA	190	50.48	2.17	969.15
	210	51.25	3.68	
	230	45.49	2.17	
PLA + FC	190	52.15	0.59	1004.48
	210	47.76	2.71	
	230	48.02	1.22	
PETG	230	36.80	4.01	693.09
	240	41.13	6.43	
	250	49.14	3.78	
PETG + FC	230	51.01	0.53	810.54
	240	52.04	0.38	
	250	52.93	0.36	

Tabla 8. Resistencia a la tensión promedio para los 4 materiales. Fuente autor

De la tabla 8 se obtuvo la figura 32, Esfuerzo-Temperatura para los 4 materiales, se incluyen los valores de desviación estándar para cada uno.

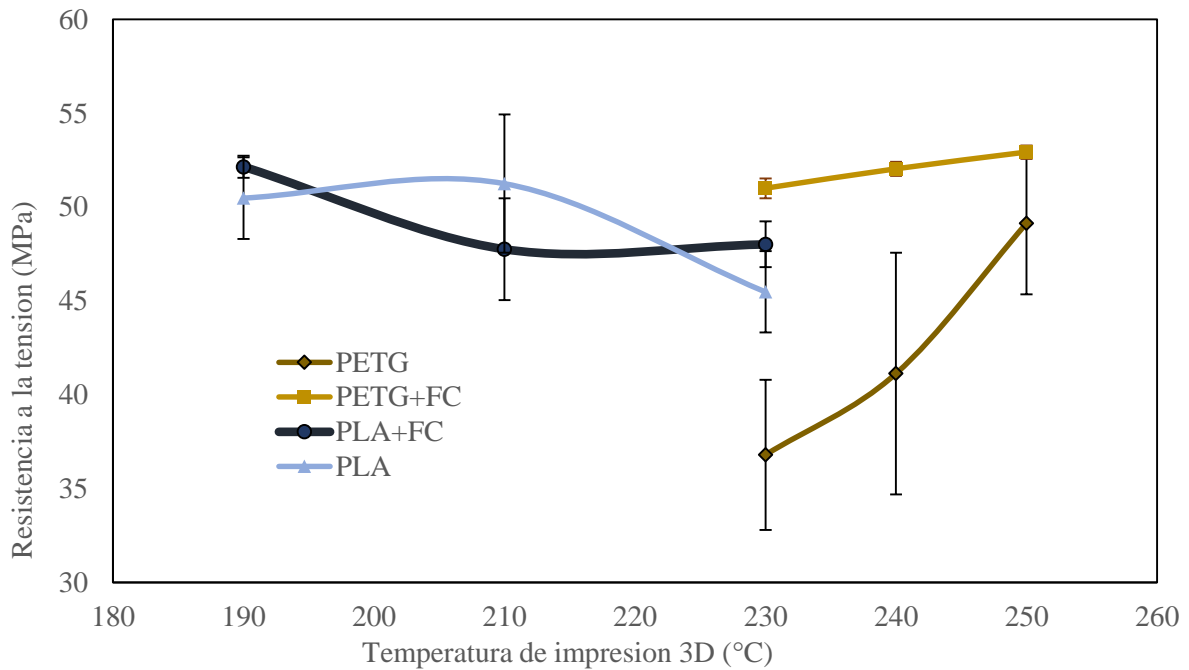


Figura 32. Resistencia a la tensión en cuatro (4) materiales fabricados en impresión 3D a diferentes temperaturas, Fuente: Autor.

La figura 33, muestra la gráfica de esfuerzo-deformación solamente para los mejores resultados en cuanto a resistencias en promedio para los 4 materiales. En el eje de las ordenadas, se encuentra el valor de resistencia la tensión y en el eje de las abscisas se evidencia la deformación unitaria.

Las medidas de resistencia máxima al esfuerzo de tensión están en un rango entre 49 y 52 MPa, sin embargo, se marca una gran diferencia entre los materiales PET y PETG+F.C., los cuales presentan una gran ductilidad, en comparación con el PLA y PLA+F.C., esta propiedad de deformación puede ser muy útil cuando se busca un material que pueda resistir cargas constantes sin fracturarse rápidamente.

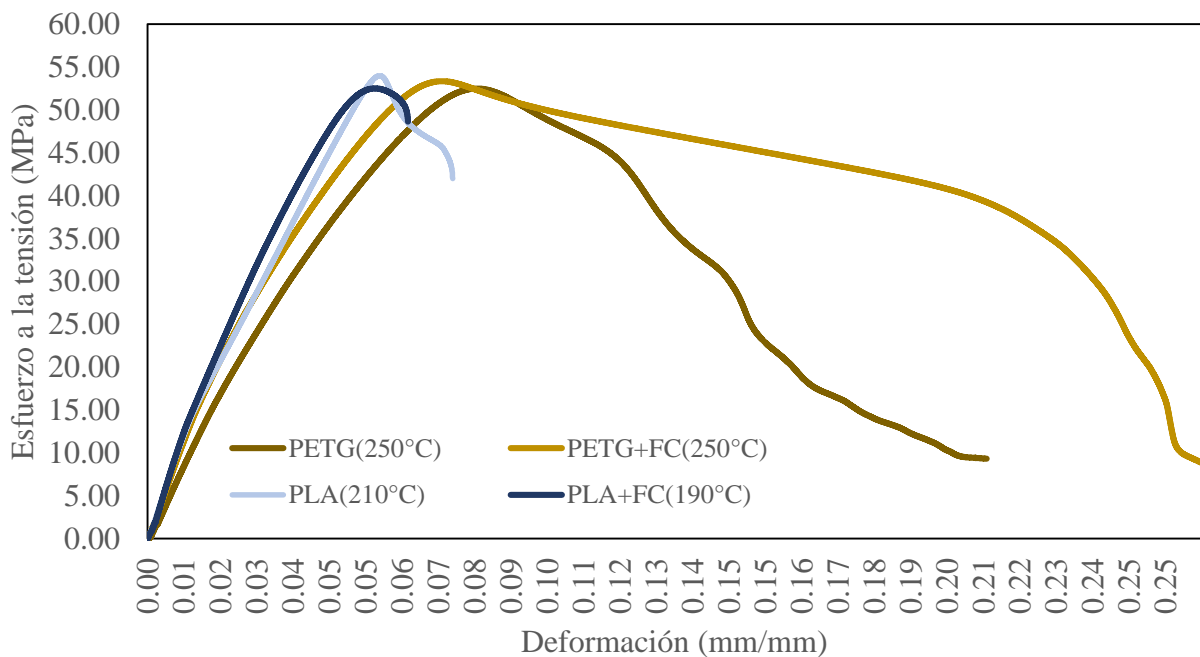


Figura 33. Esfuerzo (Megapascuales) vs deformación unitaria (mm/mm) para los 4 materiales probados en la máquina de ensayos de tensión, con la mejor resistencia promedio de cada uno, Fuente: Autor.

De los valores obtenidos en la prueba de tracción también podemos analizar el valor de la ductilidad. Esta propiedad es la capacidad de un material en absorber energía elástica cuando está siendo deformado y es capaz de liberarla cuando la carga deja de actuar. En la figura 34a, se muestra la ductilidad promedio para los 4 materiales el cual oscila entre 14-6%, se evidencia una desviación estándar alta para los materiales PETG y PETG+F.C.. Sin embargo, estos mismos materiales presentan un mayor porcentaje de ductilidad en comparación con los otros. En la figura 34b se obtiene el valor de la resiliencia, el cual es un valor fijo obtenido para la prueba que obtuvo una mayor resistencia. Los materiales PETG y PETG+F.C., presentan una mayor resiliencia, respecto al PLA y PLA+F.C.

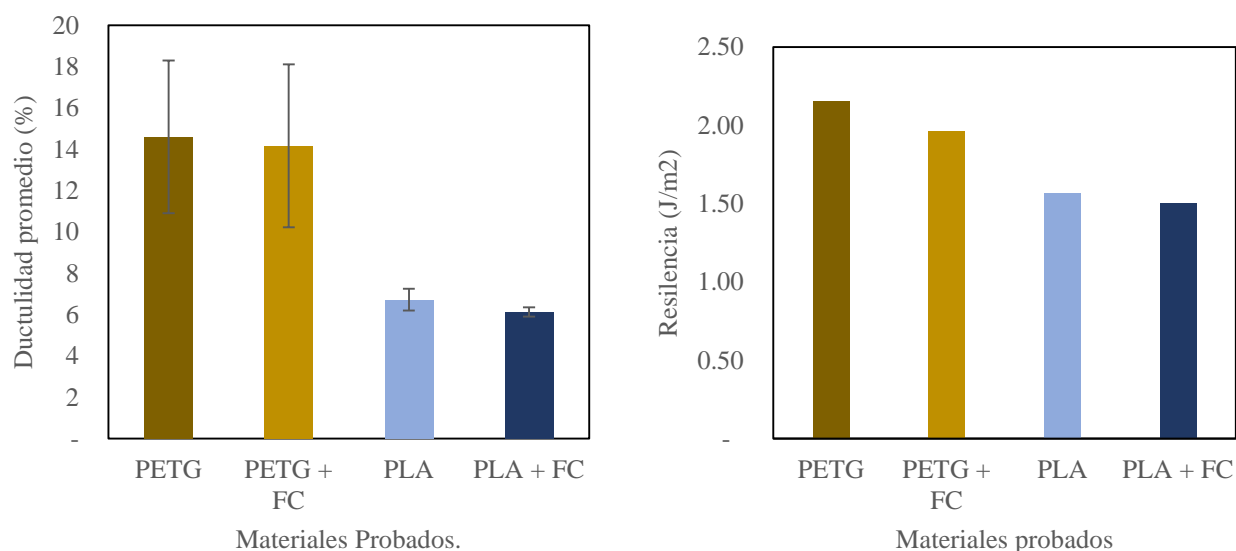


Figura 34. a) grafica del porcentaje de ductilidad para los 4 materiales probados, b) Grafica de resiliencia (Jules/metrocuadrado) Fuente: Autor.

De acuerdo a la medición de resistencias a la tracción, la deformación y ductilidad obtenida por cada material se otorga la siguiente evaluación a los 4 materiales expuestos:

Material	Tensión
PLA	3
PLA+F.C.	4
PETG	2
PETG+F.C.	5

Tabla 9. Calificación de materiales para prueba de tensión, Fuente: Autor

Imágenes SEM

Se visualiza en imágenes los 4 materiales (PLA, PLA+F.C., PETG y PETG+F.C.), con un microscopio a una resolución de (640x480 mm), como se observa en la figura 35. Las imágenes están clasificadas por filas empezando por PLA en la primera fila, donde se observa las probetas facturadas después del ensaño de tensión las cuales fueron fabricadas a 190°C, 210°C y 230°C, para este material en general se logra evidenciar las capas del material, producto del proceso de fabricación por

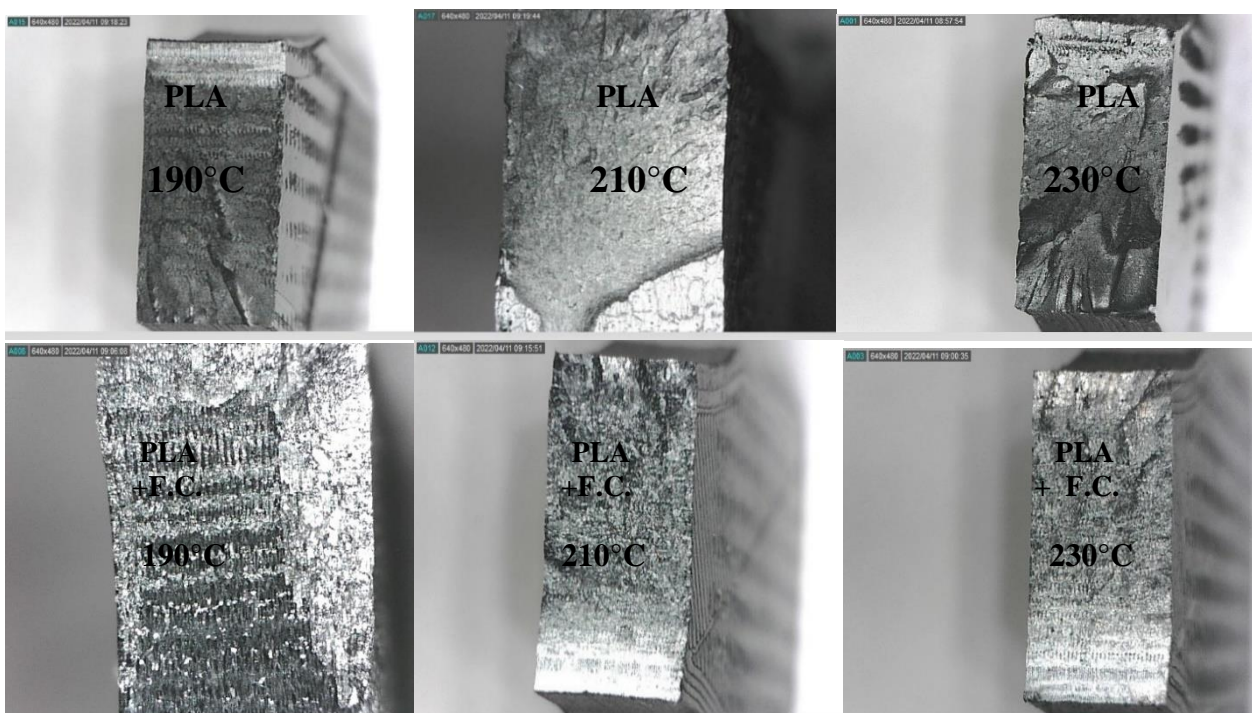
modelado por deposición fundida (FDM), a medida que aumenta la temperatura de impresión, el material se mezcla de mejor manera y es por eso que no es tan visible las capas como en la muestra impresa a 190°C; para estas tres muestras se logra evidenciar fractura del material con un corte longitudinal, contrario a la dirección de las capas de impresión.

Para las muestras de PLA+F.C., es evidente que a medida se aumenta la temperatura de impresión, el material se mezcla de mejor manera, sin embargo, por ser materiales que llevan incrustado la fibra de carbono, esta se logra evidenciar sobre la superficie del material.

Para las muestras de PETG, las cuales fueron fabricadas a 230°C, 240°C y 250°C, se logra ver una estructura bien organizada, sin embargo, a los 250°C se ve como el material logra interrelacionarse mucho más a nivel estructural, por ende, las capas de impresión son más imperceptibles, además que esta unión del material produce un gran beneficio a nivel de resistencia, sus átomos están mucho más cercanos.

Por último, el PETG+F.C. en todas las muestras impresas las incrustaciones de fibra de carbono, estas fibras mezcladas con la estructura cristalina del material, producen un gran beneficio cuando son puestos a pruebas, hace más rígida la estructura, permitiéndola aguantar más carga antes de deformarse permanentemente.

Se puede evidenciar que el tipo de fractura en las probetas, fue del tipo dúctil. Esto se evidencia por la formación de un cuello de botella en la zona de tensión para todas las probetas. También se evidencia que materiales más dúctiles como el PETG y PETG, se generó una mayor deformación plástica, con una elongación del material mucho más visible y una reducción del área mucho mayor respecto a los otros dos materiales. El PLA y PLA+F.C. al no ser tan dúctiles respecto a los otros dos materiales, se puede considerar que presentaron parte de fractura frágil. Esto se evidencia en los cortes provocados por la fractura la cual se desplazó, por las diferentes capas de manera axial a la probeta.



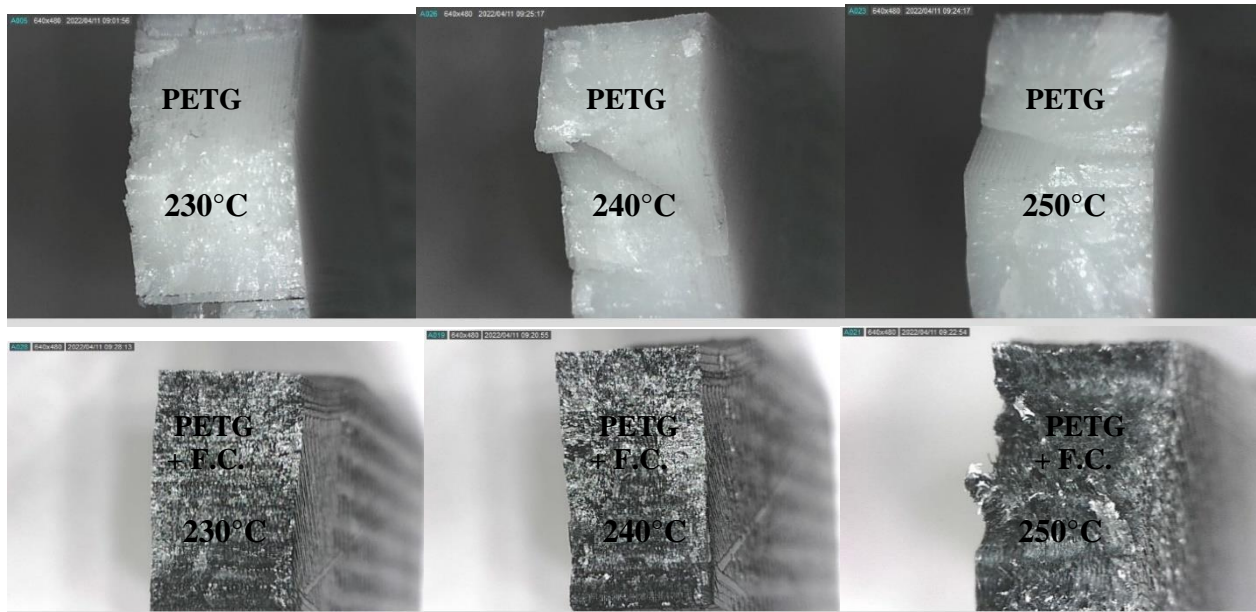


Figura 35. Imágenes SEM de probetas fracturadas de tensión. Fuente: Autor

Prueba de flexión

Esta prueba se realizó bajo la norma ASTM D790-17 (D790-17), la cual define los métodos de prueba estándar para propiedades de flexión de plásticos no reforzados y reforzados. El método consiste en que la muestra debe reposar sobre dos soportes en donde se aplica la carga a mitad de distancia entre ambos apoyos. Las muestras deben ser sólidas y uniformemente rectangular para permitir una carga correcta, estas se deben probar hasta que se rompan o se deformen más de 5%.

La máquina de ensayos de flexión está compuesta por un marco de carga encargada de mantener la rigidez de la máquina tal que la deformación elástica total del sistema no supere el 1% de la deflexión total de la probeta durante la prueba. El miembro fijo es el que sostiene los soportes de muestras; un miembro móvil que lleva la superficie de carga; la superficie de carga; el mecanismo impulsor para impartir al elemento móvil una velocidad uniforme y controlada con respecto al miembro estacionario; esta velocidad regulada está dada por los procedimientos A o B, donde A agrupa a los materiales que son de fácil deformación, mientras que el procedimiento B, se utiliza para materiales que no se rompan. Otro componente es el indicador de carga el cual muestra la carga total aplicada a la muestra cuando está en posición. Por último, la maquina cuenta con un dispositivo de medición de deflexión.

Para calcular la velocidad de la prueba se debe acudir a la siguiente ecuación:

$$R = ZL^2/6d \quad (1)$$

Donde:

$R =$ Es la tasa de movimiento de la cruceta en $\left(\frac{mm}{min}\right)$

$Z = \text{tasa de deformación de la fibra exterior, } \left(\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right) Z \text{ será igual a } 0.01$

$L = \text{Longitud de apoyo en (mm)}$

$d = \text{Profundidad de la viga (mm)}$

De esta manera se obtiene que la velocidad de la prueba sería:

$$R = \frac{(0.01)(127)^2}{6(12.7)} = 2.1 \left(\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right) \quad (2)$$

Finalmente, las muestras para las pruebas de flexión obtenidas se visualizan en la figura 36, las cuales fueron puestos en prueba en la máquina para ensayos de flexión.

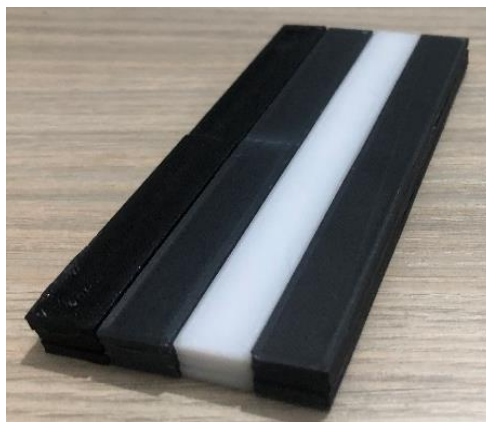


Figura 36. Muestras de flexión fabricadas bajo modelo de impresión 3D, según norma ASTM D638 – 14, Fuente: Autor

Para la prueba de flexión se realizaron 36 pruebas en la máquina de ensayos para flexión, donde se extrajeron datos significativos de los 4 materiales, como se puede evidenciar en la tabla 10, donde se visualizan las resistencias promedio de los 4 materiales a 3 diferentes temperaturas. En esta tabla el material con mejor resistencia a la flexión es el PLA el cual presenta una resistencia a la flexión promedio de 102.6 MPa, en segundo lugar, estaría el material PETG+F.C. el cual presenta una resistencia promedio de 96.6 MPa, en tercer lugar vemos que el material PETG obtiene una resistencia promedio de 86 MPa y por último y en cuarto lugar se encuentra el PLA+F.C. el cual presenta una resistencia promedio de 80.3 MPa.

	Temperatura (°C)	Esfuerzo de flexión - MOR (MPa)	Desviación Estándar	Módulo de elasticidad MOE (MPa)
PLA	190	106.30	1.97	8303.30
	210	108.83	5.30	
	230	92.65	13.35	
PLA + FC	190	68.42	2.38	4771.71
	210	86.25	5.26	
	230	86.96	11.89	

PETG	230	79.00	1.70	3957.14
	240	86.34	9.47	
	250	92.53	3.77	
PETG + FC	230	95.17	1.70	4472.91
	240	98.16	1.83	
	250	97.17	3.49	

Tabla 10. Medidas de la resistencia a la flexión promedio para los 4 materiales a probar. Fuente autor

Para las pruebas de flexión se obtuvo una gráfica con las diferentes resistencias de acuerdo al material y de acuerdo a la temperatura de impresión la cual oscilaba entre (190-230) °C para el PLA y PLA+F.C y (230-250) °C para el PETG y PETG+F.C., se visualiza en la figura 37.

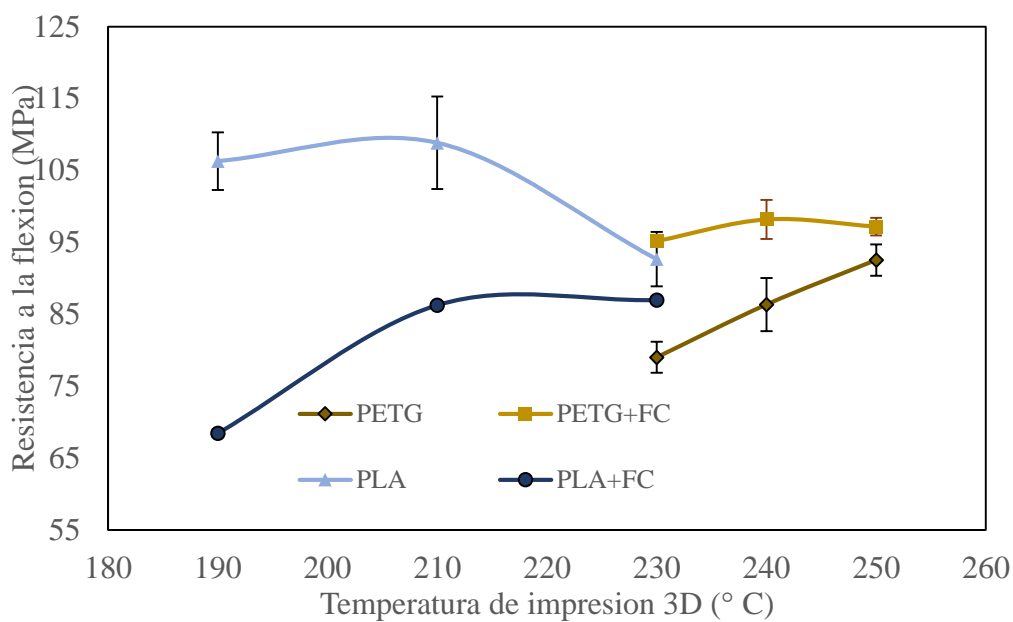


Figura 37. Resistencia a la flexión en 4 materiales fabricados a diferentes temperaturas, Fuente: Autor.

En la figura 38, se observa el comportamiento de esfuerzo-deformación para la prueba de flexión en los 4 materiales con sus máximas resistencias promedio con rango que oscilan entre (70-108) MPa. El PLA y el PETG+F.C. demuestran tener buenas condiciones a la hora de estar expuestos a cargas flexionantes. Mientras tanto el PLA+FC. y el PETG obtienen rendimientos muchos más bajos.

Después de ver los resultados obtenidos de los materiales, en la tabla 11 se realizó la clasificación según el rendimiento obtenido.

Material		Flexión
	PLA	5
	PLA+F.C.	2
	PETG	3
PETG+F.C.	4	

Tabla 11. Calificación de materiales para prueba de flexión. Fuente autor

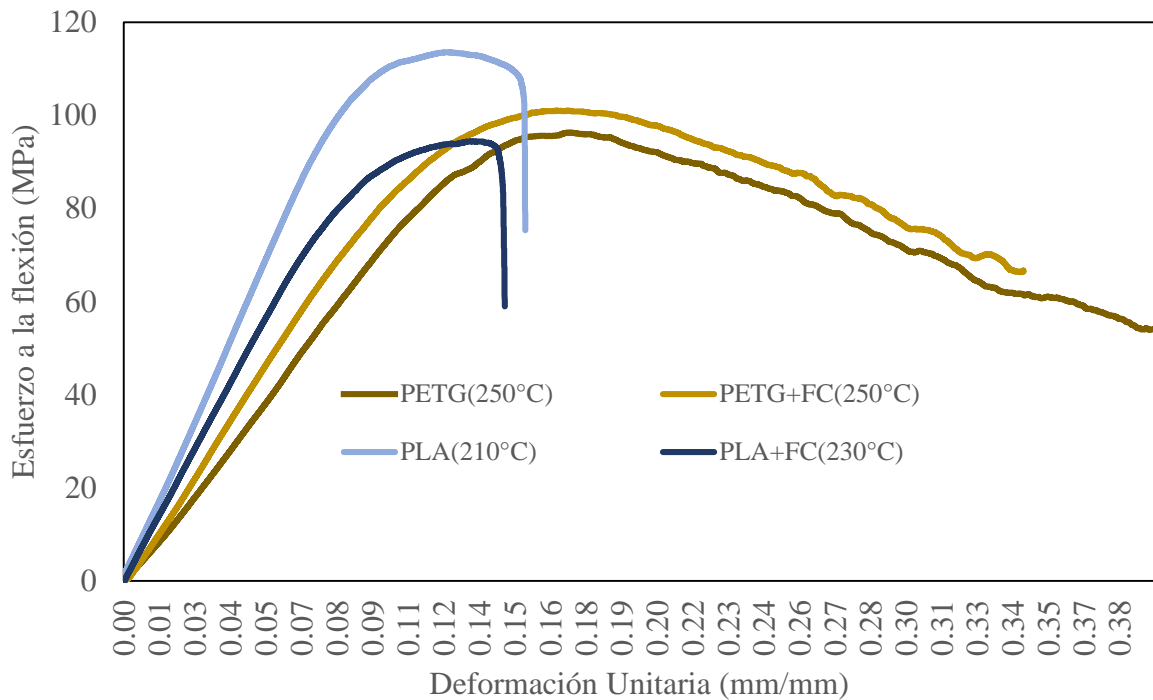


Figura 38. Esfuerzo (Megapascuales) vs deformación unitaria (mm/mm) para los 4 materiales probados en la máquina de ensayos de flexión, con la mejor resistencia promedio de cada uno, Fuente: Autor.

Prueba de resistencia al impacto

Esta prueba se basó en la norma D256 – 10, la cual establece el método de prueba estándar para determinar la resistencia al impacto por el método del péndulo Izod para los materiales plásticos. Este método involucra un martillo el cual es dejado caer en forma de péndulo sobre la muestra, la cual puede llevar una muesca para mejorar la concentración de la tensión, aumentando la probabilidad de la rotura. La máquina para esta prueba consiste en una base sólida sobre la cual se montó un banco para sostener la muestra, la cual está conectada a través de un marco rígido y cojinetes a un tipo de péndulo martillo. La máquina también debe tener un mecanismo de sujeción y liberación del péndulo y un mecanismo para indicar la energía de rotura de la muestra.

Posteriormente, las muestras para las pruebas de impacto fabricadas se visualizan en la figura 39a, las cuales fueron llevadas a la máquina de pruebas para ensayos de flexión, ver figura 39b.

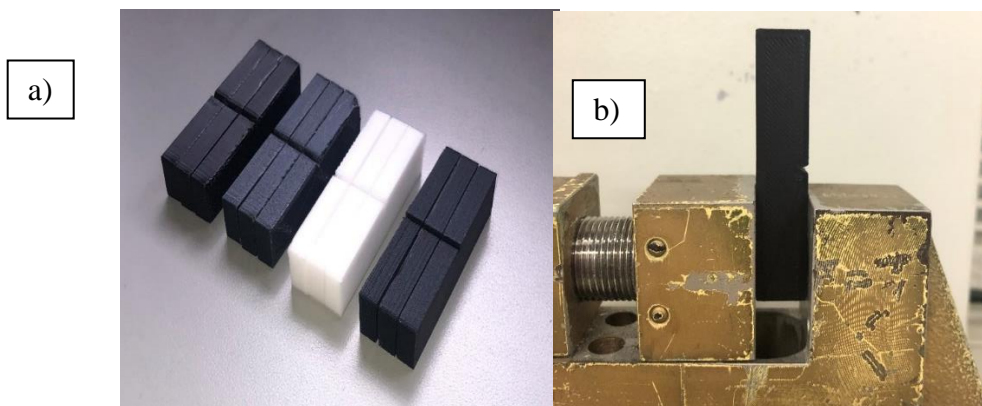


Figura 39. a) Muestras de impacto fabricadas bajo modelo de impresión 3D. b) Probeta en máquina de ensayo al impacto método Izod, según norma D256 – 10, Fuente: Autor.

La realización de la prueba de impacto Izod involucro un total de 36 pruebas en la máquina de ensayos para impacto de polímeros. Se tomaron datos significativos de los 4 materiales, como se puede evidenciar en la tabla 12, donde se visualizan las resistencias promedio de los 4 materiales a 3 diferentes temperaturas. En esta tabla se puede observar que el material con mejor resistencia al impacto es el PLA el cual presenta una resistencia al impacto promedio de $66 \frac{J}{m}$, en segundo lugar estaría el material PLA+F.C. el cual presenta una resistencia al impacto promedio de $57 \frac{J}{m}$, en tercer lugar vemos que el material PETG+F.C. obtiene una resistencia al impacto promedio de $40 \frac{J}{m}$ y por último, y en cuarto lugar estar el PETG el cual presenta una resistencia al impacto promedio de $33 \frac{J}{m}$.

	Temperatura (°C)	Resistencia al impacto (J/M)	Desviación Estándar
PLA	190	57.74	15.91
	210	69.55	41.73
	230	72.18	25.31
PLA + FC	190	36.75	11.37
	210	54.33	11.44
	230	78.74	3.94
PETG	230	30.18	8.20
	240	31.50	3.94
	250	36.75	6.01
PETG + FC	230	36.75	6.01
	240	35.43	10.42
	250	48.56	6.01

Tabla 12. Clasificación de la resistencia al impacto promedio para los cuatro (4) materiales a probar. Fuente autor

Luego de realizadas las pruebas de impacto Izod, en una máquina de pruebas especializada para polímeros, se obtuvieron los resultados de la resistencia al impacto para los 4 materiales probados a las temperaturas de impresión la cual oscilaba entre (190-230) °C para el PLA y PLA con fibra de carbono y (230-250) °C para el PETG y PETG con fibra de carbono, al graficar estos resultados se crea la figura 40, dentro de la cual podemos analizar lo siguiente;

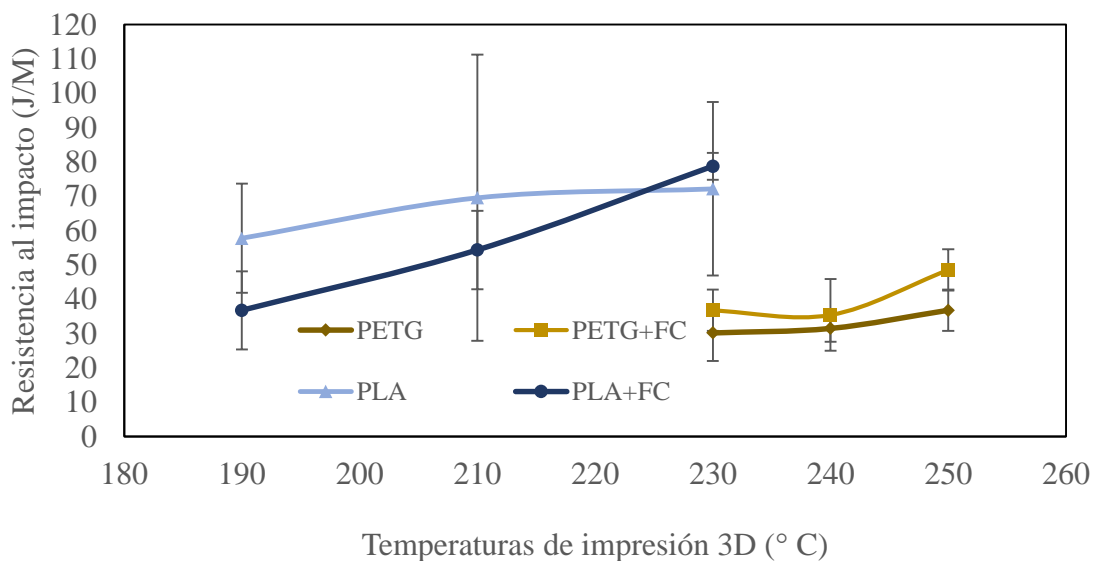


Figura 40. Esfuerzo (Megapascuales) vs deformación unitaria (mm/mm) para los 4 materiales probados en la máquina de ensayos de flexión, con la mejor resistencia promedio de cada uno, Fuente: Autor.

Para los materiales PLA y PLA+F.C. se puede apreciar que presentan mejores condiciones de resistencia al impacto a una temperatura de impresión de 230°C, obtienen resistencias de $72 \frac{J}{m}$ y $79 \frac{J}{m}$ respectivamente, mientras que a temperaturas de impresión de 190°C se obtienen resistencias de $58 \frac{J}{m}$ y $37 \frac{J}{m}$.

De esta manera se puede concluir que los materiales de PLA y PLA con fibra de carbono, resultan mejores para soportar cargas de impacto a 230°C de temperatura impresa. Temperaturas bajas de impresión como 190°C, podría causar una disminución promedio del 20% de la resistencia al impacto. En la tabla 13 se realiza la clasificación para esta prueba de impacto.

Material	Impacto	
	PLA	5
	PLA + F.C.	4
	PETG	2
PETG + F.C.	3	

Tabla 13. Calificación de materiales para prueba de impacto. Fuente autor

Prueba de dureza

Esta prueba está sujeta a la norma ASTM D785 – 08 la cual define el método de prueba estándar para la dureza de plásticos y materiales aislantes eléctricos, posteriormente, las muestras para las pruebas de dureza fabricadas se visualizan en la figura 41a, las cuales fueron puestas a prueba con el medidor de dureza como se evidencia en la figura 41b.



Figura 41 a) Muestras de impacto fabricadas bajo modelo de impresión 3D. b) toma de dureza con medidor shore D Fuente: Autor.

Para la toma de dureza de los materiales se usó el durómetro Shore D y se realizó esta prueba a un total de 36 muestras, donde se extrajeron indicadores de los 4 materiales, como se puede evidenciar en la tabla 14, donde se visualizan la medida de dureza promedio de los 4 materiales a 3 diferentes temperaturas. En esta tabla se puede observar que el material con mejor dureza fue el PLA el cual obtiene una dureza promedio de 73 shore D. En segundo lugar, estaría el material PLA+F.C. el cual presenta una dureza de 72 shore D. El tercer lugar vemos que el material PETG+F.C. presenta una dureza de 67 shore. Por último y en cuarto lugar estar el PETG el cual obtiene una dureza de 66 shore D.

	Temperatura (°C)	Dureza (Shore D)	Desviación Estándar
PLA	190	73.50	1.05
	210	73.00	0.63
	230	73.67	0.52

PLA + FC	190	71.17	0.98
	210	72.50	1.05
	230	72.17	0.98
PETG	230	69.00	0.63
	240	62.83	2.99
	250	67.17	0.75
PETG + FC	230	63.17	1.47
	240	69.17	0.41
	250	69.50	0.84

Tabla 14. Clasificación de Dureza promedio para los cuatro (4) materiales a probar. Fuente autor

Los datos observados en la tabla 14 también se pueden validar en la figura 42, los cuales muestran la dureza para los 4 materiales probados a las temperaturas de impresión la cual oscilaba entre (190-230) °C para el PLA y PLA+F.C. y (230-250) °C para el PETG y PETG+F.C.

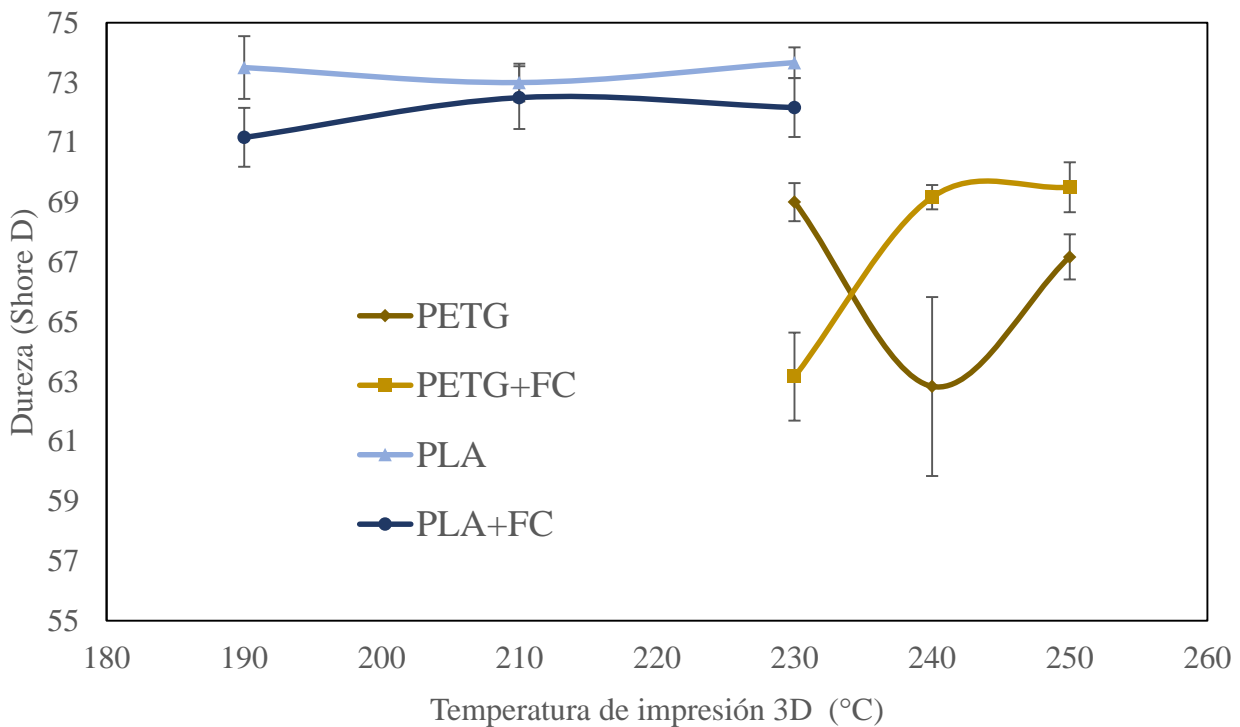


Figura 42. Esfuerzo (MPa) vs deformación unitaria (mm/mm) para los 4 materiales probados en la máquina de ensayos de flexión, con la mejor resistencia promedio de cada uno, Fuente: Autor.

Para los materiales PLA y PLA+F.C. se puede apreciar que no hubo mucha fluctuación en las muestras a las diferentes temperaturas. A 190°C se obtuvieron durezas de 74 Shore D y 71 Shore D respectivamente, mientras que a temperaturas de impresión de 230°C se obtienen durezas de 74 Shore D y 72 Shore D.

Para los materiales PETG y PETG+F.C., se evidencia que presentan una fluctuación a medida que se varía la temperatura de impresión. Por ejemplo, el PETG a 230°C obtiene una dureza de 69 Shore D, a 240°C disminuye a 63 Shore D y cuando se prueba a 250°C presenta un aumento en la dureza de 67 Shore D. Mientras tanto el PETG +F.C. a 230°C de impresión presenta una baja resistencia de 63 Shore D, a 240°C aumenta a 69 Shore D y obtiene su mejor dureza a los 250°C con una medida de 70 Shore D.

De esta manera se puede concluir que los materiales PLA y PLA+F.C. no presentan mucho cambio en su dureza al ser impresos en diferentes temperaturas, mientras tanto el PETG presenta mejor dureza a 230°C de impresión, por el contrario, el PETG +F.C. obtiene su mejor dureza a los 250° C.

En la tabla 15 se realiza la calificación de los materiales para la prueba de dureza

Material		Dureza
	PLA	5
	PLA + F.C.	4
	PETG	2
	PETG + F.C.	3

Tabla 15. Calificación de prueba de dureza para los 4 materiales. Fuente autor

Prueba de envejecimiento térmico

La prueba de exposición térmica fue determinada por la norma ASTM D3045 – 18, la cual define la práctica estándar para el envejecimiento térmico de plásticos sin carga. Esta práctica tiene por objeto definir las condiciones de exposición para evaluar la resistencia térmica de los plásticos cuando son expuestos únicamente al aire caliente durante largos períodos de tiempo. Esta práctica se utilizó como guía para comparar los efectos del envejecimiento de los materiales, sobre alguna propiedad de interés. La propiedad de interés será la dureza, esta se midió anteriormente a temperatura ambiente y posteriormente será medida luego de la exposición a todas las probetas fabricadas a las 3 temperaturas. [61]. Es por esto que se expusieron las muestras utilizadas en la prueba de dureza como se ve en la figura 43a, por periodos de tiempo determinados en 1, 3 y 5 horas, a una temperatura de 80°C, durante cada intervalo de tiempo, las muestras son retiradas del horno y medida su dureza, tal como se evidencia en la figura 43b

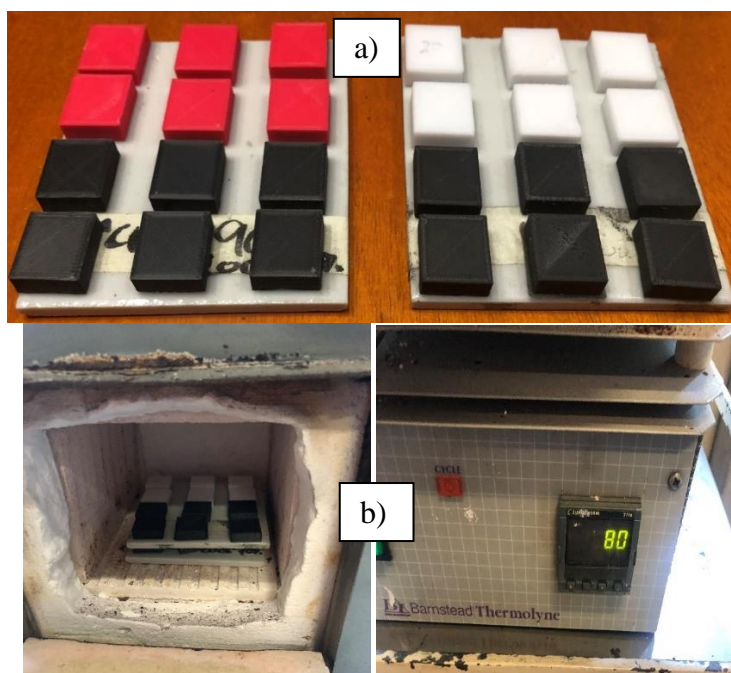


Figura 43. a) Muestras listas para entrar al horno para la exposición termina durante 8 horas. b) Exposición térmica de muestras a 80°C Durante 5 horas. Fuente: Autor.

Las muestras expuestas al horno, fueron retiradas a la primera hora para tomarles dureza, de igual manera se repitió este proceso a la tercera hora y a la quinta hora, para las 36 muestras, de esta toma de datos se pudo obtener la tabla 16 donde se visualiza la medida de dureza promedio de los 4 materiales a 3 diferentes tiempos de exposición térmico. En esta tabla se puede observar que el material con mejor dureza después de ser expuesto fue el PLA+FC. el cual presenta una dureza promedio de 71 shore D, en segundo lugar, estaría el material PLA el cual presenta una dureza de 67 shore D, en tercer lugar, vemos que el material PETG+FC. presenta una dureza de 64 shore D y por último y en cuarto lugar estar el PETG el cual presenta una dureza de 61 shore D.

Material	Temperatura de impresión (°C)	Dureza (Shore D) a 1 hora	Dureza (Shore D) a 3 horas	Dureza (Shore D) a 5 horas	Desviación Estándar
PLA	190	64	66	67	2.00
	210	67	68	68	2.00
	230	68	69	71	2.33
PLA + FC	190	70	72	71	0.33
	210	69	70	72	0.33
	230	71	71	72	0.50
PETG	230	60	61	60	1.00
	240	61	63	64	1.33
	250	59	63	63	1.50
PETG + FC	230	64	63	64	0.67
	240	65	65	62	0.50
	250	65	65	67	0.67

Tabla 16. Clasificación de Dureza promedio para los cuatro (4) materiales a probar. Fuente autor

Para poder visualizar la dureza durante el periodo de tiempo de la prueba se promedian los valores por materiales y se obtiene la tabla 17.

Material	Dureza (Shore D) 1 hora	Dureza (Shore D) 3 hora	Dureza (Shore D) 5 hora	Desviación estándar
PLA	66.33	67.33	68.33	2.11
PLA + FC	69.67	71.00	71.50	0.39
PETG	59.67	62.00	62.17	1.28
PETG + FC	64.33	64.17	64.33	0.61

Tabla 17. Promedio de dureza por materiales durante 5 horas expuestos. Fuente autor

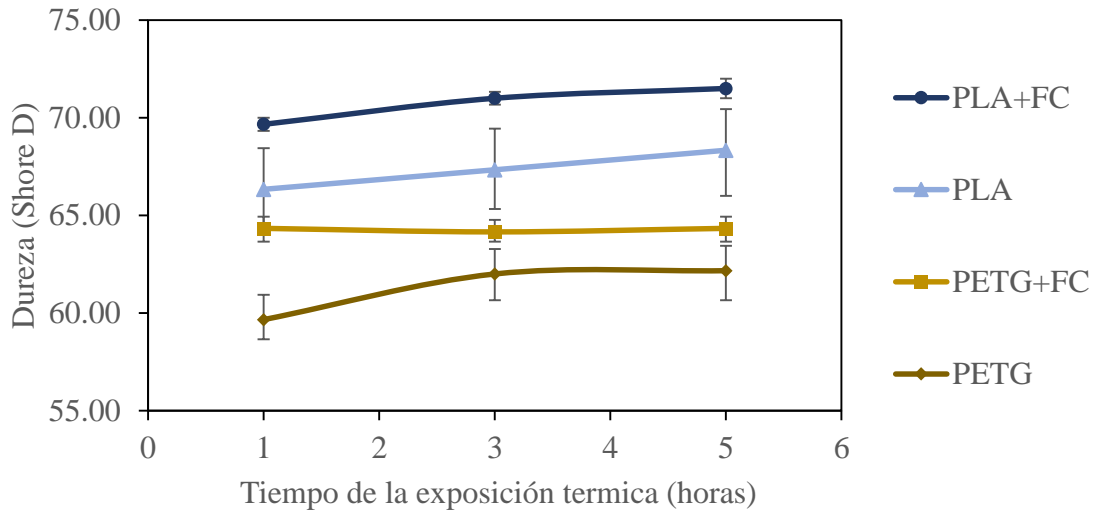


Figura 44. Dureza respecto al tiempo de exposición térmica. Fuente: Autor.

Sin embargo para esta prueba es importante analizar cómo se ve afectada la propiedad de interés, la cual es la dureza, para esto debemos comparar la medida de la dureza de todos los materiales a temperatura ambiente versus la dureza de todos los materiales a medida que son expuestos en un horno a 80°C durante 1, 3 y 5 horas; En la tabla 18 se evidencia que durante el periodo de 1 hora de exposición se logra ver en el PLA una disminución del 10% del valor de dureza inicial, este mismo porcentaje de disminución está presente en el PETG, por su parte el PLA + F.C. apenas disminuye un 3% su dureza, muy similar al PETG+F.C. el cual disminuye en un 4% su dureza.

Por lo tanto, se concluye que el mejor material para soportar temperaturas elevadas y mantener su dureza continua es el PLA+F.C. detrás de este material está el PETG+F.C., es posible que las fibras de carbono, ayuden a mantener la estructura molecular estable, a pesar de las temperaturas de exposición.

Material	Dureza (Shore D) Temp. Ambiente	Dureza (Shore D) 1 hora a 80°C	% Decrecimiento 1h	Dureza (Shore D) 3 horas a 80°C	% Decrecimiento 3h	Dureza (Shore D) 5 horas a 80°C	% Decrecimiento 5h
PLA	73	66	10%	67	8%	68	7%
PLA + FC	72	70	3%	71	1%	72	1%
PETG	66	60	10%	62	7%	62	6%
PETG + FC	67	64	4%	64	5%	64	4%

Tabla 18. Clasificación de Dureza promedio para los cuatro (4) materiales después de ser expuestos al envejecimiento térmico durante 5 horas. Fuente autor

En la tabla 19 se realiza la calificación para esta prueba de envejecimiento térmico.

Material	Envejecimiento térmico
PLA	2
PLA + F.C.	5
PETG	3
PETG + F.C.	4

Tabla 19. Clasificación de Dureza en los materiales según su porcentaje de variación en la exposición térmica. Fuente autor

Prueba de exposición U.V.

Por último, la exposición ultravioleta está determinada por la norma ASTM D4329 – 13 la cual determina la práctica estándar para la exposición de plásticos con lámpara fluorescente ultravioleta (UV) [59]. En esta prueba al igual que la prueba anterior se expondrá durante un periodo de 8 horas las muestras a una radiación de 405 nm de intensidad lumínica ultravioleta, posterior a la exposición se medirá nuevamente la propiedad de dureza con el fin de determinar la influencia de la radiación sobre esta propiedad de interés. En la figura 45a, se puede evidenciar las muestras posicionadas antes de ser expuestas, en la figura 45b se visualiza las piezas durante el periodo de exposición.

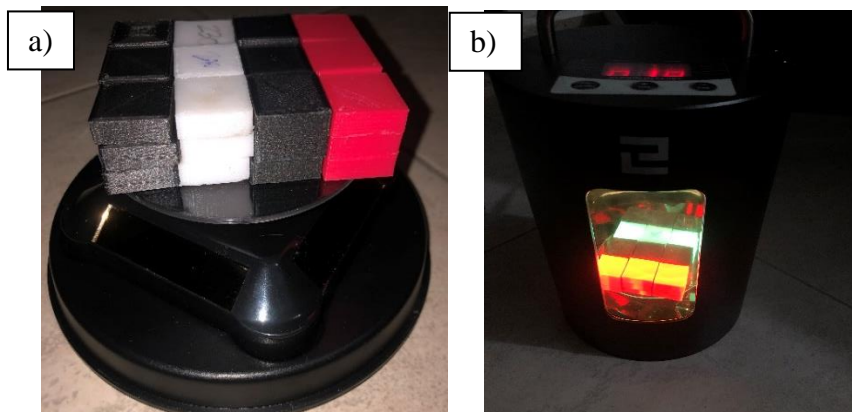


Figura 45. a) Muestras organizadas en la base giratoria para prueba de exposición U.V- PLA, PLA+F.C., PETF y PETG+F.C. b) Muestras durante la exposición U.V. a 405nm, por un periodo de 8 horas. Fuente: Autor

Para esta prueba las 36 muestras fueron expuestas a la radiación U.V. con una intensidad de 405 nm durante 8 horas, el objetivo principal de esta prueba fue constatar el cambio de la dureza respecto a la exposición U.V. Es así como se obtienen los datos de la tabla 20.

Es por esto que el PETG+F.C. es el material que mejor se comporta con la exposición U.V. mientras tantos los otros 3 materiales pierden dureza de la siguiente manera, el PETG disminuye su dureza en 1.9 %, pasando de 66 shore D a 65 shore D, posterior se encuentra el PLA con una disminución del 2.1% de su dureza pasando de 73 shore D a 72 shore D y por último el material que más pierde dureza al ser expuesto la radiación U.V. es el PLA+F.C. el cual disminuye su dureza en un 4.8 % pasando de 72 shore D a 69 shore D. La pérdida de dureza en este material también se puede deber a que en estas exposiciones de radiación UV, los átomos se intenten separar un poco efecto de la radiación para reorganizar un poco, pero si se prolonga la exposición por un tiempo mayor es posible que esta distancia aumente, generando un efecto adverso sobre la dureza de estos materiales.

Material	Temperatura (°C)	Dureza inicial (Shore D)	Dureza (Shore D) a 8h a exposición UV 405 nm	Desviación Estándar	% Variación de Dureza
PLA	190	73.50	72.17	0.90	2.1%
	210	73.00	70.83	0.69	
	230	73.67	72.50	0.53	
PLA + FC	190	71.17	65.67	1.78	4.8%
	210	72.50	68.83	1.02	
	230	72.17	71.00	0.94	

PETG	230	69.00	67.00	1.37	1.9%
	240	62.83	61.50	2.67	
	250	67.17	66.67	1.50	
PETG + FC	230	63.17	66.00	1.57	-1.3%
	240	69.17	69.00	0.52	
	250	69.50	69.33	0.68	

Tabla 20. Clasificación de Dureza en los materiales según su porcentaje de variación en la exposición térmica. Fuente autor

Esto mismo análisis se puede visualizar en la figura 46 donde se visualiza la gráfica de dureza respecto a la temperatura, pero se superpone la misma medida de dureza, pero a las muestras expuestas por radiación U.V., las muestras más oscuras representan la medida de las muestras expuestas, mientras que la gráfica más clara muestra la medida de dureza a temperatura ambiente.

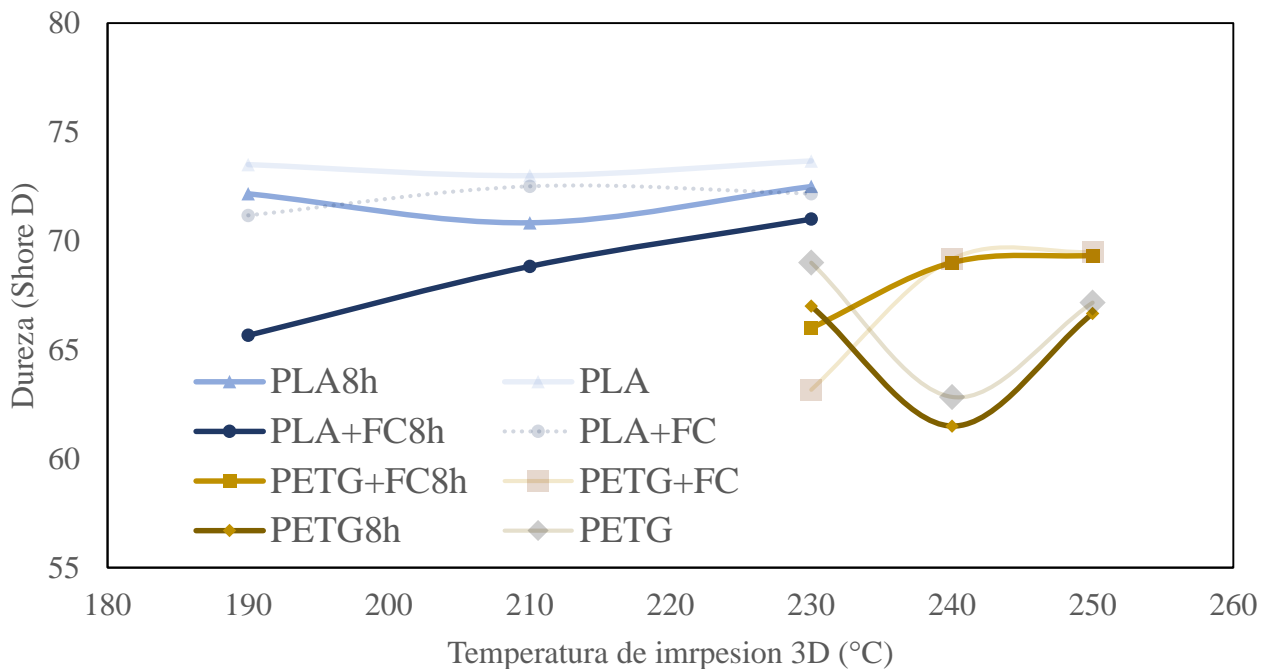


Figura 46. Esfuerzo (Megapascuales) vs deformación unitaria (mm/mm) para los 4 materiales probados en la máquina de ensayos de flexión, con la mejor resistencia promedio de cada uno, Fuente: Autor.

Es así como se puede concluir que el mejor material para soportar la radiación ultravioleta es el PETG+F.C., se evidencia como la dureza aumenta en 1.3 % en comparación con los otros materiales que al contrario disminuyeron la capacidad de esta propiedad, hasta en 4.8%.

En la tabla 21 se realizó la calificación para esta prueba de exposición a los rayos ultravioletas.

Material	Exposición U.V.	
	PLA	3
	PLA + F.C.	2
	PETG	4
PETG + F.C.	5	

Tabla 21. Clasificación de Dureza en los materiales según su porcentaje de variación en la exposición térmica. Fuente autor

Selección de la mejor muestra

De acuerdo a las 6 pruebas realizadas a las muestras fabricadas, se califican los materiales en cada una de las pruebas como se observa en la tabla 22, es por esto que el material que obtiene mayor puntaje es el **PETG+F.C.** material seleccionado para fabricar el alabe de la turbina eólica. presenta buenas propiedades de resistencia a la tensión, flexión y buena ductilidad, estas propiedades son muy importantes, el alabe se va encontrar en constante carga del viento y al tener una buena resistencia a la tensión y flexión del viento podrá mantenerse en buenas condiciones operativas por un largo periodo de tiempo.

Selección del material para alabe turbina H-Darrieus								
Material	Tensión	Deformación y ductilidad	Flexión	Impacto	Dureza	Envejecimiento térmico	Exposición U.V.	Total
PLA	3	3	5	5	5	2	3	26
PLA + F.C.	4	2	2	4	4	5	2	23
PETG	2	4	3	2	2	3	4	20
PETG + F.C.	5	5	4	3	3	4	5	29

Tabla 22. Comparativo de materiales según resultado obtenido en cada prueba. Fuente autor

Comparación del PETG+F.C. con la resina epoxy con fibra de vidrio

Para realizar esta comparación se introduce la tabla 23. Donde se muestran las propiedades mecánicas obtenidas con las pruebas realizadas en laboratorios al material PETG+F.C. y se compara con datos externos de la resina epoxy con fibra de vidrio. La primera referencia se trata de un estudio comparativo de las propiedades mecánicas de la resina poliéster reforzada con fibra de bambú, como material sustituto de la fibra de vidrio [62], la segunda referencia fue una ficha técnica de un catálogo del producto Resina Epoxy [63] y como ultima referencia se tiene en cuenta otra ficha técnica del producto de resina Epoxy [64].

Prueba	PETG+F.C.	RESINA + F.V.	Diferencia
Tensión (Mpa)	52.93	80.00	34%
Módulo de elasticidad durante el alargamiento	810.54	3400.00	76%
Flexión (Mpa)	99.00	130.00	24%
Módulo de elasticidad durante la flexión	4472.00	3400.00	-32%
Impacto (J/m)	517.00	461.00	-12%
dureza (Shore D)	70.00	81.00	14%

Tabla 23. Comparativo del material seleccionado vs el material común de fabricación de álabes. Fuente autor

En términos generales la resina epoxy con fibra de vidrio, presenta mejores condiciones respecto al material termoplástico seleccionado. Esta diferencia del termoplástico se debe a la naturaleza del material, el cual presenta muy buenas propiedades mecánicas. Sin embargo el tema del reciclaje de los mismos es un reto a asumir y por ende, se deben mejorar los diseños desde el principio pensando en un ciclo circular para estos materiales.

Para la resistencia a la tensión el termoplástico posee un 34% más de capacidad. Al igual el módulo elástico a la tensión es mucho mayor hasta en un 76%. Siendo esta propiedad una gran diferenciadora a la hora de seleccionar un material que se pueda elongar bastante sin fracturarse. La propiedad de la flexión el termoplástico presente un 24% más de capacidad, sin embargo, en el módulo de elasticidad y

la propiedad de impacto, el PETG+F.C. presenta mejores condiciones mecánicas hasta en un 12% más que el termoestable. Por último la dureza del material epóxico es mayor en un 14%.

Este comparativo se podría esperar, puesto que la industria de la energía eólica, ha volcado toda su atención por muchos años, en la fabricación de este tipo de álabes con epoxy y fibra de vidrio, para obtener mayores rendimientos en sus turbinas. Por ende, buscar un material sustituto que cumpla con las mismas características del material actual, puede llegar a ser complicado, sin embargo, encontrarlo podría generar un avance importante para el manejo de los recursos a futuro.

El material sustituto no presenta las mismas condiciones mecánicas, sin embargo, es un termoplástico y tienen beneficios en la manufactura, debido a que los procesos de fabricación son más sencillos. más rápidos y menos costosos, se pueden calentar y moldear varias veces, sin ningún problema, recobrando su dureza al enfriarse llegándose a estabilizar hasta en 10 segundos, mejorando los tiempos de fabricación Sin embargo es importante seguir en la búsqueda de nuevos materiales que puedan sustituir a la resina epoxi y a la fibra de vidrio, por materiales termoplásticos de fácil reciclaje y reutilización.

Diseño, fabricación y ensamblaje de turbina eólica H-Darrieus

Para el diseño de la turbina se realizará un análisis aerodinámico el cual permite obtener la cantidad de energía cinética del aire que se puede transferir a la turbina eólica [65]. El modelo usado para el análisis es el del disco actuador [66], donde la turbina es reemplazada por un disco circular a través del cual la corriente de aire fluye con una velocidad $W_{-\infty}$ debido a esto hay una caída de presión p de la posición antes del disco y después del disco como se muestra en la figura 47.

Al principio es importante remarcar que la teoría de disco actuador es muy útil en la discusión de la eficiencia general de la turbina. En el modelo de disco actuador se asume: que no hay resistencia al rozamiento, el flujo es en estado estable, homogéneo, incompresible, empuje por unidad de área sobre el disco, continuidad a través del disco y un infinito número de álabes. El análisis de la teoría de disco actuador asume un volumen de control en el cual las fronteras son superficies con dos secciones transversales en forma de tubo. Para analizar este volumen de control se consideran cuatro regiones: 1. Región de corriente libre; 2. Justo antes de los álabes; 3. Justo después de los álabes y 4. Región de la estela [67] [68].

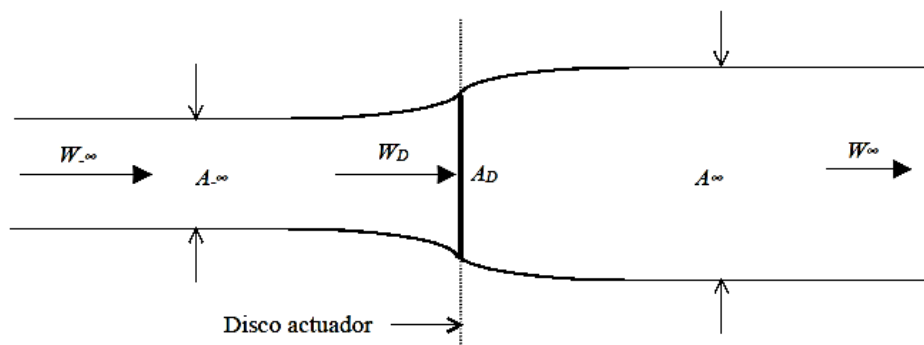


Figura 47. Disco actuador en un tubo de flujo [66].

En la figura 47 se ve un tubo de flujo el cual no tiene un área constante, debido a que el disco extrae parte de la energía del viento, por ende, la velocidad del fluido disminuye, por lo tanto, para garantizar

que la ecuación de continuidad se cumpla al disminuir una variable, la otra debe aumentar por lo tanto al reducirse la velocidad del viento, el área debe aumentar, de esta manera se establece que:

$$(\rho_w \cdot A_{-\infty} \cdot W_{-\infty}) = (\rho_w \cdot A_D \cdot W_D) = (\rho_w \cdot A_{\infty} \cdot W_{\infty}) \quad (3)$$

Donde (ρ) es la densidad del Aire, (A) es el área transversal y (W) es la velocidad del viento, de igual manera la cantidad de movimiento (M) que entrega una masa de aire m , al disco actuador se puede determinar mediante la ecuación (4).

$$M = m \cdot (W_{-\infty} - W_{\infty}) \quad (4)$$

Mientras que las fuerzas (F) que interactúan entre el flujo del aire y el disco actuador, son gobernadas por la segunda ley de Newton que se puede expresar mediante la ecuación (5).

$$F = \frac{dM}{dt} = \dot{m} \cdot (W_{-\infty} - W_{\infty}) = \rho_w \cdot A_D \cdot W_D \cdot (W_{-\infty} - W_{\infty}) \quad (5)$$

Es así como la energía cinética (E_c) que entrega la masa de aire, está regida por la ecuación (6):

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (W_{-\infty}^2 - W_{\infty}^2) \quad (6)$$

Y la potencia que entrega el aire (P_w) al disco actuador puede ser determinada mediante la ecuación (5).

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \cdot A_D \cdot W_D \cdot (W_{-\infty}^2 - W_{\infty}^2) \quad (7)$$

La potencia extraída finalmente por el disco actuador (P_D) estará dada por la ecuación (8) [69]:

$$P_D = F \cdot W_D = \frac{1}{2} \rho \cdot A_D \cdot W_{-\infty}^3 \cdot C_{PD} \quad (8)$$

Donde (C_{PD}) es el coeficiente de potencia del disco actuador que puede ser determinado a partir de la ecuación (7).

$$C_{PD} = \frac{P_{Disk}}{P_{wind}} \quad (9)$$

Si reemplazamos las ecuaciones (7) y (8) en la (9), nos quedaría el coeficiente de potencia del disco dado por la ecuación (10):

$$C_{PD} = \frac{\frac{1}{2} \rho \cdot A_D \cdot W_{-\infty}^3 \cdot 4 \cdot a \cdot (1 - a)^2}{\frac{1}{2} \rho \cdot A_D \cdot W_{-\infty}^3} = 4 \cdot a \cdot (1 - a)^2 \quad (10)$$

Por ende, la potencia del disco estará regida por la ecuación (11):

$$P_D = \frac{1}{2} \rho \cdot A_D \cdot W_{-\infty}^3 \cdot 4 \cdot a \cdot (1 - a)^2 \quad (11)$$

$$\text{Donde } a = 1 - \frac{W_D}{W_{-\infty}} \quad (12)$$

Siendo (a) el factor de flujo; de la ecuación (10) se puede deducir que C_{PD} *Maximo* es de $\frac{16}{27} = 0.593$, esto se demuestra tabulando valores de a entre (0.1 y 1) con intervalos de 0,05, se obtiene la figura 48 [70].

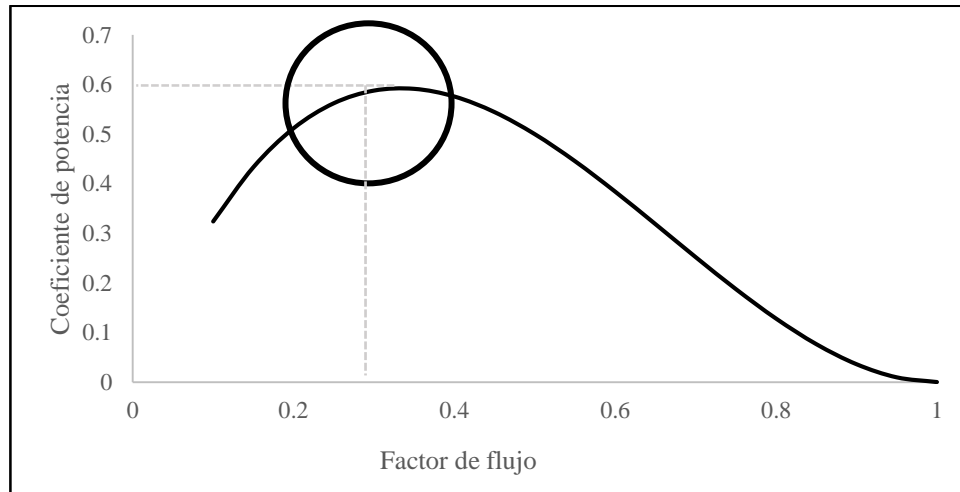


Figura 48. Obtención de máximo coeficiente de potencias vs el factor flujo, fuente: Autor.

Con un valor del factor de flujo $a = \frac{1}{3}$ el coeficiente de potencia máximo sería 59.3%, esto refleja lo que es conocido como límite de Betz y se debe a que es imposible extraer el 100 % de la energía cinética del viento, esto implicaría que la velocidad final del viento fuera cero es decir nada de flujo, adicionalmente este valor solo sucede cuanto tenemos un flujo lineal constante, no viscoso y no turbulento, si por el contrario sucede desprendiendo de vórtices o rotación de la estela, la eficiencia se reducirá aún más [71].

A la ecuación (8) se le deberá agregar un factor de eficiencia por pérdidas mecánicas y eléctricas (η) equivalente a 0.75, esto debido a que el sistema cuando transforma la energía mecánica en eléctrica, tiene una pérdida de energía, adicionalmente cuando se genera esa energía durante el transporte se pierde energía en forma de calor por los cables conductores. De esta manera se obtiene la ecuación final de potencia obtenida por la turbina eólica, como (P_t):

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \cdot A_D \cdot W_{-\infty}^3 \cdot C_{PD} \cdot \eta \quad (13)$$

Se define (A_D) como el área que envuelve los álabes en sus movimientos y está relacionada con el diámetro del rotor (D) y la altura del alabe (H), dicha área se define mediante la ecuación (14).

$$A_D = D \cdot H = 2 \cdot R \cdot H \quad (14)$$

Por otra parte, la velocidad punta del álabe o *TSR* (λ) por sus siglas en ingles incide directamente sobre el coeficiente de potencia y se define mediante la ecuación (15):

$$TSR (\lambda) = \frac{R\psi}{W_{-\infty}} \quad (15)$$

Donde (ψ) es la velocidad rotacional de la turbina. El valor del TSR relaciona la velocidad tangencial en la punta del alabe y la velocidad del aire [72].

Como se puede observar en la figura 49, cada configuración de turbina eólica es diferente, esto produce un C_p diferente para cada una; existen turbinas de baja velocidad como los rotores Savonius o los molinos Multipala los cuales tienen una baja eficiencia, de igual manera existen rotores horizontales de 1, 2 y 3 álabes y rotores Darrieus con C_p mucho mayores [73], esto significa una mayor eficiencia en rangos que oscilan entre 35-50 % [74]; a mayor TSR el perfil aerodinámico deberá ser más óptimo, las turbinas con velocidades muy altas tienden a disminuir su eficiencia [75] [76]

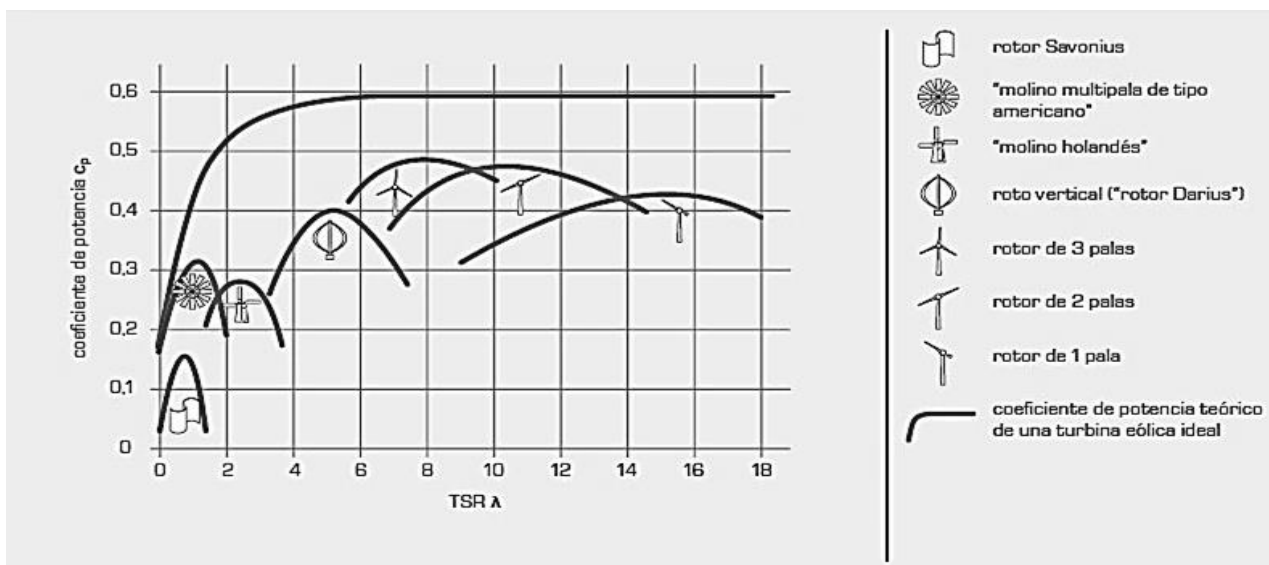


Figura 49. Coeficiente de potencia en función de la TSR, para distintas configuraciones de turbinas eólicas en comparación con el límite de Betz [9].

De otra parte, existe un factor de forma ($A_D R$) el cual relaciona la altura del alabe (H) y el radio de la turbina (R) este factor puede oscilar en rangos entre 1 y 4, para turbinas eólicas de eje vertical [77], para este diseño se usó la relación de 2 y se representa mediante la ecuación (16) [78]:

$$A_D R = \frac{H}{R} \quad (16)$$

Para el diseño de los álabes es de interés encontrar la longitud de la cuerda (c), la cual se podría obtener igualando el empuje de la turbina (I) dado por la teoría del disco actuador con el empuje de la turbina dado por la teoría momento en el alabe, de esta manera obtenemos la ecuación (17) [79]:

$$I = 2\rho A_D a(1 - a)W_{-\infty}^2 \quad (17)$$

Las fuerzas que interactúan en una turbina de eje vertical se pueden interpretar por medio de la teoría del elemento de pala y el momento sobre una turbina [80]. En la figura 50 podemos observar como las fuerzas actúan en cada cuadrante de la revolución del alabe, se puede ver que siempre existe una componente de fuerza de sustentación F_L siempre en dirección de la rotación, mientras que el momento producido varía con respecto a la posición del alabe [81], entre menor sea el número de

álabes habrá mayor variación en el torque [82]. El ángulo de ataque (α) en esta turbina de eje vertical, varia en función del ángulo azimut (θ). También se logra evidenciar que la rotación de la turbina es producida por F_L y el vector de velocidad ($W_{-\infty}$) o (W) se descompone en un vector normal (F_N) y un vector tangencial (F_T) dando origen a la siguiente ecuación (18) [83] [84] [85]:

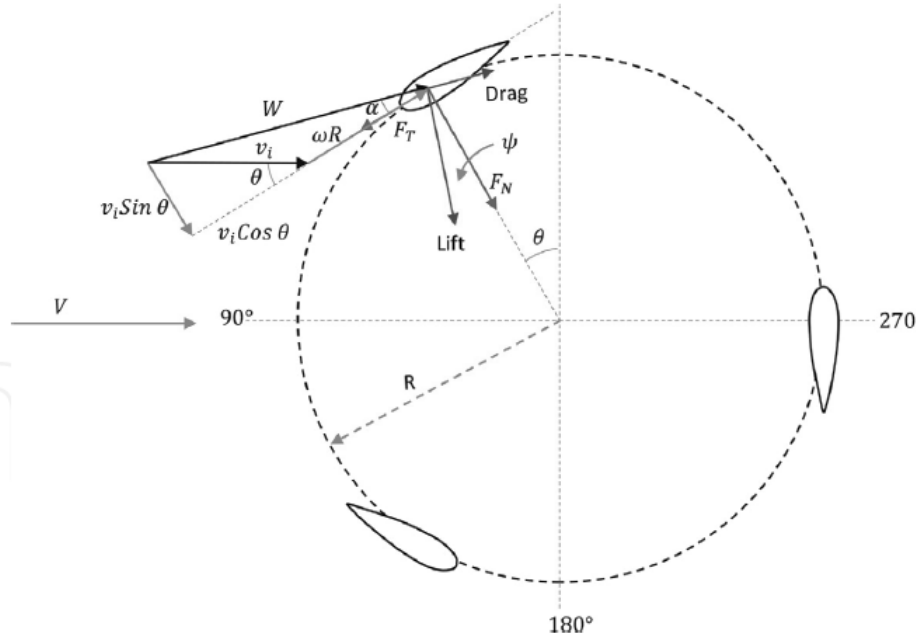


Figura 50. Fuerza sobre el elemento de un alabe en los diferentes cuadrantes [69]

$$w = \sqrt{(v_i \sin(\theta))^2 + (v_i \cos(\theta) + \psi R)^2} \quad (18)$$

Donde (v_i) es la velocidad que atraviesa la turbina; w se puede expresar de manera adimensional usando la velocidad de la corriente libre, en la ecuación 19.

$$\frac{w}{W} = \sqrt{\left(\frac{v_i}{W} \sin(\theta)\right)^2 + \left(\frac{v_i}{W} \cos(\theta) + \frac{\psi R}{W}\right)^2} \quad (19)$$

v_i se puede reescribir en función de a

$$v_i = V(1 - a) \quad (20)$$

Con las ecuaciones (16) y (20), reemplazamos en la ecuación (18) y obtenemos:

$$\frac{w}{W} = \sqrt{\left((1 - a) \sin(\theta)\right)^2 + \left((1 - a) \cos(\theta) + \lambda\right)^2} \quad (21)$$

Adicionalmente de la figura 50 podemos decir que:

$$w = \frac{v_i \sin(\theta)}{\sin(\theta)} \quad (22)$$

$$w = \frac{W(1-a)\sin(\theta)}{\sin(\theta)} \quad (23)$$

El angulo de ataque (α) se puede expresar en funcion de:

$$\tan(\alpha) = \frac{v_i \sin(\theta)}{v_i \cos(\theta) + \psi R} \quad (24)$$

La ecuacion (24) se puede expresar de manera adimensional usando la ecuacion 20:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{(1-a)\sin(\theta)}{(1-a)\cos(\theta) + \lambda} \right) \quad (25)$$

Como se muestra en la ecuacion (25), el angulo de ataque se ve afectado por el angulo azimut (θ), esta variacion de la posicion del alabe produce a su vez una variación en el torque, también se aprecia que a menor número de álabes, la oscilación del torque será mayor como se evidencia en la figura 51.

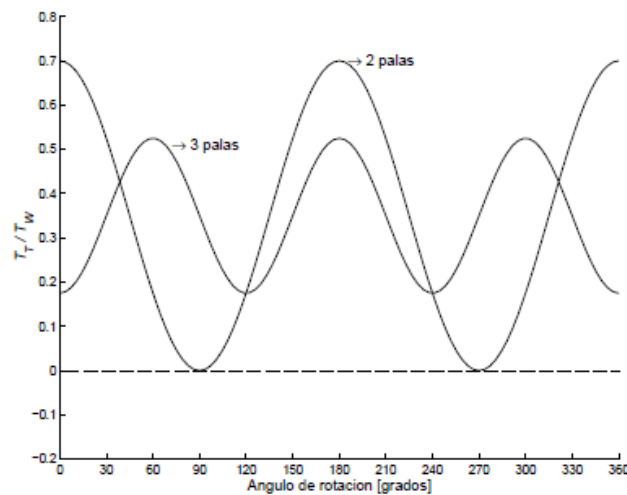


Figura 51. Momento par sobre una turbina de eje vertical en función de la posición angular [66].

La fuerza normal y tangencial del alabe se pueden expresar de la siguiente manera:

$$F_N = \frac{1}{2} \rho \cdot w^2 \cdot H_c (C_L \cos(\alpha) + C_D \sin(\alpha)) \quad (26)$$

$$F_T = \frac{1}{2} \rho \cdot w^2 \cdot H_c (C_L \sin(\alpha) - C_D \cos(\alpha)) \quad (27)$$

Donde (C_L) es el Coeficiente de sustentación y (C_D) es el coeficiente de arrastre; La fuerza de empuje instantánea del aire (I_i) sobre la turbina puede expresarse de la siguiente manera:

$$I_i = F_N \sin(\theta) - F_T \cos(\theta) \quad (28)$$

Las ecuaciones (26) y (27) se reemplazan en (28), obteniendo:

$$I_i = \frac{1}{2} \rho \cdot w^2 \cdot H_c [(C_L \cos(\alpha) + C_D \sin(\alpha)) \sin(\theta) - (C_L \sin(\alpha) - C_D \cos(\alpha)) \cos(\theta)] \quad (29)$$

Es así como de las ecuaciones (15), (21) y (27), (c) puede ser encontrado:

$$c = \frac{8aR \sin^2(\alpha)}{(1-a) \sin^2 \theta (C_D \cos(\alpha - \theta) - C_L \sin(\alpha - \theta))} \quad (30)$$

De acuerdo a la ecuación (28), se pueden dar valores al ángulo azimut (θ) de 0° a 360° , se mantiene el ángulo de ataque (α) fijo en 5° , para garantizar un buen rendimiento aerodinámico, de igual manera para cada perfil aerodinámico, se define un valor de (C_L) y (C_D), el perfil a utilizar en la turbina será NACA 0024 [86], se encontró en la literatura que los valores de coeficiente de sustentación y arrastre para un ángulo de ataque de 5° serán 0.398 y 0.0165 respectivamente, mientras que el valor de factor de inducción axial es de 0.7; el valor de R es de 0.1 [87].

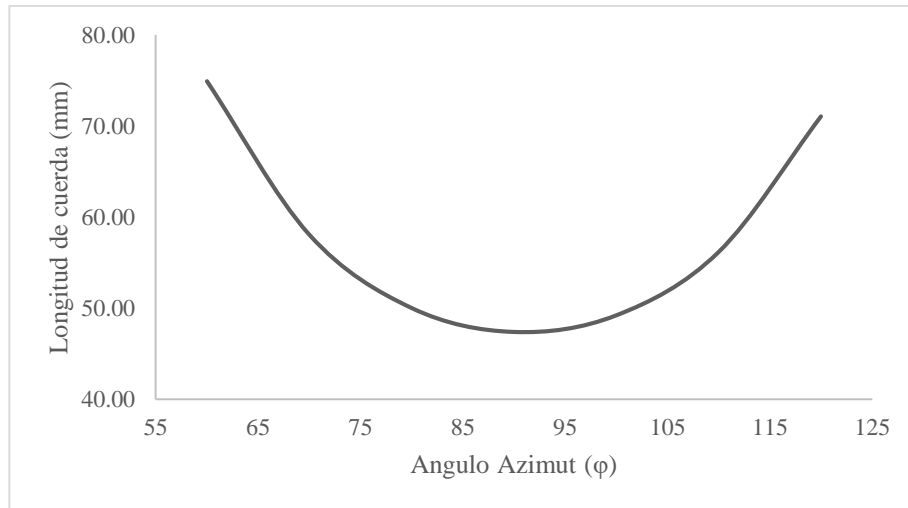


Figura 52. Longitud de cuerda (mm) vs Angulo azimut. fuente: Autor.

Analizando la figura 52, se mostraron solo los valores de ángulo azimut comprendidos entre (60° - 120°), en este rango se obtienen valores significativos de longitud de cuerda. Los rangos por debajo de 50° y superiores a 130° se desprecian puesto que no muestran valores que puedan ser demasiado grandes para la longitud de cuerda. La turbina eólica que se desea elaborar, será diseñada a una escala de laboratorio, para esto debemos tener en cuenta los siguientes parámetros: La densidad del aire $1.2 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$, el área de la turbina, para lo cual se designa la altura del alabe de $0.2 m$ y el radio de la turbina de $0.11 m$.

Para determinar la velocidad promedio del aire en Medellín, ciudad donde será instalada la turbina, se toma como referencia el atlas del viento y energía eólica de Colombia, realizado por la unidad de planeación minero energética (UPME), adscrita al ministerio de minas y energía de Colombia [88], de esta manera el mapa promedio muestra en la región de Antioquia velocidades promedio anuales entre 2 a 3.5 $\frac{m}{s}$, es así como se tomará un valor de 2.5 $\frac{m}{s}$.

El coeficiente de potencia será de 0.25 y la eficiencia en la generación y transformación de la energía será de 0.75, es así como al asumir un valor fijo de (α) , (C_L) y (C_D) los cuales representan el mejor rendimiento de la turbina, se puede obtener un valor de longitud de cuerda $c = 35.96 \text{ mm}$, se obtiene promediando los valores en la figura 52, entre los rangos de Angulo azimut comprendido entre 60-120°, el resumen de estos parámetros se pueden observar en la tabla 24 y el perfil del alabe se puede observar en la figura 53.

PARAMETROS DE DISEÑO TURBINA EOLICA VERTICAL H-DARRIEUS	
Densidad Aire (kg/m³)	1.2
Área Turbina (m²)	0.04
altura del álabe (m)	0.2
Radio de la turbina (m)	0.11
Velocidad estimada del aire (m/s)	2.5
Coefficiente de potencia (Cp)	0.3
Eficiencia mecánica y eléctrica (η)	0.75
Potencia estimada (W)	0.084375
Potencia estimada (mW)	84.375
Velocidad de rotación (rps)	7.5
Velocidad de rotación (rpm)	450
Perfil aerodinámico	NACA 0024
Longitud de cuerda (mm)	35.96

Tabla 24. Parámetros para el diseño de la turbina eólica H-Darrieus con perfil NACA 0024

Las coordenadas no dimensionales para el perfil NACA 0024, se obtienen de Airfoil Tools [86] estas medidas adimensionales se multiplican por la longitud de la cuerda generando el perfil como se puede observar en la figura 53.

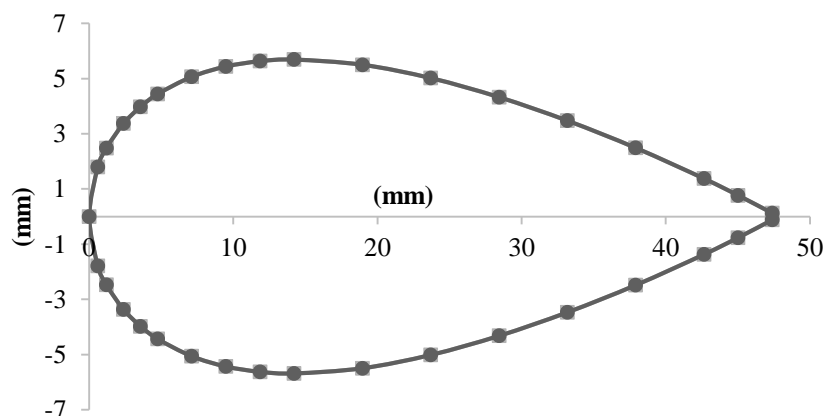


Figura 53. Perfil del alabe con configuración NACA 0024. Fuente: Autor.

De esta manera se obtiene el perfil aerodinámico el cual nos servirá para obtener el diseño de los álabes, tal como se ve en la figura 54a, la cual muestra el álabe con longitud de cuerda de 35.96 mm y una longitud de 210 mm para que pueda ingresar 5 mm a cada disco de soporte. De igual manera se diseñan los discos de soporte de los álabes de 220 mm de diámetro y 5 mm de espesor como se ve en la figura 54b, de igual manera se diseña el eje de 300 mm de largo y 12 mm de diámetro, tal como se ve en la figura 54c, por último, se diseñan los bujes de conexión eje y discos, el cual nos servirá de sujeción entre ambos componentes, como se evidencia en la figura 54d.

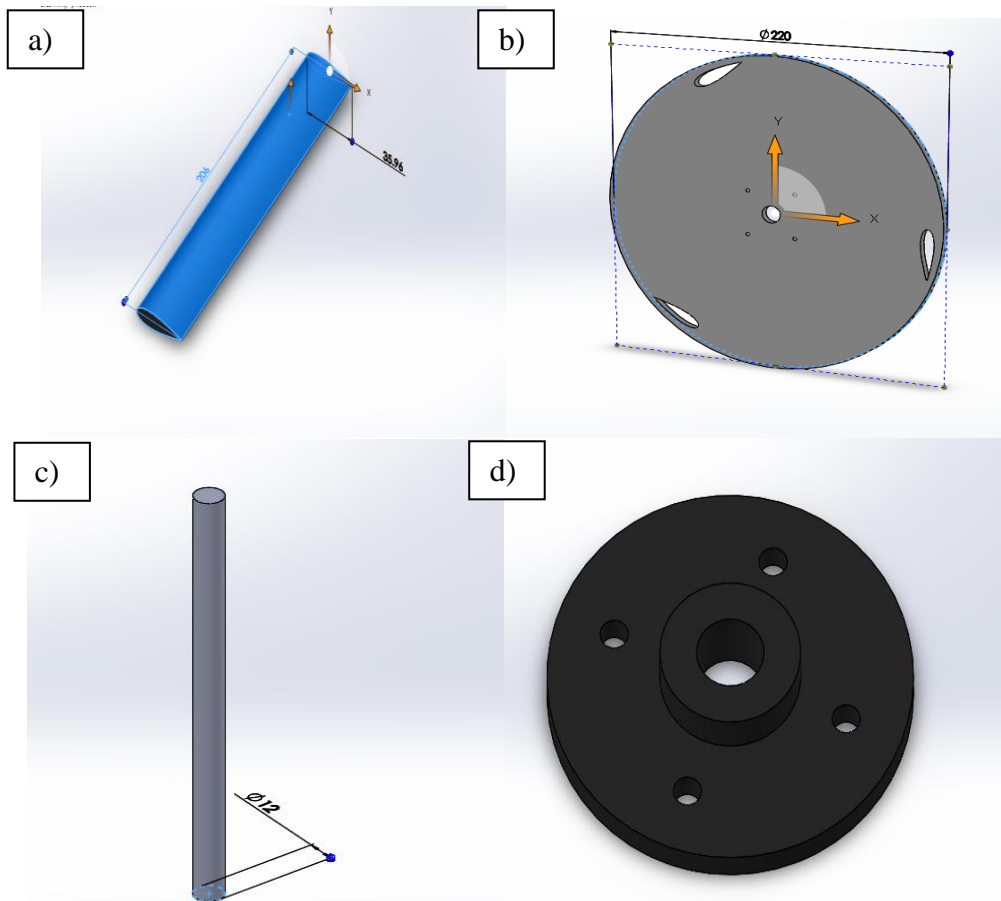


Figura 54. a) Diseño del alabe con configuración NACA 0024 con longitud de cuerda de 35.96 mm y una longitud de 210 mm, b) discos de soporte de los álabes de 220 mm de diámetro y 5 mm de espesor c) eje de 300 mm de largo y 12 mm de diámetro; d) Buje de conexión eje y discos.4, Fuente: Autor.

Por último, vemos en la figura 55, el ensamble de los componentes en el software de diseño CAD.

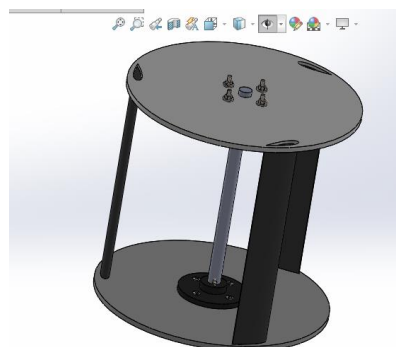


Figura 55. Ensamblaje turbina en software CAD, Fuente: Autor.

Fabricación Turbina eólica H-Darrieus

El proceso de fabricación de los componentes para la turbina, se realizó con la impresora Pegasus MakeR PEGASUS lite, la misma impresora utilizada para la fabricación de las probetas de prueba. Se debe tener en cuenta los siguientes componentes específicamente mencionados los cuales conforman la turbina completa:

- 3 álabes con longitud de cuerda 35.96 mm y 210 mm de altura, con perfil NACA 0024, fabricados en PETG+F.C. en impresora 3D (tiempo de impresión 54 horas)
- 2 discos de 220 mm de diámetro y 5 mm de espesor fabricados en fabricados en PETG+F.C. en impresora 3D, (tiempo de impresión 18 horas)
- 2 bujes de sujeción eje a discos con prisionero fabricados en PETG+F.C. en impresora 3D (tiempo de impresión 8 horas)
- 1 eje de 12 mm diámetro, metálico en acero fabricado en el torno.
- 2 rodamientos 6901 RS
- Estructura soporte en acrílico para banco de turbina eólica.
- Acople de ejes turbina-motorreductor
- MicroMotorreductor Shaft: 6V 1000 RPM, 0,6 kg/cm
- Sensor de torque Futek TRS605 con encoder

Ensamblaje

Una vez obtenemos todos los componentes, se obtiene la turbina eólica tal como se evidencia en la figura 56a, esta turbina debe acoplarse a un banco de pruebas el cual está fabricado en acrílico, este banco nos permitirá acoplarnos a un túnel de viento, en donde se realizará las pruebas de funcionamiento, la turbina ensamblada y lista a ser probada en el túnel de viento se muestra en la figura 56b.

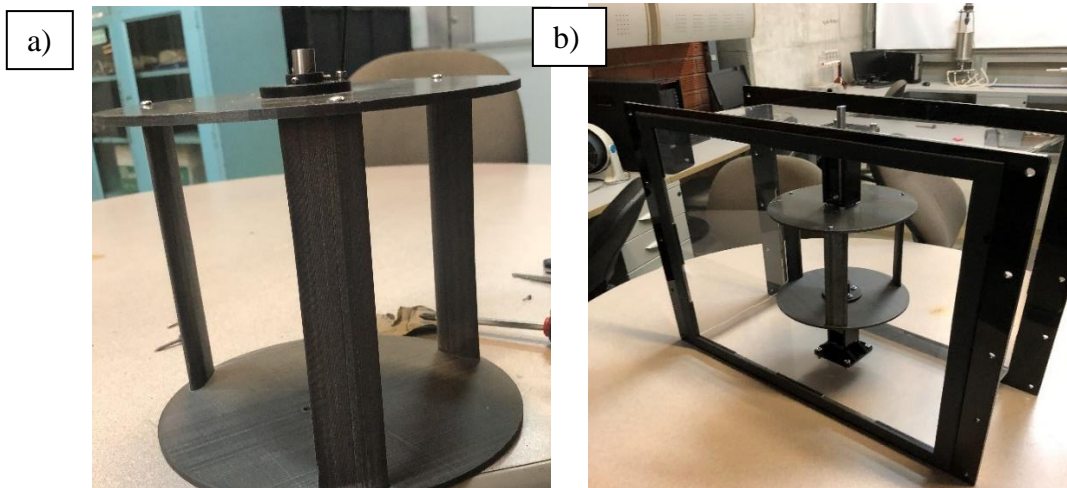


Figura 56. a) turbina ensamblada, b) turbina acoplada al banco de pruebas, Fuente: Autor.

Pruebas de funcionamiento prototipo y Obtención de curva de potencia

Para la realización de las pruebas de la turbina eólica H-Darrieus fue necesario llevar el prototipo a un túnel de viento ubicado en la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, donde se simularon

condiciones de viento reales con el fin de caracterizar la turbina y saber qué condiciones de torque y rotación podría generar con una velocidad de viento de 6 m/s, la articulación del banco de prueba al túnel, el motor ventilador, el ducto de aire y el sensor se puede apreciar en la figura 57.



Figura 57. Turbina H-Darrieus en prueba, en túnel de viento Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Fuente: Autor.

Durante las mediciones de la curva de potencia se empleó el sensor de torque Futek TRS605 con encoder, el sensor estará acoplado al eje del turbina eólica y aún motor con sistema de control que servirá de carga. La captura de datos del sensor se realizó mediante el display IHH500 Pro que se conectó al sensor, los datos obtenidos se visualizan en la figura 58 muestra la variación en el coeficiente de potencia (CP) versus la velocidad específica o periférica (TSR), es así como obtenemos que el coeficiente máximo de potencia generado por la turbina fue de 0.21 equivalente a un 21% de eficiencia, a una velocidad de TSR de 0.12. Sabiendo que el CP máximo que puede obtener una turbina eólica es del 59%, se puede apreciar que la turbina tiene un porcentaje apropiado para el tipo de turbina (vertical) y se sustenta sobre la investigación de P. Beauson, donde se clasifican las turbinas eólicas por coeficientes de potencia de acuerdo a su diseño.

Este tipo de turbinas eólicas verticales tipo Darrieus, presenta un CP normalmente de 0.2 hasta 0.4., si bien estos valores son pequeños en comparación con grandes turbinas eólicas horizontales donde pueden llegar a obtener valores de 0.4 hasta 0.5, sin embargo para el trabajo de investigación realizado a escala de laboratorio, presenta una eficiencia significativa y aceptable, de estos estudios previos pueden surgen nuevas investigaciones las cuales produzcan mejoras al diseño con el fin de mejorar la eficiencia.

En la figura 59 podemos ver la potencia eléctrica generada por la turbina en comparación con la velocidad de rotación de la turbina calculada en RPM, es así como se obtiene que la máxima potencia eléctrica generada fue de 0.52 Watts cuando la velocidad del aire estaba a 6 m/s y el generador giraba a 198 RPM. Adicionalmente se obtiene un modelo matemático de generación eléctrica respecto a la

variable de rotación del generador en RPM, este modelo se ajusta con una probabilidad a favor del 62%.

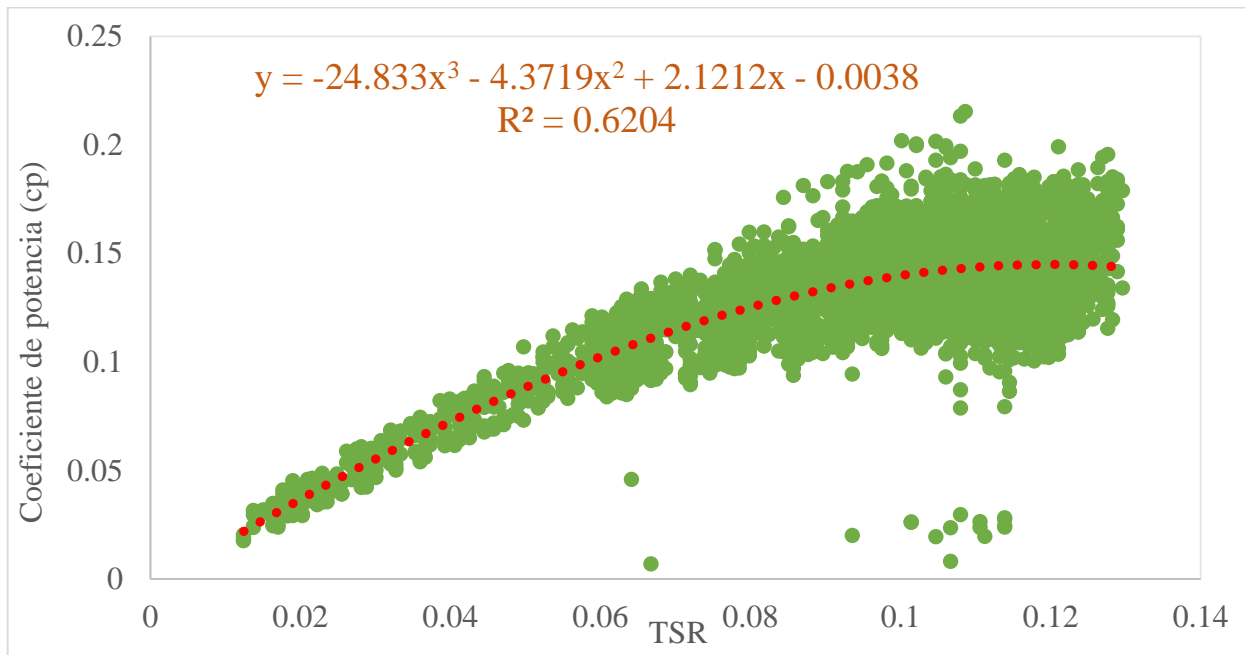


Figura 58. Coeficiente de potencia vs Velocidad TSR para turbina eólica. Fuente: Autor.

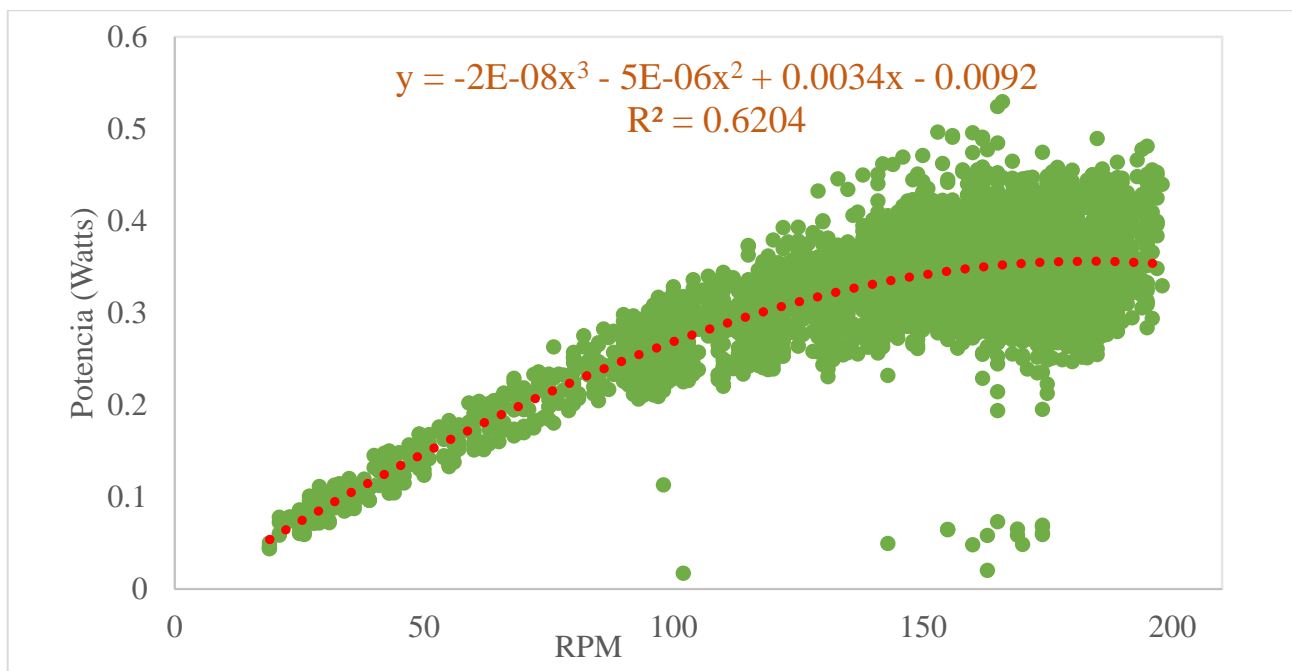


Figura 59. Grafica de potencia vs Velocidad RPM para turbina eólica. Fuente: Autor.

Es importante analizar también los ciclos de variación del torque versus el tiempo, como se logra ver en la figura 60 donde cada segundo se repite un ciclo de variación del torque, en un rango de torque que oscila entre los 14-20 N.mm, esta fluctuación es normal en este tipo de turbinas, por cuestiones del diseño propio, produce que de acuerdo a la posición del alabe, el aire golpea de diferentes maneras

en los diferentes puntos de giro, haciendo que al variar la fuerza del aire sobre la turbina, inmediatamente también varía el torque de la misma.

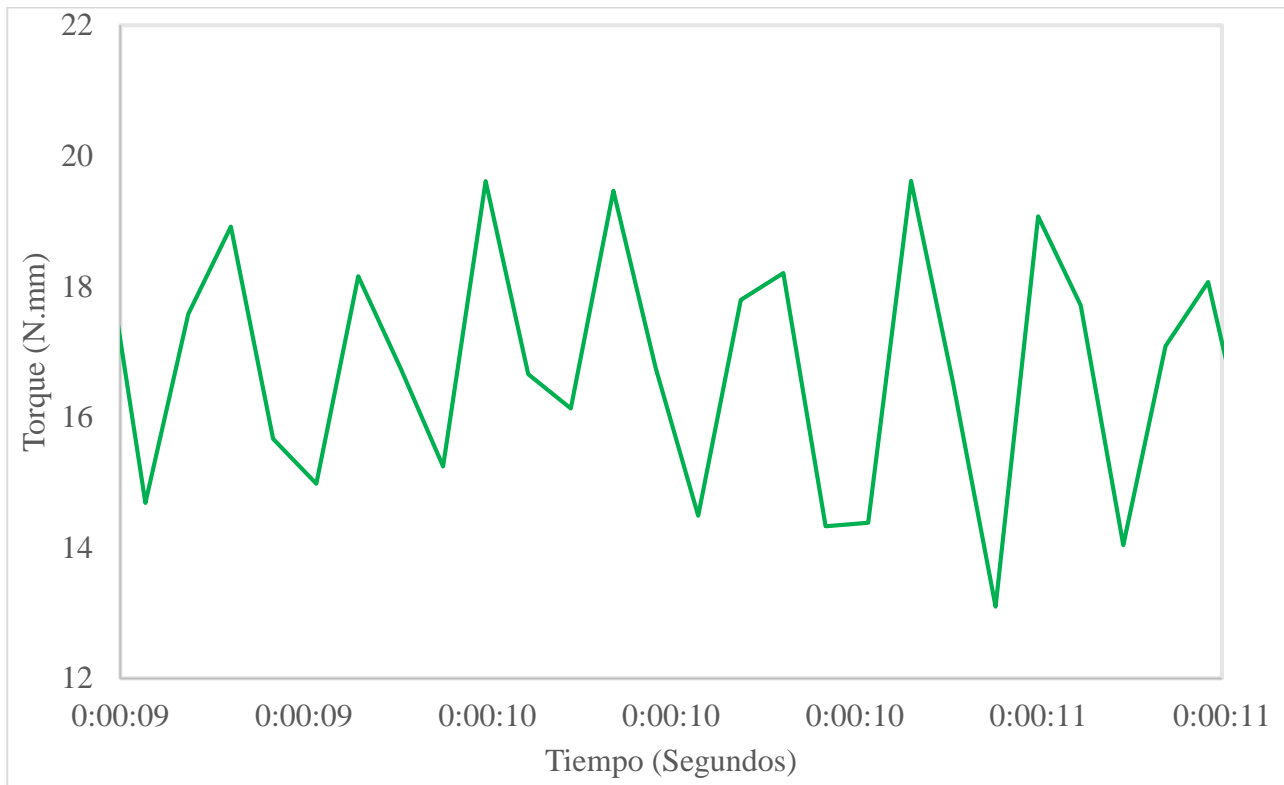


Figura 60. Grafica de torque vs tiempo (segundos) para turbina eólica. Fuente: Autor.

Análisis de ciclo de vida para álabes de turbina eólica a escala de laboratorio

Dentro del enfoque ambiental el cual surge de la necesidad de entender cuál es el impacto que genera un producto, es allí donde surge el concepto del análisis de ciclo de vida (ACV), este considera todos los aspectos desde la extensión y obtención de la materia prima, atravesando por la producción de energía y materia, fabricación, uso, hasta la disposición final. A través de estas etapas es posible identificar en que puntos se podrían generar una carga ambiental considerable [89]. La norma NTC-ISO 14040, determina el procedimiento para llegar al ACV de un producto, pasando por las siguientes etapas como se visualiza en la figura 61:

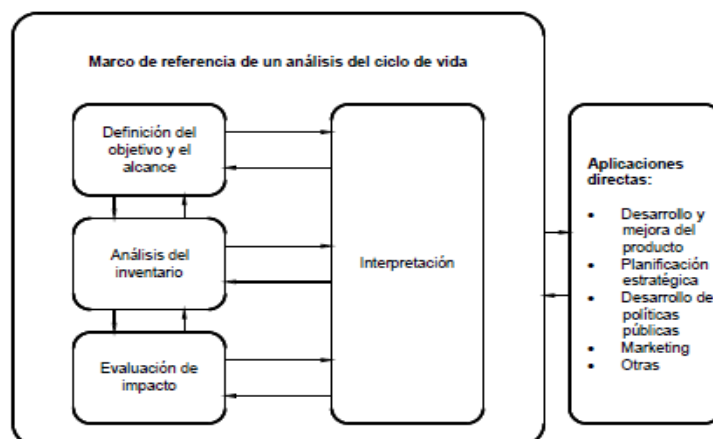


Figura 61. Etapas de un ACV [89]

Una vez identificados los pasos a seguir, procedemos con el ACV para los álabes de la turbina eólica, es así como se plantea:

Definición del objetivo y alcance: Se desea entender el impacto ambiental generado por el uso de materiales termoplásticos compuestos impresos en 3D, para la elaboración de álabes de una turbina eólica h-Darrieus, con el fin de analizar si este material puede llegar a ser menos contaminantes respecto a otros materiales usados para el mismo fin. De esta manera el sector de la energía eólica podría empezar a ver nuevas formas de fabricación de turbinas de manera más limpia para el medio ambiente.

Análisis de inventario: Dentro de esta etapa analizaremos las entradas de energía y materia, los productos obtenidos y los residuos generados durante cada etapa del proceso.

1. Adquisición de materias primas para turbina: El PET o Tereftalato de polietileno es uno de los plásticos más usados para la fabricación de envases plásticos, al adicionar el Glicol en su estructura se obtiene el PET. Del petróleo se extrae el paraxileno, este se oxida con el aire para dar paso al ácido Tereftálico, mientras que el etileno se obtiene de a partir del gas natural, donde es oxidado por el aire para dar paso al etilenglicol. Para la producción de 1 Kg de PETG, se utilizan en promedio 1.9 Kg de crudo de petróleo y se deberá utilizar 23 kWh/kg de energía eléctrica para producir 1 kg de PETG [90]. Para la fabricación de la turbina se requirieron 2 kilogramos de PETG, es por esto que en total se consumieron 46 kWh/kg para la obtención de la materia prima.

En Colombia se maneja un factor de emisión de CO₂ por generación eléctrica equivalente a 164.38 gramos de CO₂ por cada kilovatio hora (kWh) generado [91], de esta manera se concluye que la adquisición de materia prima para la fabricación de los álabes de la turbina, generará 7.56 kg CO₂/kWh.

2. Transporte y distribución del producto: Debido a que el material PETG no se encontraba disponible en la ciudad de Medellín-Colombia, debimos realizar el requerimiento a una empresa de la ciudad de Bogotá-Colombia. En este orden de ideas el producto tuvo que viajar 415 km; en promedio un vehículo podría consumir 9 galones o 34 litros de gasolina para cubrir este recorrido y por cada 45 km podría consumir 1 galón. Según la investigación realizada por la oficina Catalana para el cambio climático, establecieron que 2,38 kg de CO₂/litro es la huella de carbón por cada litro de gasolina consumido [92]. De esta manera se podría concluir que para transportar el material se produjeron 80.92 kg de CO₂/litro.

3. Proceso de fabricación de los álabes: Para el proceso de fabricación se utilizó una impresora 3D, la cual funde el material laminado enroscado y lo inyecta bajo una forma específica. Los tiempos de fabricación para los 3 álabes fueron de 56 horas y se utilizó un total de 144 gr de PETG+F.C.. De acuerdo a las especificaciones técnicas de la impresora Pegasus MakeR, esta tiene una potencia de 280 Wh, de esta manera se podría determinar que el consumo eléctrico fue de 15.68 kWh y el valor de la huella de carbón en este proceso sería de 2.57 kg CO₂/kWh

4. Utilización y mantenimiento: Los álabes fabricados con el PETG+F.C. son ensamblados a la turbina y puesta en funcionamiento donde empezara a generar energía. Se estima un tiempo de operación entre 20 y 30 años, donde la turbina estará generando energía eléctrica del viento y ayudando a mitigar la huella de carbono para la generación eléctrica. Si suponemos que la turbina a escala de laboratorio, trabajara 8 horas diarias produciendo 0.52Wh, entonces en 8 horas podría producir 4.16 Wh, durante un año 1.5 kWh y durante los 30 años 45.5 kW, si pasamos esto a cantidad de CO₂ se obtiene que se estarían dejando de generar 7.48 kg CO₂/kWh al medio ambiente. Por otra parte, durante este tiempo se espera realizar los mantenimientos preventivos periódicos a todos los componentes de la turbina que lo requieran por tiempo o por uso.

5. *Disposición final de los residuos del proceso y producto:* El PETG es un termoplástico amorfo, que puede ser 100% reciclable por lo que es posible que después de cumplir su periodo de tiempo en uso, sea posible dismantelarlo para darle un segundo uso posterior a un tratamiento. Este tratamiento consiste en moler finamente los residuos generados tanto durante la fabricación como durante el dismantelamiento de la turbina. Una vez se obtenga molido el material será posible volverlos a fundir para generar nuevos filamentos, los cuales podrían ser reutilizados para imprimir nuevas piezas.

A continuación, se muestran las entradas y salidas del proceso para el análisis de ciclo vida de los álabes para la turbina eólica H-Darrieus.

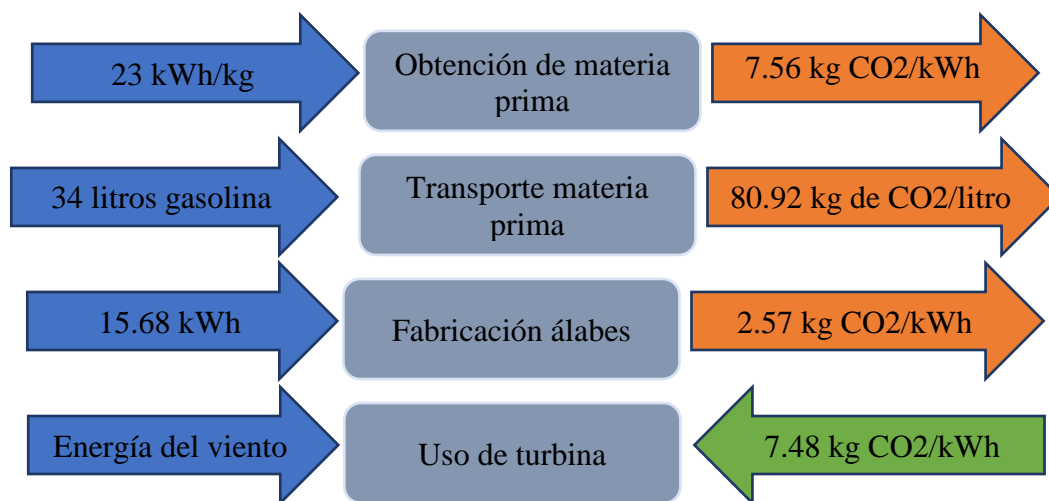


Figura 62. Etapas de ACV para la los álabes de la turbina eólica H-Darrieus. Fuente Autor.

Evaluación del impacto ambiental y análisis de ciclo de vida de ciclo de vida de los álabes para la turbina eólica H-Darrieus: El propósito aquí es poder entender cuáles son los impactos generados por la fabricación de los durante las diferentes etapas del ciclo de vida. Al analizar la primera etapa encontramos que durante la extensión del petróleo y la transformación de los componentes necesarios para la obtención del PETG se generaron 7.56 kg CO₂/kWh por el consumo eléctrico, posteriormente en el proceso de transporte del material se generaron 80.92 kg de CO₂/litro por los litros de gasolina utilizados en el proceso de transporte. El valor es muy alto, debido a que la combustión de la gasolina produce un alto contenido de CO₂ en la atmosfera.

Posteriormente en la etapa de fabricación de los álabes, se generó una huella de carbón de 2.57 kg CO₂/kWh por el consumo eléctrico utilizado por la impresora para el proceso de fabricación y por último el uso de la turbina eólica ayudaría a mitigar 7.48 kg CO₂/kWh, es decir que en total la producción de los álabes para la turbina eólica H-Darrieus, obtuvo una huella de carbono de 83.57 kg CO₂/kWh. Es importante analizar que el mayor impacto ambiental se da por el transporte en gasolina el cual es un foco indiscutible de contaminación. Comprar localmente ayudaría a disminuir este impacto ambiental hasta en un 88% de emisión de CO₂ al ambiente.

Capítulo 5: Análisis de resultados

Análisis de las pruebas mecánicas, térmicas y exposición U.V.

Luego de llevadas a cabo las 6 pruebas incluidas las mecánicas, térmicas y exposición U.V se obtuvieron diferentes datos los cuales serán analizados a continuación:

Análisis pruebas de tensión

Al analizar el comportamiento del PETG+F.C., presenta una resistencia promedio a la tensión de 51 MPa a 230°C, sin embargo, esta resistencia aumenta a medida que va aumentando la temperatura de impresión. A 240°C obtiene una resistencia de 52 MPa y a 250°C obtiene su resistencia máxima de 53 MPa. De otro lado el PETG, presenta una resistencia a la tensión promedio de 37 MPa a los 230°C, a los 240°C aumenta a 41 MPa y a los 250°C, logro obtener una resistencia máxima de 49 MPa. Es posible interpretar que la fibra de carbono, incrustada en el material produce un efecto positivo en la resistencia a la tensión con incrementos de hasta un 8 %.

Mientras tanto el PLA+F.C. presenta una resistencia promedio de 52 MPa a 190°C, sin embargo al aumentar la temperatura de impresión a 210°C y 230°C la resistencia a la tensión disminuye hasta 48 MPa, comportamiento similar al PLA el cual a 190°C, presente una resistencia promedio de 50 MPa a medida que sube la temperatura de impresión a 210°C, se visualiza un leve aumento en la resistencia alrededor de 51 MPa, una vez la temperatura aumenta hasta los 230°C, su resistencia disminuye drásticamente hasta uno 45 MPa.

En conclusión, el PETG y PETG+FC. presentan un aumento significativo en la resistencia a medida que aumenta la temperatura de impresión, llegando a obtener ambos materiales sus resistencias máximas a los 250°C, sin embargo el PETG +F.C. evidencia mejor resistencia, esto se debe a que los filamentos de carbono debidamente alineados e incrustados en el material proporcionarían una mayor estabilidad estructural, tal y como se mostró en el estudio del investigador Fuentes, donde la incidencia de las fibras de carbono ayudaron a aumentar la resistencia a la tensión hasta en un 138% [93]. Para este caso en particular se ve que la resistencia aumento en un 8% respecto al mismo material, pero sin la fibra de carbono (PETG). Mientras tanto los materiales PLA y PLA+F.C. presentaron su mejor resistencia a la tensión a 190°C, al aumentar la temperatura de impresión sus resistencias tienden a disminuir.

Si comparamos los resultados obtenidos en esta investigación, donde el PLA obtuvo rangos entre 45-50 MPa y los comparamos con los datos obtenidos en la investigación realizada por J Albert [41], podemos ver que las resistencias a la tensión obtenidas en dicho estudio oscilan en rangos según el autor entre (10-60) MPa, utilizando como material de impresión el PLA. Es decir, los datos obtenidos se ajustan a las mediciones realizadas en otros estudios.

En cuanto al análisis de errores para esta prueba, se observa una variación mayor en la tensión en las probetas fabricadas con PETG respecto al resto. Esto se debe a que el material muchas veces se atascaba, durante la impresión haciendo que se repitiera en varias ocasiones, la elaboración de las piezas. A pesar que se fabricación de manera aleatoria, el material en sí, presento unas condiciones difíciles a la hora de imprimir, ocasionando que algunas muestras no resultaran tal cual como se esperaban. Mientras que el PETG+F.C. tuvo una variación mínima, se debe a que este material no presento problemas durante la impresión y la fibra de carbono, resulto ser un componente que ayudaba a estabilizar la pieza durante la impresión.

Análisis prueba de flexión

El material PLA fue el mejor en esta prueba, donde a los 190°C, obtuvo una resistencia a la flexión o módulo de ruptura (MOR) de 106 MPa, a los 210°C genero un leve aumento en la resistencia obteniendo 109 MPa, a partir de este punto tuvo una gran caída a los 230°C, disminuyendo su resistencia a los 93 MPa. Por su parte el material PLA+F.C. a las mismas condiciones de impresión a 190°C obtuvo una resistencia promedio a la flexión de 68 MPa, genero su mayor resistencia de 87 MPa cuando fue impresa a los 230°C. En este caso el material sin fibra PLA obtiene un 26% más de resistencia a la flexión respecto al PLA+F.C.

El PETG+F.C. presento una resistencia muy constante en las tres temperaturas de impresión oscilando en un rango de 95 a 98 MPa, obteniendo su máxima resistencia a los 240°C, por último, el PETG sin fibra obtuvo una resistencia promedio a 230°C de 79 MPa, mientras que su resistencia máxima fue 93 MPa a 250°C. Los dos mejores materiales fueron el PLA y el PETG+F.C., con resistencias a la flexión máximas de 109 y 97 MPa correspondientemente. Para este el material con fibra presenta una mejor resistencia hasta en 5% más respecto al material sin fibra PETG.

De la gráfica esfuerzo-deformación figura 38, los materiales PLA y PETG+F.C., generaron una mejor resistencia a la flexión, sin embargo, se interpreta que los materiales PLA y PLA+F.C. inmediatamente llegan a una máximo resistencia, presentan una fractura inmediata; a diferencia del PETG y PETG+F.C. los cuales presentan una ductilidad unitaria significativa lo que permite ver que estos materiales podrían mantener una carga por mucho más tiempo antes de fracturarse. Esto genera una ventaja significa, ya que para la aplicación que estamos investigando requerimos un material que cumpla con buenas condiciones de carga, sin embargo, también deberá tener una buena ductilidad para soportar cargas extremas sin fracturarse.

El módulo de elasticidad es un variable a tener en cuenta, por lo que se evidencia que el material PLA obtuvo un mayor módulo de elasticidad respecto a todos los otros, con un valor de 8303.30 MPa. Si comparamos este resultado con el resultado obtenido por el investigador Jingjing Li [94], donde evaluaron un material compuesto que incluía el PLA, obtuvieron valores que oscilaban entre 2000-5000 MPa, se resuelve que el módulo de elasticidad obtenido por el PLA en las instalaciones de la UDEA, superan hasta en 66%. También se analiza el MOE obtenida por el mismo investigador el cual tiene valores entre 40 y 50 MPA, mientras que esta investigación obtuvo valores de 106 MPa, es decir hasta un 100% de incremento en la resistencia de la flexión.

El análisis de errores para esta prueba, evidencia que se observa una variación mayor en la tensión en las probetas fabricadas con PLA a 230°C, respecto al resto. Esto se debe a que el PLA y el PLA+F.C. a esas temperaturas tan altas de fusión, se afectan sus propiedades mecánicas ya que hay un exceso de temperatura de impresión. Mientras que el PETG y el PETG+F.C. tuvo una variación mínima, se debe a que este material no presento problemas durante la impresión y la fibra de carbono como en el caso anterior, resulto ser un componente que ayudaba a estabilizar la pieza durante la impresión.

Análisis prueba de impacto

De la figura 40, podemos analizar lo siguiente. Para los materiales PETG y PETG+F.C., es claro que a mayor temperatura se obtienen mejores rendimientos a 250°C, donde se obtienen resistencia de $37 \frac{J}{m}$ y $49 \frac{J}{m}$ respectivamente mientras que a 230°C, se obtienen resultados entre $30 \frac{J}{m}$ y $37 \frac{J}{m}$. El PLA y el PLA+F.C. a 190° obtuvieron una mayor resistencia al impacto con valores entre 37 45 - $53 \frac{J}{m}$ y se

ratifica la idea que estos dos materiales impresos a mayores temperaturas mayores, empieza a afectar las propiedades mecánicas negativamente. Al analizar la investigación de F. R. Hidayat [46], donde estudian las propiedades mecánicas de un compuesto termoplástico con fibra de vidrio, donde obtienen valores que oscilan entre 23-35 J/m, valores por debajo en comparación con los obtenidos en esta investigación los cuales tiene un incremento en la resistencia del impacto hasta en un 50%.

La desviación estándar para estas pruebas fue muy alta para todos los materiales. Aunque los materiales PLA y PLA+F.C. obtuvieran la mayor tasa. Es posible que durante la impresión de estas probetas se produjeran variaciones en la fabricación esto debido a que las piezas al tener un tiempo tan alto de fabricación, después de cierto periodo, están iban perdiendo adherencia a la placa base o la capa superior por algún desprendimiento de la capa base. Esto a su vez provoca que las capas no se agrupen adecuadamente y dando paso a una variación de las resistencias al impacto.

Análisis prueba de dureza

La dureza de los materiales es la capacidad del material a dejarse perforar. De esta manera se obtiene que los materiales PLA y PLA+F.C. presentan una mayor dureza respecto a los otros dos materiales, con valores que oscilan entre 71-73 Shore. Mientras que los materiales PETG y PETG+F.C. estuvieron en el rango de 62-69 Shore. Al introducir la investigación de M. Ajay Kumar [95], estos obtienen valores entre 82-84 SHORE para el material PETG de prueba. Al comparar estos resultados con el investigador referencia se nota diferencia del 20% menos de resistencia a la dureza. Sin embargo, los valores se ajustan a los referenciados por lo que se hace valido la obtención de estos datos.

El análisis de errores para este apartado, muestra una variación mínima en las medidas de dureza obtenidas. Esta poca variación puede ser producto del tamaño de las piezas, puesto que eran de un tamaño muy pequeño, por lo que a la hora de fabricar resulto muy sencillo obtener piezas de buena calidad. A medida que se aumenten los tamaños de las piezas a imprimir se requiere de una impresora de mayor tamaño y más robusta para mitigar las afectaciones de la impresión 3D y reducir el factor error al mínimo.

Análisis prueba envejecimiento térmico

Para este análisis se compara la medida de la dureza de todos los materiales a temperatura ambientes versus la dureza de todos los materiales a medida que son expuestos en un horno a 80°C durante 1, 3 y 5 horas; En la tabla 16 se evidencia que durante el periodo de 1 hora de exposición se logra ver en el PLA una disminución del 10% del valor de dureza inicial, este mismo porcentaje de disminución está presente en el PETG, por su parte el PLA + F.C. apenas disminuye un 3% su dureza, muy similar al PETG+F.C. el cual disminuyo en un 4% su dureza.

Para las 5 horas de exposición se logra evidenciar que el material que menos varia su dureza con la exposición térmica es el PLA+F.C. el cual vario en 1% el total de su dureza respecto a la dureza a temperatura ambiente. El segundo material con menos variación fue el PETG+F.C. el cual vario su dureza en 4% respecto a su dureza inicial. En un 6 % y 7 % los materiales PETG y PLA variaron su dureza respectivamente.

Es claro que dentro de la primera hora se producen los mayores cambios estructurales dentro de las piezas fabricadas, afectando negativamente su rendimiento en cuanto a la dureza. Esto se entiende

debido a que la temperatura prolongada dentro de estos materiales impresos, provocan un ablandamiento del mismo, disminuyen su dureza. Los materiales con fibra de vidrio PLA+FC y PETG+F.C. no tienen mucha variación en su dureza, lo que representa un punto a favor de las fibras, permitiendo que la estructura se mantenga a pesar de la alta temperatura expuesta la cual fue de 80°C, esta es la temperatura más caliente que se puede encontrar en la superficie de la tierra. Así que el material seleccionado para los álabes, deberá garantizar que sus propiedades se mantengan a pesar de la exposición constante a la radiación solar, lo cual es muy típico para estos álabes al estar siempre a la intemperie.

Análisis prueba de exposición U.V.

El material PETG+FC. mejora su condición de dureza después de 8 horas de radiación U.V. en un 1.3 %, pasando de 67 Shore D promedio a temperatura ambiente a 68 Shore D. Esto se debe a que durante la exposición U.V. el material es sometido a un curado, internamente las fibras adheridas a la estructura atómica se reorganizan, haciendo que su estructura sea más cristalina y por ende más resistente. Esto mismo sucedió en el estudio de investigación realizado por el investigador Zguris donde analiza el efecto de la radiación U.V. como curado de las impresiones 3D [96]. En ese estudio se demuestra que el curado por medio de la exposición UV a una radiación de 405 nm, ayuda a mejorar condiciones mecánicas de los materiales impresos en 3D.

De igual manera es importante que el material sea dúctil, absorbe energía y no se fractura rápidamente y esto es importante en un material que se encuentra inmerso en condiciones naturales todo el tiempo. Respecto a la resistencia al impacto y la dureza no presenta muy buenas condiciones, sin embargo en la exposición térmica y UV presento muy buena estabilidad. Esto es un factor importante, pues la turbina permanece en el día afectada por el calor del ambiente producto de la radiación solar la cual tiene radiación U.V. por ende el material cumple con los requisitos exigidos para fabricar los álabes de la turbina eólica H-Darrieus.

Capítulo 6: Conclusiones

1. Durante la caracterización de cada uno de los materiales puestos a prueba para seleccionar el mejor material para la fabricación de los álabes de la turbina, se logró evidenciar que el material con mejor rendimiento era el PETG+F.C en comparación con otros materiales PLA, PLA+F.C. Y PETG. Es así como el este material presenta un aumento significativo en la resistencia a la tensión medida que aumenta la temperatura de impresión, llegando a obtener su mayor resistencia a la temperatura de 250°C de fabricación. Los filamentos de carbono que están incrustados en el material y que proporcionarían una mayor estabilidad estructural, ayudan a proveer mayor resistencia a la tensión al PETG. A 250°C la dureza también es la mayor. Por último, este material soporta la radiación ultravioleta sin disminuir sus propiedades y al contrario se evidencia un aumento en la dureza alrededor de 1.3 % en comparación con los otros materiales que al contrario disminuyeron la capacidad de esta propiedad, hasta en 4.8%.

2. El PETG+F.C. como material sustituto podría funcionar bien en proyectos de baja escala, debido a que sus propiedades mecánicas no son mejores que la resina epoxy con fibra de vidrio, para competir con las turbinas a gran escala. Sin embargo, podría ser una buena alternativa para producir turbinas a baja escala con un costo medio-bajo para viviendas o lugares de bajo consumo eléctrico.

3. La turbina eólica a escala de laboratorio, obtiene su máxima potencia eléctrica de 0.52 Watts cuando la velocidad del aire estaba a 6 m/s y el generador giraba a 198 RPM.
4. El coeficiente máximo de potencia fue de 0.21 equivalente a un 21% de eficiencia, a una velocidad de TSR de 0.12. Buscando en la literatura el CP promedio para las turbinas eólicas verticales, se encuentran en un rango del 0.2 y 0.4, sabiendo que la eficiencia mecánica máxima capaz de extraer del aire por un aerogenerador será del 59%, podemos concluir entonces que la turbina generó una eficiencia significativa que se encuentra dentro del rango normal de eficiencia para este tipo de turbinas y más para una turbina a la escala a la cual fue fabricada.
5. La producción de los álabes para la turbina eólica H-Darrieus, obtuvo una huella de carbono de 83.57 kg CO₂/kWh con transporte y de 2.65 kg CO₂/kWh sin incluir el transporte. Es importante analizar que el mayor impacto ambiental se da en el transporte de la materia prima la cual para el estudio. El consumo de gasolina como fuente de energía para poderla movilizar, este proceso dentro del análisis de ciclo de vida genera un foco indiscutible de contaminación. Obtener la materia prima de manera local ayudaría a disminuir este impacto ambiental hasta en un 88% de emisión de CO₂ al ambiente, o utilizar otros medios de transporte que no usen fuentes energéticas derivadas de los hidrocarburos.

Referencias

- [1] G. D. Cordero, EL CAMBIO CLIMÁTICO, Portugal: CIENCIA Y SOCIEDAD Volumen XXXVII, Número 2, 2012.
- [2] N. Unidas, «UN,» UN, 20 05 2022. [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>.
- [3] BBVA, «El reciclaje de los aerogeneradores: asignatura pendiente,» 02 11 2021. [En línea]. Available: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/el-reciclaje-de-los-aerogeneradores-asignatura-pendiente/>.
- [4] REN21, «RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS REPORT,» 08 07 2020. [En línea]. Available: <https://www.ren21.net/gsr-2020/>.
- [5] B. C. J. X. L. & S. N. Ming-Sung Wu, «A recyclable epoxy for composite wind turbine blades,» *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, pp. 114-127, DOI: 10.1080/20550340.2019.1639967, 2019.
- [6] N. C. E. B. Y. Tazi, «Using a hybrid cost-FMEA analysis for wind turbine reliability analysis,» *Energies*, pp. 10 (3), 276, 2017.
- [7] E. O. P.-M. R. S. Y. S. K. M. P. K. S. Z. T. E. P. H. G. S. S. v. S. C. (. IPCC, «Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mit,» IPCC, p. ., 2011.
- [8] European Wind Energy Association, «Research note outline on recycling wind turbine blades,» 2012.
- [9] L. H. a. B. P. Beauson J, Recycling solid residues recovered from glass fibre-reinforced composites – a review applied to wind turbine blade materials., Vols. %1 de %21542–1556, 33:, .: J Reinf Plast Compos, 2014.
- [10] J. P. Jensen y K. Skelton, «Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, p. 165–176.
- [11] A. Ding, S. Li y j. Wang, «A new analytical solution considering three dimensional effects on spring-in of curved composite parts,» *Compos Sci Technol*, 2017, p. 142: 30–40.
- [12] S. Pimenta y S. Pinho , «Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: technology review and market outlook,» *Waste Manage*, 2011, p. 31: 378–392.
- [13] N. A. Shuaib y P. T. Mativenga, «Energy demand in mechanical recycling of glass fibre reinforced thermoset plastic composites,» *J Clean Prod*, 2016, p. 120:198–206..
- [14] J. Walker y N. Jenkins, *Wind Energy Technology*, John Wiley and sons, Ltd., 1997.
- [15] A. Clarke, «Wind Energy: Progress and Potential",» *Renewable series-Wind*, 1991.
- [16] H. Battista, «CONTROL DE LA CALIDAD DE POTENCIA EN SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA,» Universidad Nacional de La Plata, Argentina, 2000.
- [17] REN21, RENEWABLES 2022 GLOBAL STATUS REPORT, https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf, 2022.
- [18] Ember, «Global Electricity Review 2022,» 30 March 2022 . [En línea]. Available: <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2022/>.
- [19] w. p. monthly, «EDF and Masdar deliver first power from Saudi Arabia’s first wind farm,» 9 August 2021. [En línea]. Available: <https://www.windpowermonthly.com/article/1724278/>.
- [20] «Since 2014 based on data from previous editions of REN21,» top 10 for cumulative capacity in 2021 based, [En línea]. Available: <https://www.ren21.net/reports/>.
- [21] Council Global Wind Energy, «Global Wind Report,» 17 Junio 2015. [En línea]. Available: http://www.gwec.net/wpcontent/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf.
- [22] NEA, «National Energy Administration Releases 2021 National Power Industry Statistics,» January 26,2022. [En línea]. Available: http://www.nea.gov.cn/2022-01/26/c_1310441589.htm.
- [23] WindDaily, «Mingyang Intelligent Offshore Wind Turbine, the First Show in Europe,» 2022. [En línea]. Available: <https://mp.weixin.qq.com/s/vexl2K581-rcM--r9eVOrQ>.
- [24] Windpower, «Windey becomes one of China’s top three turbine makers in 2021 – BloombergNEF,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.windpowermonthly.com/article/1749415/windey-becomes-one-chinas-top-three-turbine-makers-2021-%E2%80%93-bloombergnef>.
- [25] L. Mishnaevsky, K. Branner y H. N. Petersen, «Materials for wind turbine blades: an overview’,» *Materials*, 2017, p. 10:1285.
- [26] Institute for energy research, 2016. [En línea]. Available: <http://instituteforenergyresearch.org/topics/encyclopedia/renewable-energy/#>.
- [27] ACP, «The United States added 12,747 MW for a total of 134,996 MW,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.eia.gov/electricity/>.
- [28] A. Fine, «Wind Energy Production Increased by 11 Percent in 2021,» north american windpower, 2022. [En línea]. Available: <https://nawindpower.com/wind-energy-production-increased-by-11-percent-in-2021-research-institute-discovers>.
- [29] Komusanac, «Down from 60.6% based on data for top five countries in 2020 (Netherlands, Spain, Germany, Norway and France),which together added 8,199 MW (gross) and total additions in Europe of 13,526 MW,» p. 65, 2022.

- [30] I. & Komusanac, «The EU added 11,035 MW (10,038 MW onshore and 997 MW offshore) for a total of 188,883 MW (173,295 MW onshore and 15,588 MW offshore),» p. 11, 2022.
- [31] WindEurope, «note 31,» p. 12, 2022.
- [32] G. d. india, «Power Sector at a Glance ALL INDIA,» 2022. [En línea]. Available: <https://powermin.gov.in/en/content/power-sector-glance-all-india>.
- [33] M. Ramesh, Ultra-low tariffs are cited as the prime reason , 2022. [En línea]. Available: <https://www-thehindubusinessline-com.cdn.ampproject.org/c/s/www.thehindubusinessline.com/companies/why-wind-developers-are-surrendering-capacities-won-in-auctions/article65370151.ece/amp>.
- [34] R. Stewart , «Wind turbine blade production - new products keep pace as scale increases.,» *Reinf Plast*, 2012, p. 56(1):18–25..
- [35] T. M. .. S. M. .. M. H. R. Willy Tjiu, «Darrieus vertical axis wind turbine for power generation II: Challenges,» *Renewable Energy*, pp. 560-571, 2015.
- [36] ECRC, ECRC Services company, <www.ecrc-greenlabel.org, 2010.
- [37] G. Marsh, Reclaiming value from post-use carbon composite. *Reinf. Plast.*, 2008.
- [38] JCMA, The Japan Carbon Fiber Manufacturers Association., Official website at:<https://www.carbonfiber.gr.jp/>, 2006.
- [39] G. Marsh, Carbon recycling: a soluble problem., 2009.
- [40] M. S. K. K. H. Nakagawa, Characterization of CFRP using recovered carbon fibers from waste CFRP., Georgia-USA, 2009.
- [41] e. a. Albert J, «3D printed rotor blades for a research wind turbine: Aerodynamic and structural design and testing,» *Journal of Physics: Conference Series*, n° doi:10.1088/1742-6596/2265/4/042070, pp. 1-12, 2022.
- [42] BIGREP, «<https://bigrep.com/filaments/>,» 2022.
- [43] S. A. N. U. O. D. S. R. a. T. A. G. Kuznetsov V E, «Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process Polymers 10,» 2018.
- [44] E. A. M. A. F. H. A. e. E. F. N. D. Hilewit, «Power coefficient measurements of a novel vertical axis wind turbine,» *Energy Science & Engineering* , vol. Vol. 7, n° 2373-2382, p. 6 p. , 2019.
- [45] R. C. O. C. M. G. Paul Bere, «Design and Manufacturing Method of GFRP Blades for Vertical Axis Wind Turbine,» *World Symposium on Mechanical-Materials Engineering & Science (WMMES 2021)*, n° doi:10.1088/1757-899X/1190/1/012022, 2021.
- [46] M. A. S. & F. R. Hidayat, «Vertical Blade Fiberglass Composite for Wind Turbine Power Plant Application,» *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. Volume 2, n° DOI: 10.18196/jrc.2369, 3, May 2021.
- [47] L. Mishnaevsky, K. Branner, H. Petersen, J. Beauson, M. McGugan y B. Sørensen, «Materials for wind turbine blades,» *Materials* 2017, 10, 1285..
- [48] L. Kehrer, J. Wood y T. Böhlke, «Mean-field homogenization of thermoelastic material properties of a long fiber-reinforced thermoset and experimental investigation,» *J. Compos. Mater.* 2020, 54, 3777–3799.
- [49] W. G. L. A. G. T. C. A. C. J. Thiago Henrique Lara Pinto, «Experimental and Numerical Comparison of Impact Behavior between Thermoplastic and Thermoset Composite for Wind Turbine Blades,» *materials*, Vols. %1 de %2<https://www.mdpi.com/1996-1944/14/21/6377>, pp. 14., 2021.
- [50] O. A. E. B. L. & B. N. Rifaie-Graham, «Self-reporting fiber-reinforced composites that mimic the ability of biological materials to sense and report damage,» *Advanced Material*, pp. 30, e1705483. <https://doi.org/10.1002/adma.201705483>., 2018.
- [51] R. A. T. S. a. S. B. N. Karthikeyan, «Materials, Innovations and Future Research Opportunities on Wind Turbine Blades—Insight Review,» *Wiley Online Library*, p. (wileyonlinelibrary.com). DOI 10.1002/ep.13046, 2018.
- [52] K. & E. A. Cox, «Effects of composite fiber orientation on wind turbine blade buckling resistance,» *Wind energy*, pp. 17, 1925–1943. <https://doi.org/10.1002/we.1681>., 2014.
- [53] «Materials for wind turbine blades: An overview, Mater (Basel, Switzerland),» 2017. [En línea]. Available: 10, 1285–1309. <https://doi.org/10.3390/ma10111285>.
- [54] B. M. Rodríguez, «ESTUDIO SOBRE LA OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FABRICACIÓN EN UNA IMPRESORA 3D CON TECNOLOGÍA FDM,» *Escuela de ingeniería de Barcelona*, vol. 1, n° https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/106056/TFG_Volumen%20I_Memoria.pdf, pp. 1-95, 2017.
- [55] ASTM D638 – 14, «Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics,» 2015.
- [56] «PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ÁLABES DE AEROGENERADORES DE RESINA EPÓXICA Y NANOCELULOSA,» *ResearchGate*, vol. <https://www.researchgate.net/publication/34828100>, 2021.
- [57] ASTM D790 – 17, «Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials,» 2017.

- [58 «Mortalidad incidental de aves paseriformes en un parque eólico.» *Huitzil*, vol. doi: <https://doi.org/10.28947/hrmo.2019.20.1.377>,
] 2018.
- [59 ASTM D4329 – 13, «Standard Practice for Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus Exposure of Plastics,» 2013.
]
- [60 «AEROGENERADORES ENERCON,» *TECNOLOGÍA Y SERVICE*, vol.
] <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/8668/5/Tecnolog%C3%ADa%20ENERCON.pdf>.
- [61 ASTM D3045 – 18, «Standard Practice for Heat Aging of Plastics Without Load,» 2018.
]
- [62 July Taborda, «Estudio comparativo de las propiedades mecánicas de la resina poliéster reforzada con fibra de bambú, como material sustituto de la fibra de vidrio,» *DYNA*, n° <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n202.57334> , 2017.
- [63 T. S. Ząbrowo, «RESINA EPOXI,» n° http://www.sea-line.eu/wp-content/uploads/2017/01/TDS_resin_epoxy_espanol.pdf.
]
- [64 Nazza, «RESINA EPOXI ESTRATIFICADOS,» n°
] <https://www.nazza.es/img/cms/documentos%20PDF/Fichas%20T%C3%A9cnicas/FT%20-%20Resina%20epoxi%20Estratificados%20NAZZA.pdf>, 2022.
- [65 R. Prado, teoría del disco actuador rotante – fuente puntual para turbinas eólicas de eje horizontal, avances en energías renovables y medio ambiente, Buenos Aires: Issn 0329-5184., 2004.
- [66 U. d. l. plata, Control de la calidad de potencia en sistemas de conversión de energía eólica, Buenos Aires: Universidad de la plata,
] 2000.
- [67 S. d. a. M. o. G.t. houlshy, «application of linear momentum actuator disc theory to open channel flow,» *university of oxford*, vol. .., n° .., p. 2296/08., 2008.
- [68 e. a. W. r. hawthorne, actuator disc theory of the incompressible flow in axial compressors, university, cambridg: thermodynamics and fluid mechanics group, vol i76 ko 30, 1962.
- [69 E. & R. A. Lenin, «Computational Fluid Dynamic Simulation of Vertical Axis Hydrokinetic Turbines,» *Intechopen-Web of Science*, vol. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.89184>., n° .., p. .., 2019.
- [70 L. W. Dai YM, Numerical study of straight-bladed Darrieus-type tidal turbine., : Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Energy 162: 6776, 2009.
- [71 V. R, Exceeding the Betz limit with tidal turbines., : Renewable Energy. 2013;55:277-285, ..
]
- [72 R. A. Ragheb M, Wind turbines theory-the Betz equation and optimal rotor tip speed ratio, : Fundamental and Advanced Topics in Wind Power.(1):19-38, 2011.
- [73 Gunt, Conocimientos básicos de turbinas eólicas, (114-115): https://www.gunt.de/images/download/wind-turbines_spanish.pdf,
] 2021.
- [74 W. M. F. M. t. J. Pulfer, Energy efficiency assessment of four designs of vertical axis and drag differential wind turbines., Simposio internacional sobre calidad de la energía eléctrica 2017: .., 2017.
- [75 D. Canalejo, Generador eolico para uso doméstico. Escuela universitaria politécnica de mataró, : (1-57)., 2011.
]
- [76 T. Yepes, Evaluación del coeficiente de potencia de una turbina tipo savonius mediante dos programas de simulación computacional., universidad santo tomás división de ingenierías facultad de ingeniería mecánica división de ingenierías Bogotá d.c.: .., 2020.
- [77 C. R. D.-K. Ahmadi-Baloutaki M, Straight-bladed vertical axis wind turbine rotor design guide based on aerodynamic performance and loading analysis, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy;228(7):742759: .., 2014.
- [78 F. e. A. Bergoglio, Tracking of power curves of a vertical axis wind turbine with variable Geometry., *Av. cien. ing.*: 8(3), 13-20: ..,
] 2017.
- [79 B. Resor, Effects of Increasing Tip Speed on Wind Turbine Rotor Design., Sandia National Laboratories Wind Energy Technologies Department.: .., 2015.
- [80 J. Escalera, Estudio aerodinámico de un aerogenerador mediante teoría BEM (Blade Element Momentum), Universidad de Cataluña. (101):. Escuela técnica superior de ingeniería, , 2014.
- [81 E. Milla, El sistema eólico. Diseño aerodinámico, Escuela de negocios, : Master en energías renovables y mercado energético 2007-2008 (36)., 2008.
- [82 S. R. J. S. Jeremy Ledoux, Analysis of the Blade Element Momentum Theory. hal-02550763, .., 2020.
]
- [83 F. Mahmuddin, Rotor Blade Performance Analysis with Blade Element Momentum Theory, The 8th International Conference on Applied Energy: ICAE2016. Energy Procedia 105 (2017) 1123 – 1129., 2017.
- [84 G. H., Airplane Propellers. In: Durand WF., editor. Aerodynamic Theory, Berlin: : Julius Springer; 1935, p. 169–360, 1935.
]
- [85 C. O, Aerodynamic Design and Optimization of Horizontal Axis Wind Turbines by Using BEM Theory and Genetic Algorithm. Ankara:, Middle East Technical University: .., 2008.

- [86 A. Tools, (NACA 0024 airfoil), .: ., <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0024-il>.
]
- [87 S. I. P. I. B. & D. R. D. Donelli, Suction optimization on thick airfoil to trap vórtices. Physics and Fluids Unit, Centro Italiano Ricerche Aerospaziali (CIRA), Via Maiorise, snc, 81043 Capua (CE), Italy. Conference paper (11): ., 2009.
]
- [88 UPME., Atlas del viento y energía eólica de Colombia, Ministerio de minas y energía, capítulo 1 (19-33): ., 2017.
]
- [89 ICONTEC, NTC ISO 14040, Bogotá: Icontec, 2007.
]
- [90 VEST, «Tesis capítulo 4 análisis literario,» 2003. [En línea]. Available: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22896/Capitulo4.pdf>.
]
- [91 L. republica, «En Colombia el factor de emisión de CO2 por generación eléctrica es de 164,38 gramos por kWh,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.larepublica.co/especiales/colombia-potencia-energetica/en-colombia-el-factor-de-emision-de-co2-por-generacion-electrica-es-de-16438-gramos-por-kwh-2966236>.
]
- [92 o. c. d. c. climatic, «GUÍA PRÁCTICA PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO,» 2011. [En línea]. Available: <https://www.caib.es/sacmicrofront/archivopub.do?ctrl=MCRST234ZI97531&id=97531>.
]
- [93 J. M. F. Fuentes, Estudio y diseño de materiales de impresión 3D que soporten los sistemas de esterilización, Valencia: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, 2021.
]
- [94 J. L. e. al, «Excellent rheological performance and impact toughness of cellulose nanofibers/PLA/ionomer composite,» n° DOI: 10.1039/C7RA04302C, 2017.
]
- [95 M. A. K. M. K. a. S. Mishra, «Effect of machine parameters on strength and hardness of FDM printed carbon fiber reinforced PETG thermoplastics,» *Materials Today: Proceedings*, vol. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.291>, 2020.
]
- [96 Z. Zguris, Cómo se ven Afectadas las Propiedades Mecánicas de Impresiones 3D de Esteriolitografía mediante la Curación UV, LIBRO BLANCO DE FORMLABS, 2021.
]
- [97 L. Brown, J. Larsen y M. Roney, «La gran transición: De los combustibles fósiles a la energía solar y eólica,» Bogotá, ECOE EDICIONES, 2015, p. 8 – 22.
]
- [98 Asociación Americana de la Energía Eólica, «El periodismo de las energías limpias. Estados Unidos supera los 70.000 megavatios de potencia eólica.,» 11 Enero 2016. [En línea]. Available: <http://www.energias-renovables.com/articulo/estados-unidos-superalos-70-000-megavatios-20160111>.
]
- [99 Revista eólica y del vehículo eléctrico, «Alemania logra récord de producción con renovables,» 9 Junio 2016. [En línea]. Available: <http://www.evwind.com/2016/07/09/alemania-alcanzo-record-de-generacion-de-energiasrenovables/>.
]
- [10 Resource recycling inc, «Resource recycling inc,» PLASTICS RECYCLING UPDATE, 2019.
0]
- [10 The european wind energy association, «Wind power 2015 european statistics.,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA-Annual-Statistics-2015.pdf>.
1]
- [10 Resource Recycling inc, 2019. [En línea]. Available: <https://resource-recycling.com/plastics/2019/03/27/company-expands-wind-turbine-recycling-operation/>.
2]
- [10 P. Hyunbum, «A study on structural design and analysis of small wind turbine blade with natural fibre(flax) composite,» *Advanced Composite Materials*, pp. 25:2, 125-142,, 2016.
3]
- [10 D. Prabhakaran, «Are Reactive Thermoplastic Polymers Suitable for Future Wind Turbine Composite Materials Blades?,» *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, pp. 213-221, 2014.
4]
- [10 D. Escanez, «Diseño y fabricación de los alabes de un micro-aerogenerador de baja potencia,» *Universidad de cataluña*, 2013.
5]
- [10 J. Garate y S. Solovitz, «Fabrication and Performance of Segmented Thermoplastic Composite Wind Turbine Blades,» *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-GREEN TECHNOLOGY*, pp. Vol. 5, No. 2, pp. 271-277, 2018.
6]
- [10 ASTM D256 – 10, «Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics,» 2018.
7]
- [10 ASTM D785 – 08, «Rockwell Hardness of Plastics and Electrical Insulating Materials,» 2015.
8]
- [10 Facultad de ing, «Definición de Análisis del Ciclo de Vida,» 2017.
9]
- [11 S. P. a. R. Phillips, «Rapid Prototyping of Small Wind Turbine Blades Using Additive Manufacturing,» *Pattern Recognition Association of South Africa and Robotics and Mechatronics International Conference*, pp. 189-195. , 2015.
0]
- [11 I. i. consulting, «<https://www.infinitiaresearch.com/noticias/termoestables-y-termoplasticos-definicion-y-diferencias/>,» 2022.
1]
- [11 R. e. renovables, «China ha instalado en 2020 más potencia eólica que Europa, América, África y Oceanía juntas,» 23 05 2022. [En línea]. Available: <https://www.energias-renovables.com/eolica/china-ha-instalado-en-2020-mas-potencia-20210319>.
2]
- [11 V. Networks, «Estados Unidos instaló energía eólica por encima de cualquier otra fuente en 2020,» 05 09 2021. [En línea]. Available: <https://velatianetworks.com/estados-unidos-instalo-energia-eolica-por-encima-de-cualquier-otra-fuente-en-2020/>.
3]

- [11 D. M. f. minds, «Alemania promete "gigantesco" esfuerzo en pro de la energía limpia,» 01 11 2022. [En línea]. Available: 4] <https://www.dw.com/es/alemania-promete-gigantesco-esfuerzo-en-pro-de-la-energ%C3%ADa-limpia/a-60392038>.
- [11 C. P. J. J. L. y. G. L. Vargas, CONSUMOS DE ENERGÍA EN LA INDUSTRIA DEL PLÁSTICO: REVISIÓN DE ESTUDIOS 5] REALIZADOS, Medellín: Revista CEA, ISSN 2390-0725, Vol. 1 - No. 1, enero - junio de 2015 pp. 93-107, 2015.
- [11 N. Hernandez, «Cuanta energía (electricidad) se requiere para producir un barril de petróleo y un litro de gasolina?,» 2011. [En 6] línea]. Available: https://gerenciayenergia.blogspot.com/2011/04/normal-0-21-false-false-false_19.html.
- [11 IRENA, «International Renewable Energy Agency,» 18 07 2022. [En línea]. Available: [https://www.irena.org/-7\] /media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Renewable_energy_highlights_July_2022.pdf?la=en&hash=F3180CE10D7EEB3409165D168ED6E4F494D58AB5](https://www.irena.org/-7] /media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Renewable_energy_highlights_July_2022.pdf?la=en&hash=F3180CE10D7EEB3409165D168ED6E4F494D58AB5).
- [11 GWEC, Global Wind Report 2022, op. cit. note 1, p. 106.[https://www.ren21.net/wp-8\] content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-8] content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf), April 4, 2022.