



**Desarrollo de materiales biocompuestos a partir de fibras naturales colombianas para la fabricación de un prototipo de álabe de un aerogenerador de bajas velocidades de viento**

Jonathan Javier Pabón Rojas

Trabajo de investigación presentado para optar al título de Magíster en Ingeniería Mecánica

Tutores

Daniel Estiben Ramírez Zora, Doctor (PhD) en ingeniería de materiales

Bladimir Azdrubal Ramón Valencia, Doctor (PhD) en ingeniería de materiales

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería Mecánica

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	Pabón Rojas [1]
<b>Referencia</b>	[1] J. J. Pabón Rojas, “Desarrollo de materiales biocompuestos a partir de fibras naturales colombianas para la fabricación de un prototipo de álabe de un aerogenerador de bajas velocidades de viento”, Tesis de maestría, Maestría en Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.
Estilo IEEE (2020)	



Maestría en Ingeniería Mecánica, Cohorte VI.

Grupo de Investigación Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales (CIDEMAT).

Sede de Investigación Universitaria (SIU).

Se agradece el apoyo financiero brindado por el Programa Científico Colombia en el marco de la convocatoria Ecosistema Científico (Contrato No. FP44842-218-2018).



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

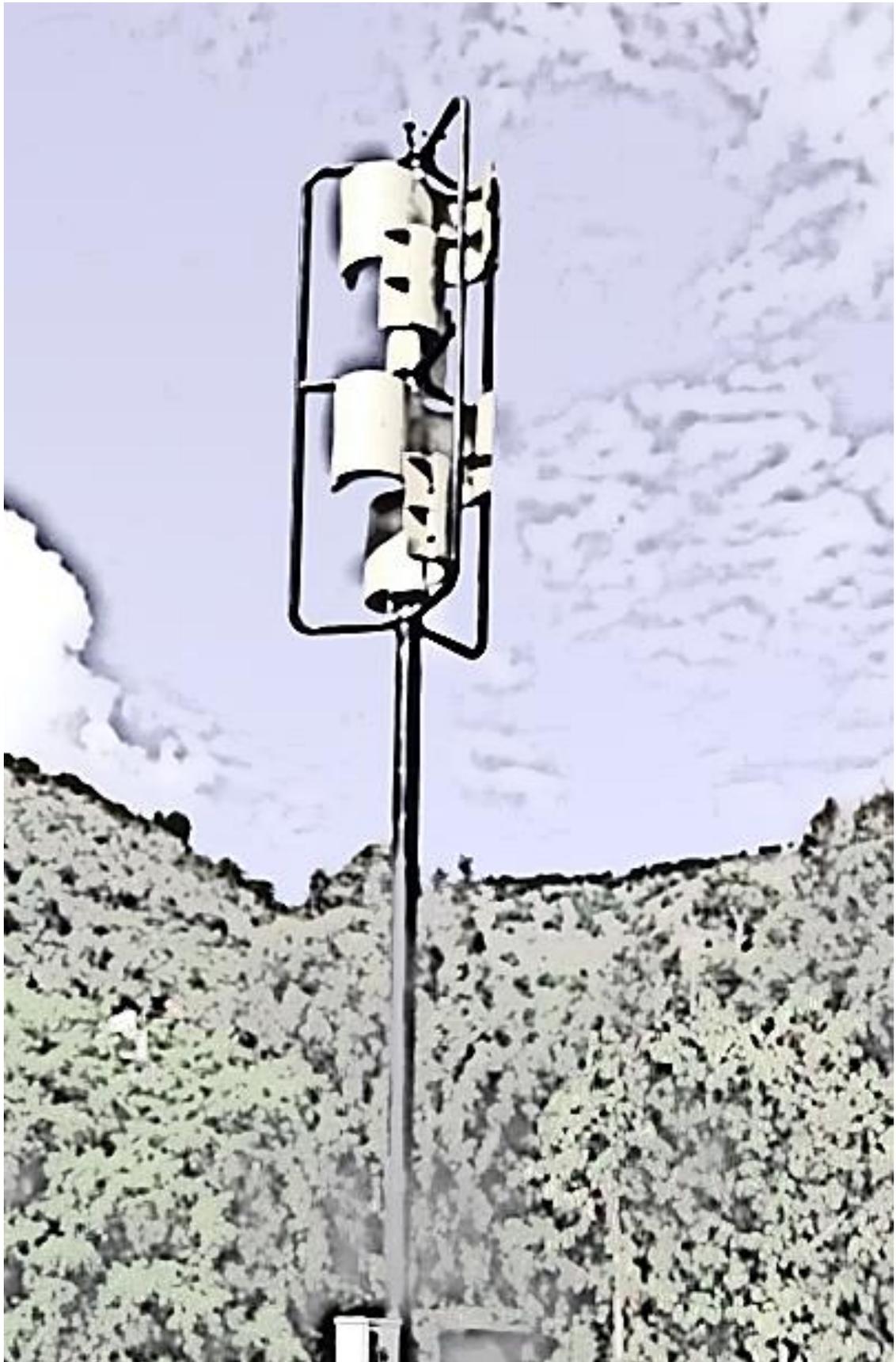
Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboledas Esteves.

**Decano:** Jesús Francisco Vargas Bonilla.

**Jefe departamento:** Edwin Lenin Chica

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.



## AGRADECIMIENTOS

Dios primero...

A lo largo de esta etapa de formación en este posgrado, se involucraron muchas personas que recién conozco y otras muy allegadas que siempre han estado en cada proyecto que me propongo, todos ellos han marcado de manera positiva esta trayectoria y mi vida personal. Siendo muy resumido en mostrar el aprecio que les tengo, quiero plasmar un especial agradecimiento a:

Mi madre, mi esposa, mi hermano y mi hija por su entero apoyo y motivación en todo momento sin dejar a un lado el infinito cariño que me manifiestan.

Los directores de la presente investigación doctores Daniel Ramírez, Francisco Bolívar y Bladimir Ramón que con su entera disposición y apoyo guiaron este ciclo de formación.

A mis amigos, compañeros y demás personas conocidas en esta etapa por el tiempo y vivencias compartidas tanto en lo académico como en lo social.

Al *Programa Colombia científica* como fuente de financiación, en el marco de las convocatorias *Ecosistema científico*, contrato No. FP44842- 218-2018.

## TRABAJOS RELIZADOS

Participación en congreso, **“Materiales biocompuestos con fibras naturales y resina bioepoxy para una aplicación de un alabe de aerogenerador”**, XIV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica 2019, Cartagena, Colombia.

Artículo Q1, **“The role of fiber-matrix compatibility in vacuum processed natural fiber/epoxy biocomposites”**, Cellulose, 28(12), 7845-7857, 2021, doi.org/10.1007/s10570-021-04055-7

Capítulo de libro en revisión, **“Metodologías de diseño y herramientas computacionales”**, libro Manufactura y PLM, capítulo 3, Editorial ITM

Fabricación de álabes para un aerogenerador de eje vertical con funcionamiento a bajas velocidades de viento.

# ÍNDICE GENERAL

1	RESUMEN.....	12
2	INTRODUCCIÓN.....	13
3	OBJETIVOS.....	15
4	MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE .....	16
4.1	Material compuesto.....	16
4.2	Material biocompuesto con matriz polimérica .....	17
4.3	Métodos de procesamiento de materiales biocompuestos .....	20
4.4	Tratamiento químico de materiales biocompuestos.....	21
4.5	Modelos numéricos de simulación con materiales compuestos .....	23
4.6	Aerogeneradores a baja velocidad .....	25
4.7	Compuestos en aerogeneradores.....	26
5	MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
5.1	Selección de materiales de partida.....	28
5.2	Molde para la fabricación de laminados con el proceso de infusión en vacío.....	29
5.3	Fabricación de materiales biocompuestos .....	30
5.4	Tratamiento químico de las fibras naturales .....	31
5.5	Ensayos de caracterización de materiales .....	32
5.5.1	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	32
5.5.2	Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).....	32
5.5.3	Análisis termogravimétrico (TGA) .....	32
5.5.4	Caracterización mecánica.....	32
5.6	Simulación estructural del álabe de aerogenerador .....	34
5.7	Fabricación de prototipo de álabe .....	35
6	RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	37
6.1	Selección de los materiales .....	37
6.1.1	Caracterización de las fibras naturales .....	37
6.1.2	Caracterización mecánica de los diferentes sistemas resina/fibra .....	40
6.2	Caracterización del biocompuesto Epoxi/Fique variando el vacío en el proceso de fabricación .....	43
6.2.1	Caracterización mecánica.....	44
6.3	Efecto del tratamiento químico de las fibras de fique sobre el biocompuesto.....	47
6.4	Desempeño estructural de los álabes por medio de simulación.....	50

6.4.1	Preprocesamiento.....	51
6.4.2	Procesamiento.....	53
6.4.3	Posprocesamiento .....	56
6.4.4	Validación de propiedades con la configuración 0/45/90-0/45/90.....	58
6.5	Manufactura de álabes con el proceso de infusión en vacío .....	59
6.5.1	Fabricación del modelo .....	59
6.5.2	Fabricación de molde.....	60
6.5.3	Fabricación de álabes.....	63
6.5.4	Anotaciones finales.....	65
7	CONCLUSIONES.....	67
8	REFERENCIAS .....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4-1. Formas físicas posibles de los refuerzos: a) fibra, b) partícula, c) hojuela. [19]	16
Figura 4-2. Relación entre la resistencia a la tensión y el diámetro para una fibra de carbono. Otros materiales filamentosos tienen relaciones similares [19].	16
Figura 4-3. Estructuras químicas de celulosa, hemicelulosa y lignina. Extraído de [23].	18
Figura 4-4. Estructura y microestructura de la fibra natural. [24].	18
Figura 4-5. Procesamiento y caracterización de fibras naturales. [24].	23
Figura 4-6. Naturaleza multiescalar del material compuesto para modelos de elementos finitos. (a) Compuesto unidireccional y (b) compuesto tejido, fuente: [56].	24
Figura 5-1. Tejidos de fibras naturales, (a) Fique, (b) Fique-algodón y (c) Moriche.	28
Figura 5-2. Molde para el proceso de infusión en vacío	30
Figura 5-3. Tratamiento químico de fibras naturales. a) corte y b) fibras enmarcadas antes (izquierda) y después (derecha) del tratamiento con solución de NaOH	31
Figura 5-4. Preparación para caracterización de propiedades ortotrópicas de los laminados. a) probetas de tracción en el plano, fuera de plano y ensayo de esfuerzo cortante b) dispositivo de medición de deformación con galgas extensiométricas.	33
Figura 5-5. Geometría de las probetas para los diferentes ensayos de caracterización mecánica. a) Tracción, b) Flexión, c) Fuera de Plano y d) Cortante. Todas las medidas están dadas en mm.	33
Figura 5-6. Álabes que componen el perfil aerodinámico multielemento.	34
Figura 5-7. Modelo numérico compuesto de 3 fases.	34
Figura 5-8. Fases del modelo numérico. a) Dinámica de fluidos, b) ACP (Pre), c) Estático Estructural.	35
Figura 6-1. Micrografías de las fibras naturales en dirección longitudinal (superior) y transversal (inferior) de, a) fique, b) fique-algodón y c) moriche.	37
Figura 6-2. FTIR de las fibras de fique, fique-algodón y moriche.	39
Figura 6-3. Análisis TGA de fibras naturales.	40
Figura 6-4. Diagramas esfuerzo vs deformación de los biocompuestos según el tipo de matriz, a) Bioepoxi, b) Epoxi y c) Poliéster.	41
Figura 6-5. Resultados de ensayos mecánicos a biocompuestos con diferente matriz, a) esfuerzo, b) módulo a tensión y c) deformación.	41
Figura 6-6. Diagramas esfuerzo vs deformación de los biocompuestos Epoxy/Fique, a diferentes presiones de vacío.	44
Figura 6-7. Resultados de ensayos de tracción de Epoxi/Fique con variación del vacío, a) esfuerzo, b) módulo de elasticidad y c) deformación.	45

Figura 6-8. Resultados de ensayos de flexión de Epoxi/Fique con variación del vacío, a) esfuerzo, b) módulo de elasticidad y c) deformación.....	45
Figura 6-9. Micrografías SEM del biocompuesto Epoxi/Fique, a) y b) a 0 bar, c) y d) a 0.4 bar y e) y f) a 0.8 bar. ....	47
Figura 6-10. Curvas de esfuerzo de tracción vs deformación de Epoxi/Fique con y sin tratamiento químico en el refuerzo.....	48
Figura 6-11. Resultados ensayos de tracción a compuestos con fibras tratadas. a) esfuerzo, b) módulo y c) deformación.....	49
Figura 6-12. Curvas de esfuerzo de flexión vs deformación de Epoxi/Fique con y sin tratamiento químico en el refuerzo.....	49
Figura 6-13. Resultados ensayos de flexión a compuestos con fibras tratadas. a) esfuerzo, b) módulo y c) deformación.....	50
Figura 6-14. Superficies de la geometría para el análisis en ANSYS ACP .....	52
Figura 6-15. Gráfico de deformación total y máximo esfuerzo equivalente vs el número de nodos.....	53
Figura 6-16. Propiedades polares de la lámina Epoxi/Fique.....	54
Figura 6-17. Propiedades polares de los laminados. ....	54
Figura 6-18. Cargas sometidas a la geometría.....	55
Figura 6-19. Representación gráfica de la deformación total.....	56
Figura 6-20. Representación gráfica del esfuerzo máximo equivalente.....	57
Figura 6-21. Geometría de los álabes, a) Diseño CAD y b) preforma del modelo en madera .....	60
Figura 6-22. Modelos de álabes.....	60
Figura 6-23. Recubrimiento del modelo con gelcoat. ....	61
Figura 6-24. Adición de capas de fibra de vidrio. ....	61
Figura 6-25. Adición de refuerzo estructural.....	62
Figura 6-26. Molde de álabes para la fabricación por infusión en vacío.....	62
Figura 6-27. Molde con la capa de gel coat en el área del álabe.....	63
Figura 6-28. a) disposición de los tejidos de fique y b) componentes para el proceso de infusión en vacío.....	64
Figura 6-29. Sección del perfil aerodinámico compuesta de cuatro alabes fabricados con Epoxi/Fique por infusión en vacío. ....	65
Figura 6-30. Aerogenerador con álabes de material Epoxi/Fique.....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5-1. Materiales seleccionados para la fabricación de bio-compuesto .....	29
Tabla 5-2. Porcentajes en peso de fibra de los biocompuestos. ....	31
Tabla 6-1. Matriz de selección del material biocompuesto. ....	43
Tabla 6-2. Parámetros orto trópicos del material biocompuesto Epoxi/Fique .....	51
Tabla 6-3. Resultados del modelo con diferentes mallas para la deformación total. ....	53
Tabla 6-4. Resultados de las simulaciones en términos de deformación total y esfuerzo máximo equivalente.....	58
Tabla 6-5. Parámetros de entrada con las propiedades del material con la configuración 0,45,90/0,45,90. ....	58
Tabla 6-6. Resultados de la simulación con el material final. ....	59

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma$	Esfuerzo
$\varepsilon$	Deformación
$E$	Módulo elástico o módulo de Young
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$G$	Módulo elástico a cortante
$\rho$	Densidad

# 1 RESUMEN

Los materiales compuestos de matriz polimérica se caracterizan por sus atributos en aplicaciones de alto desempeño donde se requieren altas propiedades mecánicas y bajo peso. Normalmente, se logra con el uso de fibras sintéticas o inorgánicas; como las fibras de vidrio o de carbono, sin embargo, en la actualidad esta clase materiales han generado un impacto ambiental de gran magnitud, debido a su disposición al final de su ciclo de vida. Por consiguiente, la ciencia e ingeniería de materiales está migrando hacia nuevas propuestas de materiales amigables con el medio ambiente, es así, que las fibras naturales se han convertido en un campo muy atractivo como refuerzo en materiales compuestos por sus buenas propiedades mecánicas, lo que ha permitido la construcción de elementos de ingeniería más ligeros y con buenas prestaciones en servicio. Estos materiales llamados comúnmente biocompuestos, requieren de investigación para determinar sus propiedades y los parámetros de procesamiento para obtener piezas funcionales. En ese sentido, existe un campo de aplicación a explotar con los biocompuestos en los álabes de aerogeneradores que están fabricados en su mayoría de materiales compuestos con fibras sintéticas, que luego de su tiempo de funcionamiento o vida útil representan un foco de contaminación, debido a las bajas alternativas para ser reutilizados y el gran consumo de energía en este procesamiento.

Por lo tanto, en este proyecto se investigó el efecto que representa la disposición de tejidos de fibra naturales colombianas en las propiedades mecánicas de un material biocompuesto, y su utilidad en aplicaciones de álabes de aerogeneradores de bajas velocidades de viento. A partir de esto, se determinó el material biocompuesto más adecuado como el sistema Epoxi/Fique, basado en criterios de costos, disponibilidad, propiedades mecánicas y menor impacto ambiental. Además, se realizó un modelamiento numérico que permitió identificar el efecto de la disposición de los tejidos de fique en el laminado que compone la geometría de un alabe de aerogenerador de eje vertical para bajas velocidades de viento. Así, con este desarrollo experimental y numérico, se realizó la fabricación de una sección de cuatro álabes que en conjunto forman un perfil aerodinámico multielemento bajo el proceso de infusión al vacío utilizando el biocompuesto Epoxi/Fique. Con la presente investigación, se muestran las fibras naturales colombianas en especial la fibra de fique, como una alternativa viable para la fabricación de alabes para un aerogenerador con materiales amigables con el medio ambiente.

Palabras clave: Álabe, Biocompuesto, CAE, Fibras naturales, Fique, Infusión al vacío, Resina epoxica.

## 2 INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se han venido presentando diversos fenómenos naturales, provocando aumentos y caídas de temperaturas, el deterioro de la capa de ozono, descongelamiento de los polos, pérdida de afluentes por sequía e inclusive catástrofes naturales. Estos fenómenos pueden estar relacionados con la contaminación atmosférica, debido a los contaminantes urbanos generalmente provenientes de fuentes móviles como el tráfico rodado y fuentes fijas como procesos industriales, uso residencial, climatización y procesos de reducción de residuos. Emisiones que están relacionadas con el cambio climático y en consecuencia generan un impacto de manera indirecta en fenómenos meteorológicos, y directamente en la salud a través de la contaminación del aire [1].

Teniendo en cuenta que, gran parte de los agentes contaminantes provienen de la generación de la energía eléctrica y que la electricidad es el medio de abastecimiento energético preferido a nivel mundial, resulta favorable la energía proveniente de una fuente limpia desde el punto de vista de las energías renovables [2]. Además, se estima que alrededor de una quinta parte del consumo total de la energía global es de tipo eléctrico en los países de ingresos altos, aumentando también significativamente en los países en desarrollo [3]. A partir de esta demanda se hace necesario mitigar el impacto ambiental producto de la generación eléctrica que en la mayoría de los casos utiliza combustibles fósiles, mediante el uso de fuentes de energía limpias, inagotables y crecientemente competitivas, como: solar fotovoltaica, solar térmica y eólica.

Desde el año 2000 se ha observado un aumento en el uso de generación eólica a nivel mundial. La capacidad de energía producida ha ido incrementando de 17 a 361 GW para el 2014, teniendo a Alemania, Estados Unidos y China entre los mayores impulsores [4] y para el 2020 la capacidad instalada llegó a 743 GW con un aumento de 93 GW en este año [5]. En este sentido, Colombia ha incursionado en este modelo de energía, por medio de políticas que han permitido el uso de tecnologías más limpias y de recurso eólico [6], [7]. Existe un potencial eólico significativo en la región de la Guajira ubicada al norte del país, sin embargo, la velocidad de los vientos en el resto del territorio no es suficiente para el uso de aerogeneradores convencionales reduciendo el campo de aplicación. Los generadores con funcionamiento a bajas velocidades de viento representan una alternativa para el aporte de energía en zonas de difícil acceso a la red de conexión eléctrica, ya que en el país existen numerosos sitios sin este servicio básico. Por mencionar un ejemplo, en la región del Catatumbo para el 2014 solo 5 de los 11 municipios que la conforman contaban con cobertura en el servicio eléctrico por encima del promedio nacional [8], y para el 2016 en la zona rural varios municipios empezaron a ampliar su red eléctrica como Sardinata, El Carmen, San Calisto y Abrego con 41.36%, 57.33%, 58.32%, 69.53% de cobertura respectivamente [9].

Entre los productores de aerogeneradores, se encuentra VESTAS empresa de Dinamarca, líder en la fabricación de turbinas eólicas [10]. Las palas de los aerogeneradores comunes están constituidas por una estructura central resistente con dos cubiertas exteriores que forman el perfil aerodinámico, en la mayoría de los casos utilizan materiales como fibra de vidrio, metales, resinas e inclusive tela. La combinación de estos materiales debe cumplir con ciertas propiedades de resistencia estructural, resistencia a la fatiga, rigidez, bajo peso, facilidad de fabricación, resistencia a agentes medioambientales, entre otros [11]. En el caso de aerogeneradores de baja potencia los materiales comunes son: compuestos de fibra de vidrio y fibra de carbono con resina epoxi, polímeros, madera, entre otros, [12]–[14],

materiales que por lo general son de origen sintético e influyen como agentes contaminantes. Producto de esto, se evidencia una problemática en la eliminación de álabes de los aerogeneradores que están llegando al final de la vida útil, ya que no existe una solución sostenible de reciclaje [15]. Por tanto, es necesario la implementación de nuevos materiales amigables con el ambiente con propiedades similares para ser implementados en la construcción de estructuras para la fabricación de dispositivos para generar energía limpia como es el caso de los aerogeneradores.

Existen diversas alternativas de aplicación de materiales que alivien el efecto contaminante en la naturaleza, una de esas son los materiales compuestos con fibras naturales. De acuerdo con el estudio de Ramesh M. et al. [16], el uso de materiales biocompuestos que incorporan fibras vegetales va en aumento debido al campo de aplicación que día a día va despertando el interés en los investigadores por la fabricación de nuevos biocompuestos de matriz polimérica. Estos materiales han marcado un futuro prometedor en aplicaciones estructurales, de acuerdo con sus ventajas de procesamiento, bajo costo, biodegradabilidad, baja densidad relativa, alta resistencia específica y naturaleza renovable.

En este contexto, este trabajo de investigación se centró en el desarrollo de un material biocompuesto a partir de fibras naturales producidas en colombiana, para la fabricación de un prototipo de alabe de un aerogenerador de bajas velocidades de viento. De acuerdo con lo anterior, se propusieron las siguientes etapas que comprenden, en primera instancia una búsqueda de las materias primas como: tipos de fibras naturales colombianas y resinas termoestables, seguidamente se realizó un análisis de la compatibilidad entre los constituyentes. Posteriormente, se procedió con la fabricación del compuesto y su respectiva evaluación del comportamiento mecánico y se finalizó con la fabricación del prototipo de alabe apoyado de resultados numéricos que indicaron la configuración y disposición del material. Esta propuesta fue desarrollada al observar que: el uso de fibras naturales para reemplazar las fibras sintéticas en materiales compuestos, proporciona un mejor impacto en el medio ambiente, un menor costo de producción y en ciertas aplicaciones muestran un mejor rendimiento [17]. Además, esta aplicación en la generación de la energía eléctrica es importante para el desarrollo en general de una región y afecta directamente la economía de manera positiva, cuando esta es rentable como una aplicación productiva [18].

En términos generales, con el presente trabajo se pretende contribuir en la investigación del uso de materiales biocompuestos para la fabricación de un alabe para la construcción de un aerogenerador de bajas velocidades de viento, que traigan consigo mismo la captación de energía para áreas interconectadas, impulsar las fibras naturales colombianas como también el oficio de los artesanos colombianos quienes dominan las técnicas de extracción y preparación de las fibras. Para tal fin, se propusieron como meta los siguientes objetivos:

### 3 OBJETIVOS

*General:*

Desarrollar un material biocompuesto a partir de fibras naturales colombianas con potencial de ser aplicado en la fabricación de un prototipo de álabe de aerogenerador de bajas velocidades de viento.

*Específicos:*

- ❖ Seleccionar las materias primas necesarias para la fabricación de un material biocompuesto, mediante la identificación de materiales estudiados con potencial uso en compuestos de matriz termoestable utilizando criterios basados en disponibilidad, propiedades mecánicas y compatibilidad.
- ❖ Evaluar el desempeño mecánico de materiales biocompuestos de fibras naturales colombianas, obtenidos mediante proceso de laminado manual asistido por vacío.
- ❖ Establecer el efecto de un tratamiento químico de compatibilización entre fibras naturales y matriz sobre las propiedades mecánicas de los materiales biocompuestos.
- ❖ Analizar numéricamente la disposición de las capas que conforman los laminados de materiales biocompuestos en un álabe de un aerogenerador de baja potencia mediante uso de un modelo con elementos finitos.
- ❖ Fabricar un prototipo de álabe de aerogenerador de bajas velocidades de viento, usando el material biocompuesto con fibras naturales colombianas por medio de infusión en vacío.

## 4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

### 4.1 Material compuesto

Un material compuesto consiste en dos fases: matriz como fase primaria y agente reforzador como fase secundaria. Generalmente las fases son insolubles, pero puede existir gran adhesividad en la interfaz. La fase reforzadora generalmente se encuentra en forma de fibras, partículas u hojuelas como se observa en la Figura 4-1. Cualquiera de los tres tipos básicos de materiales (polímeros, cerámicos y metales), constituyen la fase de la matriz, al igual que el refuerzo que puede estar constituido por elementos como el carbono o el boro [19].



Figura 4-1. Formas físicas posibles de los refuerzos: a) fibra, b) partícula, c) hojuela. [19]

Las fibras se distinguen como filamentos por lo general de sección transversal circular, que pueden variar en diámetros desde 0.0025mm a 0.13mm. Se caracterizan por mejorar la resistencia de las estructuras compuestas. En la Figura 4-2 se puede observar el efecto del diámetro de una fibra de carbono sobre la resistencia a la tensión del compuesto, en el cual, se evidencia que a un menor diámetro tiende a aumentar la resistencia del compuesto [19].

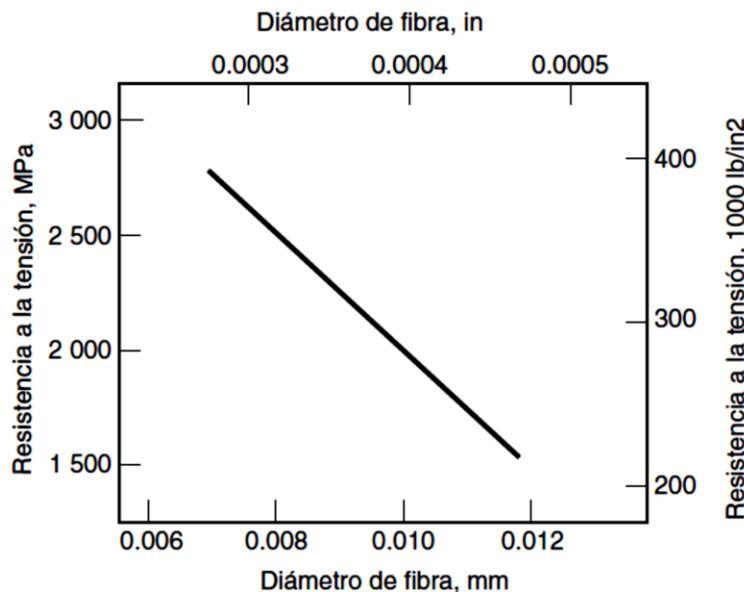


Figura 4-2. Relación entre la resistencia a la tensión y el diámetro para una fibra de carbono. Otros materiales filamentosos tienen relaciones similares [19].

Existe una zona entre las fases de matriz y refuerzo, y la eficacia de operación del compuesto depende del enlace de las fases en este sitio de unión. En ocasiones, hay un enlace directo entre los dos componentes a lo que se denomina interfaz. En otras situaciones se agrega un tercer componente entre las dos fases primarias para facilitar la unión, este se considera un adhesivo y es denominada como interfase. Así mismo, cuando ocurre una solución parcial de

las fases, cuando estas no son insolubles por completo, se genera otra forma de interfase creada por la unión de las fronteras de la matriz y el refuerzo [19].

Otro factor importante en los materiales compuestos es la orientación de las fibras, estas tienen tres casos de influencia: cuando el refuerzo es unidimensional la resistencia y rigidez son máximas en el sentido de las fibras, si el refuerzo es plano, en ciertos casos se presenta que la orientación es bidimensional y si el refuerzo está dispuesto al azar o tridimensional, el material compuesto tiende a tener propiedades isotrópicas [19]. Así mismo, cuando un material compuesto aumenta en el nivel de simetría en los tres planos ortogonales, se denomina como material ortótropo [20].

En general, existen tres factores que determinan las propiedades de un material compuesto: primero los materiales utilizados como matriz y refuerzo, segundo la forma geométrica de estos materiales y la estructura resultante del material compuesto y tercero la forma como interactúa el refuerzo y la matriz. Al agregar fibras a una matriz polimérica, se obtiene un material compuesto que aprovecha la resistencia y evita algunos problemas de estas fibras como: defectos de superficie, abombamiento cuando se comprimen y lo poco conveniente de las formas del filamento cuando se requiere un componente sólido. Así, al aplicar una fuerza al compuesto, se deforma la matriz (material con resistencia menor) y se transmite la carga al refuerzo (material con resistencia mayor) donde las fibras soportan la fuerza y en el caso de romperse unas fibras la carga se distribuye hacia otras por medio de la matriz. Por esta razón al orientar las fibras de forma longitudinal a la fuerza, se obtiene los mejores resultados del compuesto y el caso contrario ocurre cuando se orientan de manera transversal. Cuando existen dos o más capas unidas formando una geometría integral, esta se denomina estructura compuesta laminar. La orientación de estas capas se puede modificar para incrementar la resistencia conjunta de la pieza en diferentes direcciones, ya que combina las propiedades particulares de cada una de las láminas [19].

Actualmente países como China, India y EE. UU. llevan la delantera en la investigación y desarrollo de materiales compuestos para aplicaciones en mecánica, química, ingeniería, tecnología, etc. Sus estudios se centran en el desarrollo de materiales compuestos con fibras naturales, debido a sus propiedades biodegradables, renovables y su disponibilidad en comparación con las fibras sintéticas [21]. Sin embargo, a pesar de que las fibras naturales tienen propiedades favorables como su baja densidad y su costo, también cuentan con algunas limitaciones como baja estabilidad térmica, son altamente inflamables, poseen una alta capacidad de absorber humedad, entre otras. Para contrarrestar estos efectos se hace necesario crear materiales híbridos reforzados con fibras sintéticas y fibras naturales de distintos tipos que permitan mejorar el rendimiento del material resultante, reducir la capacidad de absorber humedad con el fin de garantizar la estabilidad en las propiedades del material [22]. En estudios como los de Gupta y Rao [22] se evidenció que para la fabricación exitosa de compuestos híbridos que emplean sisal y cáñamo se pueden aumentar las propiedades de tracción y flexión al emplearse fibras largas.

#### 4.2 Material biocompuesto con matriz polimérica

Cabe resaltar que en la actualidad ha surgido un interés en las fibras naturales extraídas de diferentes partes de las plantas, que al unirlas con una matriz polimérica producen un material biocompuesto atractivo para aplicaciones modernas. Estas fibras están constituidas por una configuración en su estructura y organización microestructural dividida en tres componentes

estructurales principales: la lignina, la hemicelulosa y la celulosa, en la Figura 4-3 se observan las estructuras químicas de estos componentes extraídas del estudio de [23]. En su estructura la fibra está dividida en una pared primaria en el exterior, seguido de tres paredes secundarias y un orificio en el centro, como se muestra en la Figura 4-4. [24]

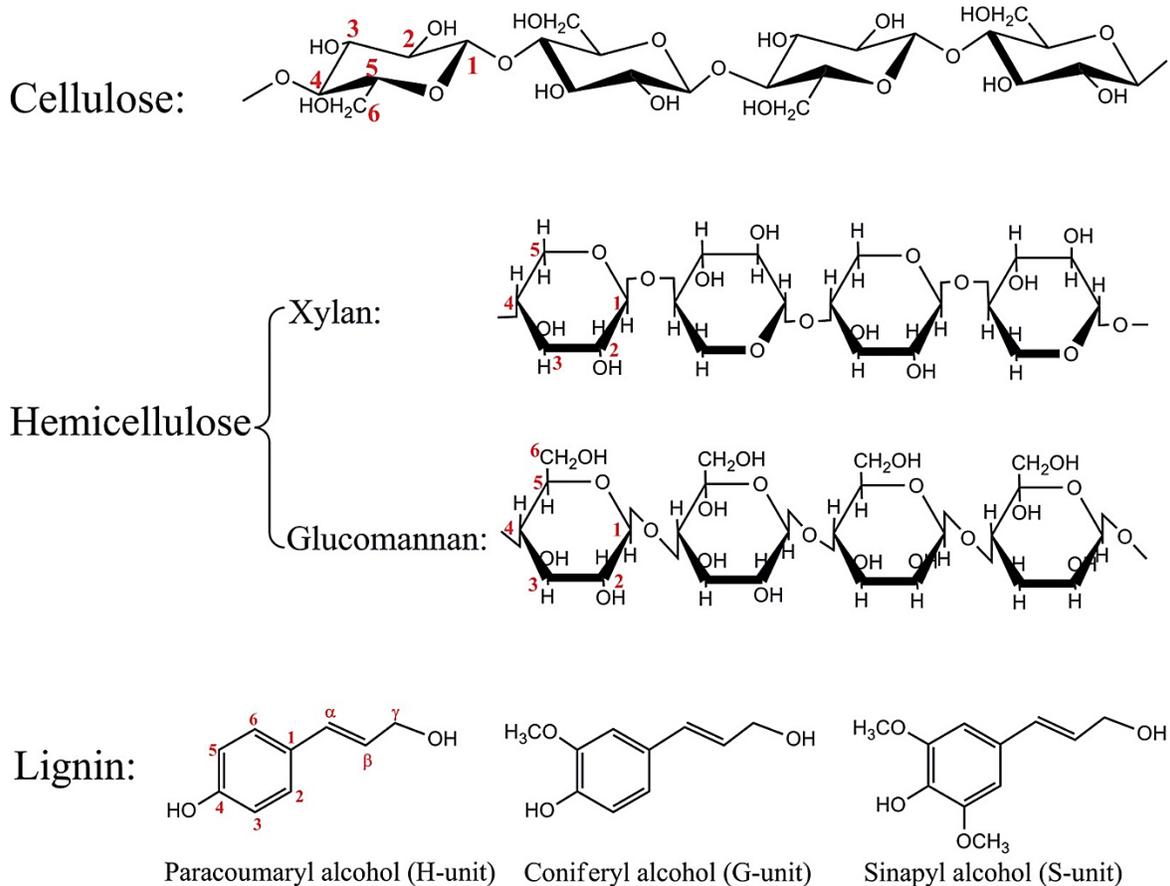


Figura 4-3. Estructuras químicas de celulosa, hemicelulosa y lignina. Extraído de [23].

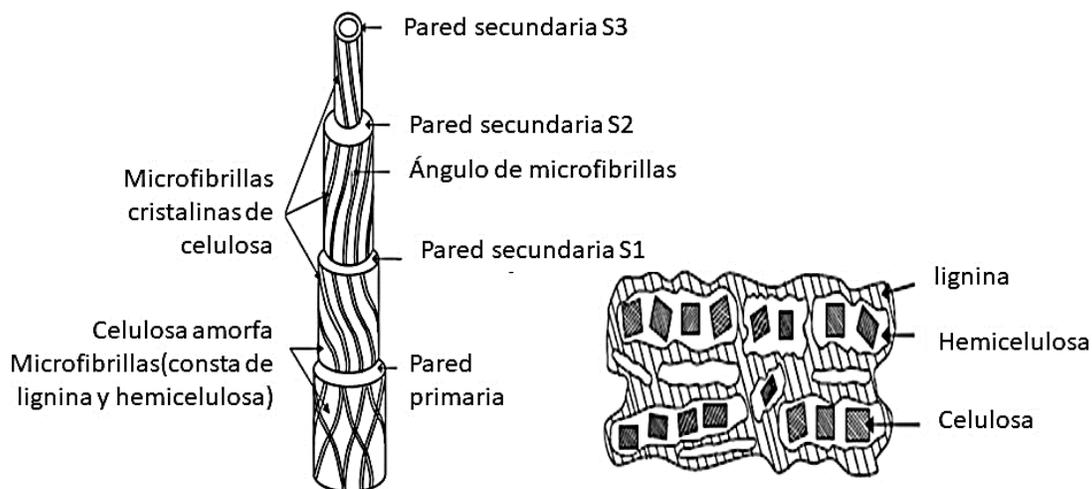


Figura 4-4. Estructura y microestructura de la fibra natural. [24].

La tendencia del uso de materiales compuestos con fibras naturales ha ido en aumento en los últimos años. Estos biocompuestos han desarrollado una importancia significativa debido a sus beneficios medioambientales, amplia disponibilidad, menor costo y su variedad de propiedades mecánicas. Todas estas características posicionan a estos compuestos como materiales de ingeniería competitivos [25], [26], lo que se traduce en buena aceptación e interés para su investigación en el desarrollo de nuevos materiales.

Existe una gran variedad de fibras naturales utilizadas en este tipo de materiales compuestos, las cuales muestran un uso potencial y ciertas ventajas en comparación con los materiales sintéticos comunes. Entre los beneficios se destacan las bajas emisiones de carbono en su procesamiento y fabricación, sumado a su característica biodegradable, convirtiéndolo en un material más amigable con el medio ambiente [27].

Por otro lado, en lo que respecta a propiedades específicas como la rigidez (Módulo/densidad), existen fibras naturales como: Curaua, Flax, Hemp, Jute, Ramie, entre otros, que muestran un mejor comportamiento mecánico según el rango de datos reportados que superan a los valores de las fibras de vidrio E-glass [28]. Así mismo, se reporta una mayor disponibilidad y menor costo de las fibras naturales [29], y en consecuencia le proporciona una mayor importancia a la investigación y al empleo de esta materia prima para diversas aplicaciones industriales.

A continuación, se describen algunos de los trabajos de investigación de compuestos con este tipo de refuerzo, que fueron objeto de investigación en los últimos años, para lo cual se hace necesario realizar modificaciones como tratamientos superficiales a las fibras naturales para mejorar su compatibilidad con la matriz termoestable y en consecuencia sus propiedades mecánicas.

B. Szolnoki et al. [30], fabricaron compuestos de resina epoxi reforzada con tela de cáñamo, utilizando tres tratamientos diferentes en las fibras. En el primero utilizaron una solución fría de ácido fosfórico y el tejido precalentado, en el segundo método usaron un recubrimiento con un agente aminosilano y el tercero, se combinaron los dos anteriores. Para estos biocompuestos, se realizaron pruebas de análisis térmico, morfológico, caracterización mecánica y determinación de adhesión, dando como resultados una reducción en la inflamabilidad debido a la introducción de fósforo en las fibras de refuerzo y un aumento en la adhesión que le aportó estabilidad en las propiedades mecánicas.

Por otra parte, como medio de comparación de materiales, D. Hristozov et al. [31], investigaron los biocompuestos de fibra de lino y los compuestos de fibra de vidrio, en términos de rendimiento a largo plazo por medio de pruebas de durabilidad acelerada. Para tal fin, realizaron ensayos de tracción en diferentes intervalos de tiempo a probetas de ambos materiales, expuestas a diferentes condiciones ambientales como calor seco, agua destilada, agua salada y soluciones alcalinas en temperaturas de 20, 50 y 60 grados Celsius. Para las muestras de lino, el peso aumento cuando estas se sumergieron en agua y agua salada, mientras que para las muestras de fibra de vidrio el aumento de peso fue significativamente menor. A pesar de ser de casi tres veces la retención de agua, las muestras de lino revelaron una retención de resistencia ligeramente mayor a las de fibra de vidrio, con un promedio del 23%. Lo que indica que el comportamiento mecánico a largo plazo del biocompuesto con lino, es mejor que el del compuesto con fibras de vidrio.

En la investigación de Y. Ro et al. [32], el principal interés fue evaluar las propiedades mecánicas de un material compuesto celulósico a partir de estiércol de bovino y recipientes reciclados, para lo cual determinaron las tensiones de la estructura perforada, a partir de datos de desplazamiento. Para este estudio, utilizaron una representación en serie de la función de tensión de Airy y registraron los datos mediante correlación de imagen digital. De igual forma, utilizaron un modelo numérico mediante el software ANSYS para compararlo con los resultados experimentales, obteniendo un compuesto caracterizado para diferentes aplicaciones, una opción de uso de residuos orgánicos y una comparación del modelo numérico con la teoría de falla y el desarrollo experimental. K. Shivakumar et al. [33], estudiaron el biocompuesto yute-poliéster para aplicaciones de componentes del interior de vehículos y su efecto en la seguridad al presentarse impactos con la cabeza. Se llevaron a cabo diferentes pruebas que consistieron en ensayos de tracción, compresión y flexión en tres puntos y que posteriormente se utilizaron para una evaluación basada en un modelo de elementos finitos. Los resultados mostraron que el biocompuesto tiene potencial como un material efectivo para el acabado interior del vehículo y cumple con el requisito de seguridad establecido en EE. UU. Así mismo A. Verma et al. [34], fabricaron y caracterizaron biocompuestos de resina de almidón con fibra de sisal y recubrimiento de resina epoxi, con y sin tratamiento químico de alcalinización de la fibra utilizando NaOH. En la etapa experimental aplicaron pruebas mecánicas, absorción de agua, análisis térmico y SEM, donde observaron un mejor comportamiento de las propiedades generales del biocompuesto a comparación de la matriz de almidón puro. Estos tres últimos estudios fueron socializados en comunidades académicas internacionales como la American Society of Mechanical Engineers (ASME), Society of Automotive Engineers (SAE) y American Society for Testing and Materials (ASTM) respectivamente.

#### 4.3 Métodos de procesamiento de materiales biocompuestos

Los procesos utilizados comúnmente para la fabricación de estos materiales biocompuestos, provienen del desarrollo de compuestos con fibra sintética. Esta industria manufacturera cuenta con una alta experiencia en el uso de textiles como refuerzo que involucra procesos como: el método de colocación manual, siendo este el más sencillo, de bajo costo y versátil para la fabricación de laminados, la calidad del componente depende de la habilidad del productor y es utilizado principalmente para la fabricación de prototipos. Otro proceso muy común aplica el uso de vacío, este es conocido como la infusión con moldeo por transferencia de resina (RTM), además una variante de este proceso es conocido como el método de infusión en vacío donde se permite la impregnación transversal de las capas de tejido de refuerzo. Así mismo, existen otros procesos de fabricación como el moldeo en autoclave, el devanado de filamentos, pultrusión, extrusión, moldeo por inyección y moldeo por compresión, que también han sido reportados en la fabricación de biocompuestos en diferentes investigaciones [35].

Dentro de los métodos de fabricación, la calidad del compuesto final depende de las deformaciones locales y globales que influyen en la orientación, fracción en volumen, la aparición de arrugas y espacios entre hilos. En general, con el manejo adecuado de la disposición de las fibras, se puede obtener un producto optimizado [36]. Sin embargo, la correcta ubicación de los tejidos en el procesamiento de compuestos no es suficiente cuando se trata de la incorporación de materiales lignocelulósicos, debido a la naturaleza hidrofílica

de las fibras naturales, lo que representa una incompatibilidad con el material hidrofóbico de las matrices poliméricas [24]. De acuerdo con lo anterior, se han realizado estudios para analizar la adhesión entre los componentes fibra/matriz, como también las características superficiales como dimensiones y rugosidad [37]. Estas diferencias entre refuerzos implican que todos los tejidos lignocelulósicos actúan diferentes sobre los materiales biocompuestos, con lo cual, se hace necesario la evaluación de sus propiedades, lo que permite establecer comparaciones entre ellos. Por lo tanto, los biocompuestos dependen de varios parámetros, como la fracción en volumen de las fibras, la relación de aspecto de la fibra (L/D), la adhesión fibra / matriz, la transferencia de tensión en la interfaz y la orientación de los tejidos [38].

Algunos estudios mostraron interés en el procesamiento de compuestos y su evaluación mecánica, E. Sarikaya et al. [39], investigaron biocompuestos de matriz epoxica con fibras de abedul, palma y eucalipto fabricados por moldeo de transferencia de resina. Para esto, realizaron ensayos de tracción, flexión, compresión e impacto, donde el mejor comportamiento lo obtuvo el compuesto de eucalipto/epoxy, seguido por palma/epoxy, sin embargo, los resultados de los ensayos de impacto fueron más relevantes para el material de palma/epoxi. Los autores destacan, que el proceso de RTM y los biocompuestos obtenidos se muestran como una alternativa prometedora para el desarrollo de materiales de ingeniería ecológicos y útiles en un futuro cercano. Por otra parte, A. Seyam et al. [40], fabricaron biocompuestos de tututi/epoxi mediante la técnica de moldeo por transferencia de resina asistida por vacío, variando el número de capas, la orientación y la fracción de volumen de la fibra natural. Según los resultados obtenidos de la caracterización mecánica a tensión determinaron las propiedades del compuesto y aplicaron un diseño experimental que valoró el efecto de las variables, en donde la disposición de capas angulares permite obtener un biocompuesto cuasi-isotrópico.

Por otra parte, la diversidad biológica en suramericana ha sido explorada, lo que ha permitido identificar ciertas fibras naturales utilizadas en su mayoría de forma artesanal, como posibles refuerzos prometedores para compuestos. La fibra de fique (*furcraea cabuya*) es una de ellas, reconocida planta de la zona andina colombiana que ofrece fibras extraídas de las hojas de longitud cercana a los 2 metros y el moriche (*mauritia flexuosa*) palma con hojas fibrosas aproximadas a los 2.5 metros encontradas en la Orinoquia y Amazonia colombiana [41]. Algunas investigaciones muestran al fique como refuerzo más económico que el kevlar para aplicaciones balísticas [42] y como reemplazo para el asbesto [43]. Por otra parte, la fibra de moriche también conocido en Brasil como buriti y/o árbol de la vida [44], ha sido caracterizado arrojando propiedades prometedoras a tensión [45], y en compuestos con poliéster [46] y PLA [47]. Es por esto, que se hace necesario investigar a fondo la conducta mecánica de los compuestos con fibras naturales de esta región, así como evaluar su comportamiento a partir de la interacción fibra/matriz que permitan luego potenciar sus propiedades como material de refuerzo en biocompuestos.

#### 4.4 Tratamiento químico de materiales biocompuestos

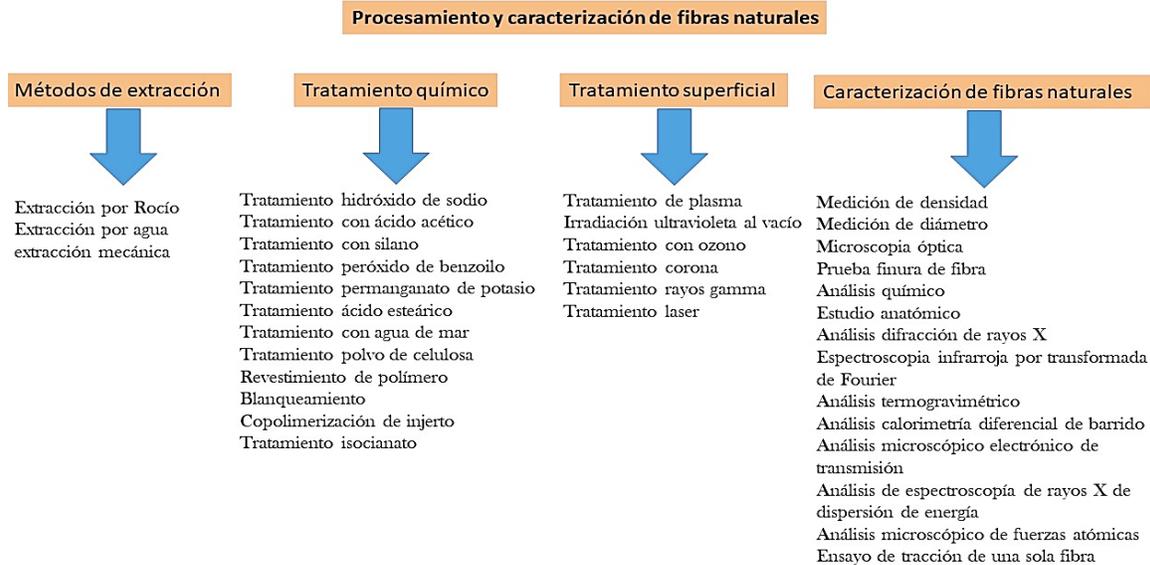
Los materiales compuestos con fibra natural han tomado gran importancia en la producción de nuevos materiales, de tal manera que los científicos ven una solución a la crisis ambiental y el calentamiento global. El costo de la fibra natural en comparación con algunas fibras sintéticas es relativamente bajo, además, que el uso de biomateriales aumenta la conciencia ambiental y reduce el consumo insostenible [24]. Es evidente la necesidad de fabricar nuevos

materiales biocompuestos de fibras naturales y matriz polimérica, argumento que se ha convertido en uno de los temas de investigación más influyentes de los últimos tiempos [48]. Sin embargo, las características moleculares del refuerzo en este tipo de compuestos son incompatibles con la matriz, lo que hace necesario recurrir a agentes químicos que permiten mejorar la adherencia en la interfaz fibra-matriz. A continuación, se describen algunas investigaciones, enfocadas al estudio de tratamientos químicos en materiales con refuerzo natural:

Mylsamy, K. & Rajendran, I. [49], compararon el comportamiento de la fibra de Agave antes y después de un tratamiento químico de alcalinización (NaOH al 5%), para evaluar un material compuesto con matriz epoxi de grado 3554A y orientación unidireccional del refuerzo. En el proceso de curado usaron un endurecedor lento en la resina en proporción de 4:1, con el fin de favorecer la viscosidad. Entre sus resultados demostraron que las resistencias y módulos a tracción y compresión aumentaron debido al tratamiento de alcalinización de la fibra, determinando por medio de SEM una mejor adhesión de la matriz y el refuerzo, debido a la disolución de la hemicelulosa y al aumento de la relación de aspecto. En otro estudio similar, con la variación de la longitud de las fibras de Agave (3 mm, 7 mm y 10 mm) en las mismas condiciones, Mylsamy, K. & Rajendran, I. [50], comparan el comportamiento de la fibra con y sin tratamiento con álcali. Concluyendo que las fibras de 3 mm presentan mejores propiedades al presentar una mejor adherencia con la resina epoxi, el tratamiento químico resultó efectivo nuevamente comparado al de las fibras sin tratar.

En otros estudios, se probaron diferentes concentraciones de álcali con el fin de determinar la mejor relación tratamiento - propiedades, como es el caso Venkateshwaran, N. et al. [51], quienes utilizaron un compuesto con fibras de banano / epoxi (LY556). Donde luego de realizar un análisis mecánico, dinámico y morfológico se comprobó que la concentración más eficiente es de 1% comparado con las de 5%, 10% y 20%, se observa que este resultado se debe a la conversión de celulosa que en porcentajes mayores de álcali deteriora la superficie de la fibra. Para este compuesto la resistencia a la tracción arrojó un incremento del 52% después del tratamiento químico. Por otra parte Boopathi, L. et al. [52], con concentraciones de álcali al 5%, 10% y 15% probó un tratamiento químico a fibras de fruta borassus, para luego evaluar las propiedades físicas, químicas y mecánicas. La fibra expuesta a la concentración de 5% obtuvo mejores propiedades que el resto de las fibras incluyendo las que no se trataron químicamente, debido a una mejor interfaz matriz fibra, características de humectación y unión.

Se ha demostrado que se pueden mejorar las propiedades mecánicas de los biocompuestos de fibra natural con tratamientos químicos de álcali, sin embargo, este no es el único tratamiento químico y estas propiedades también dependen de otros factores. En la revisión de M.R., Sanjay et al. [24], determinaron que las propiedades del compuesto dependen de diversos factores que alteran la naturaleza de la fibra como los métodos de extracción, los tratamientos químicos y los tratamientos superficiales. Además, enumeran también los modelos de caracterización de las fibras naturales como se muestra en la Figura 4-5.



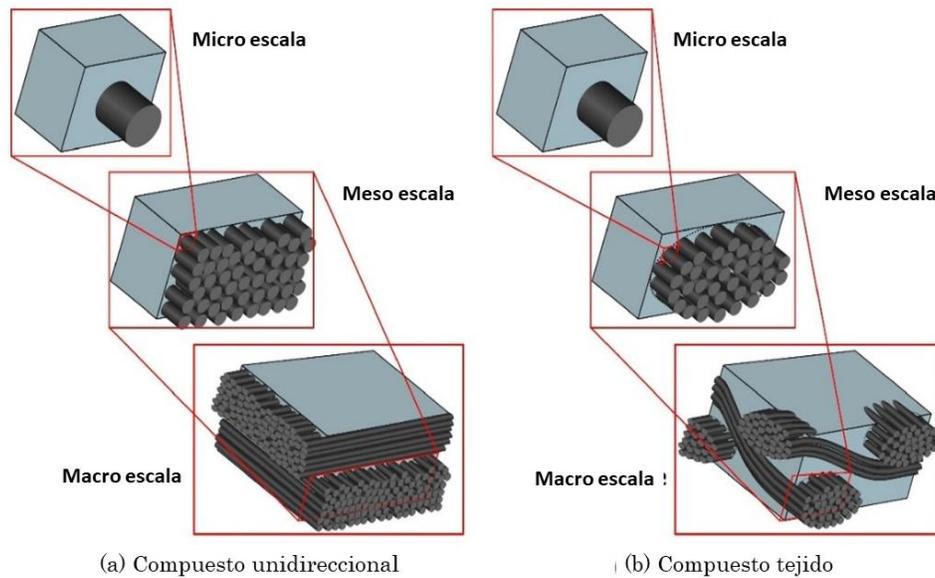
**Figura 4-5. Procesamiento y caracterización de fibras naturales. [24]**

Otros estudios muestran avances con otros tratamientos químicos de las fibras de fique como es el caso de P. Gañán & I. Mondragon [53], quienes además de usar alcalinización, utilizaron agentes químicos como anhídrido maleico, ácido acrílico y silanización, este último al aplicarlo luego del NaOH presenta los mejores resultados para ensayos de caracterización mecánica como resultado de la obtención de fibras con mayor contenido de celulosa. Así mismo, M. Muñoz, et al. [54], aplicaron silanización luego del tratamiento de alcalinización y posteriormente preimpregnaron estas fibras de fique con una solución de polietileno con el fin de aumentar la impregnación con la matriz del compuesto. Como resultado de este tratamiento de las fibras, el compuesto aumento las propiedades mecánicas de tracción y flexión. Por otra parte, O. Salinas et al. [55], utilizaron un tratamiento superficial de compatibilización del polvo que consiste en la esterificación de las fibras de fique luego de un tratamiento de alcalinización. En este tratamiento, utilizaron ácido oxálico como agente de acoplamiento en un disolvente verde D-limonelo para luego hacer análisis químico y térmico. Estos análisis revelaron un aumento en la termo estabilidad de las fibras tratadas y su posible aplicabilidad como material de refuerzo para compuestos con matriz termoestable.

#### 4.5 Modelos numéricos de simulación con materiales compuestos

La comunidad científica actualmente centra su interés en modelos de simulación en elementos finitos (FEM) que contemplen la utilización de materiales compuestos. Los FEM deben considerarse a diferentes escalas, debido a la naturaleza multiescalar del material compuesto: la macroescala para la celda unitaria tejida (mm), la mesoescala para tamaño del hilo ( $10^{-1}$  mm) y microescala para el tamaño de la fibra ( $\mu\text{m}$ ) como se muestra en la Figura 4-6. El uso de estrategias de múltiples escalas se puede dividir en dos tipos: estrategias de cálculos secuenciales e integradas. Con el enfoque secuencial, primero se calcula el modelo a menor escala, seguido de utilizar los resultados para resolver el problema a otras escalas, lo que se ve reflejado en un costo computacional muy alto. Por otra parte, el enfoque multiescala más usado es el de cuadrado de elementos finitos ( $\text{FE}^2$ ), donde se resuelve un problema de menor escala en cada paso de tiempo para cada punto de cuadratura del

problema. En este, se maneja un equilibrio entre los resultados esperados y el costo numérico permitido [56].



**Figura 4-6. Naturaleza multiescalar del material compuesto para modelos de elementos finitos. (a) Compuesto unidireccional y (b) compuesto tejido, fuente: [56]**

Algunos de los trabajos asociados a el uso de modelos numéricos en materiales biocompuestos se mencionan a continuación. J. Shane et al. [57], desarrollaron dos nuevos modelos macro y micrométrico, para caracterizar el comportamiento ortotrópico no lineal de un biocompuesto híbrido con fibras de yute combinadas con vidrio e incrustadas en una matriz polimérica. Realizaron ensayos para determinar las propiedades transversales, axiales y de corte de los compuestos, para alimentar los parámetros no lineales de los modelos numéricos. Además, emplearon fotomicroscopía para caracterizar la microestructura y calibrar el modelo micromecánico. Estos modelos a escala macro y micro fueron implementados en el software ABAQUS y arrojaron resultados beneficiosos para el análisis y diseño de estructuras con materiales biocompuestos que tienen respuesta axial y no lineal. Así mismo, W. Kern et al. [58], utilizaron FEM para evaluar el comportamiento microestructural de los compuestos sólidos y microcelulares de polipropileno con refuerzo de fibras de paja de trigo, contrastados con ensayos mecánicos y microscopia desarrollados de manera experimental. Los modelos fueron desarrollados en software ABAQUS, y estos junto con los datos de tensión deformación y microscopia explican las variaciones en el módulo elástico, la fragilidad y la tensión de la fibra.

En lo que respecta a la aplicación en álabes de aerogenerador empleando materiales compuestos y el modelamiento numérico, se consideran los siguientes trabajos. H. Ullah et al. [59] investigaron el análisis estructural de un álabe de una turbina eólica con materiales compuestos bajo cargas extremas, haciendo énfasis en la resistencia estructural, para su operación segura durante su vida útil. Los análisis fueron realizados con NuMAD que genera un modelo de superficie 3D del álabe que consta de detalles geométricos y materiales de la cuchilla que luego se importaron a software ANSYS para los modelos de elementos finitos. Los resultados arrojaron que la deformación en la punta es similar a la de otros sistemas con

carga extrema y no se presenta choque de la punta con la torre bajo estas condiciones. Además, los niveles de tensión en la mayoría de los componentes están dentro de los límites seguros y las tensiones más altas se pueden reducir aumentando el número de capas de material compuesto en la geometría del álabe. Así mismo, A. Mathew et al. [60], realizaron un análisis de elementos finitos con software ANSYS, para validar la resistencia de un álabe de aerogenerador comparando diferentes materiales con el fin de seleccionar el de mejor desempeño. La geometría del álabe la modelaron en software CATIA V5 y los materiales utilizados fueron: acero estructural, aleación del aluminio, epoxi-carbono, s-glass y e-glass. Concluyeron que de los materiales el epoxi-carbono es el más recomendado para aplicarlo en el álabe del aerogenerador ya que este cumple con los valores mínimos de tensión y deformación al igual que el acero estructural, pero este último se descarta por la influencia de la masa.

Por otra parte, para un análisis con elementos finitos a macro escala, existen diversas herramientas computacionales, una de ellas es llamada “Ansys Composite PrepPost (ACP)”. Esta aplicación del software con elementos finitos ha sido participe en diferentes investigaciones. C. Amaechi et al. [61] presentaron un estudio numérico con materiales compuestos en el módulo ACP, para una aplicación de elevadores en altamar con la variación de 6 casos de carga a tensión. En este análisis utilizaron 18 capas diferentes de material lineales y compuestos unidireccionados. Así mismo, validaron los resultados con estudios obtenidos del modelo de Wang et al. [62], logrando valores de factores de seguridad y una tendencia de comportamiento similares. Estos resultados demuestran que se puede considerar el uso de este tipo de modelos numéricos para aplicaciones estructurales. Por otra parte, H. Tas e I. Soykok [63], mostraron en su investigación, qué se puede lograr un comportamiento similar en los modelos numéricos de la meso-escala con ACP y los ensayos experimentales al examinar el comportamiento a flexión de compuestos de nanotubos de carbono unidireccionales. Además, implementaron dos enfoques teóricos para calcular las propiedades de los compuestos con el modelo de Halpin-Tsai, estudios reportados en la literatura y la regla de mezcla. El error relativo máximo mostrado en este estudio entre los resultados teóricos y numéricos fue de 9.1 %.

Por parte de aplicaciones relacionadas con álabes de aerogeneradores se puede mostrar el estudio de M. Ozyildiz et al. [64], quienes realizaron un análisis numérico con ACP organizando el material compuesto en la geometría de un álabe de aerogenerador. En este modelo utilizan los criterios de falla de Tsai-Wu y Puck, comparando un análisis lineal con uno no lineal para predecir los mecanismos de falla en el álabe. De su trabajo concluyeron que es necesario el uso del modelo no lineal, ya que este se acerca más al fenómeno real, lo que conlleva a una simulación más acertada en términos de falla.

#### 4.6 Aerogeneradores a baja velocidad

Debido a las fluctuaciones en el precio del petróleo, se ha incrementado el interés por la energía eólica como fuente de energía limpia y renovable, por lo que la infraestructura y la producción de energía eólica han tenido un incremento en las últimas décadas; principalmente en países como Alemania, Estados Unidos, Dinamarca y España, mientras que países como India y China están emergiendo como usuarios de la energía eólica. Por lo que la energía eólica representa uno de los sectores más prometedores en energías renovables [65].

Existen dos variables de turbinas eólicas, las de eje horizontal conocidas como HAWT (por sus siglas en inglés) y las de eje vertical VAWT, los más utilizados son los modelos HAWT debido a que fueron los modelos pioneros por lo que su desarrollo se ha profundizado más que los modelos de eje vertical, ya que permiten aprovechar corrientes de aire cuando se ubican entre 40 y 60 metros sobre el suelo y poseen eficiencias muy altas [66]. Sin embargo los aerogeneradores de eje vertical muestran mejores características para ciudades y áreas semiurbanas, aun así las incertidumbres sobre el comportamiento del viento pueden afectar la aplicación del modelo VAWT, por tales razones las investigaciones actualmente se centran en lograr un modelo VAWT más eficiente y factible para cuando se opera con perfiles de viento variables, puesto que el modelo VAWT es capaz de capturar el viento desde cualquier dirección y puede funcionar a velocidades de viento desde 2m/s [67].

Independientemente del modelo utilizado, el perfil de los álabes de las turbinas juega un papel muy importante junto con el flujo a la entrada de la turbina, se prefieren flujos turbulentos pues estos impiden la separación del flujo alrededor del álabes mejorando el rendimiento mecánico y eléctrico de las turbinas, por lo tanto, el objetivo de los álabes es maximizar el coeficiente de potencia [67], [68]. Sin embargo, las turbinas eólicas de gran escala no facilitan el proceso de recolección de datos debido a la falta de capacidad de control, estos generan ruido procedente de su configuración mecánica y de su sistema aerodinámico, además requieren velocidades de viento muy altas para poder inicializar su funcionamiento (entre 10 m/s y 15m/s) [69]. Debido a que las turbinas eólicas grandes y medianas no son económicamente viables cuando se tienen velocidades promedio bajas (de 4m/s a 7m/s), entonces se hace necesario el uso de micro turbinas eólicas [68].

Actualmente es común el uso de materiales compuestos en la fabricación de álabes debido a la reducción del peso hasta en un 80% pero esto generaría un aumento del 150% en el costo, por tal motivo lo recomendable es tener reemplazos parciales, por eso se emplean fibras de vidrio que además proporcionan una alta rigidez, las fibras de vidrio E (es decir, vidrio de borosilicato llamado "vidrio eléctrico" o "vidrio E" por su alta resistencia eléctrica) se utilizan como refuerzo principal en los compuestos. Como alternativa de las fibras de vidrio se emplean las fibras de aramida y basalto que proporcionan alta resistencia mecánica y son más económicas. Una opción interesante para los países en desarrollo que están iniciando la producción de turbinas pequeñas es el uso de fibras naturales, son de bajo costo y dependiendo de su naturaleza pueden proporcionar cualidades como alta resistencia o rigidez, lo que permite mantener el peso del álabes dentro de los parámetros deseados [70], [71]. Las palas de un aerogenerador constan de dos caras: un lado que se encuentra a sometido a una succión que genera levantamiento y el otro a presión que genera arrastre, la carga se debe a la presión del viento, pero además también se involucran las fuerzas gravitacionales y de torsión que generan flexión. Por lo tanto, desde el punto de vista de los materiales, la relación entre rigidez y el peso es fundamental.

#### 4.7 Compuestos en aerogeneradores

La forma en que se ha generado energía ha hecho que se cambie la visión en cuanto a su implementación, actualmente no solo se busca utilizar los recursos disponibles para generar energía, sino además se busca darle un enfoque ecológico. En estos nuevos puntos de vista entra en juego la explotación del viento por medio de turbinas eólicas, estas cuentan con elementos como los álabes fabricados con fibras de vidrio o de carbono con el fin de obtener

una mejor resistencia, bajo peso y alta resistencia a la corrosión. Sin embargo, el uso de estos materiales no es muy práctico a la hora de evaluar sus costos y sobre todo el peligro ambiental que representan. Las turbinas eólicas tienen una vida útil de 20 años, cuando este tiempo se cumple se hace necesario desechar la estructura, por lo que los materiales no biodegradables se convierten en un desperdicio poco beneficioso para el medio ambiente. Por tal motivo, las investigaciones se enfocan en desarrollar materiales biodegradables reforzados con fibras naturales para implementarlos en la fabricación de distintas secciones de las turbinas eólicas [72]. En investigaciones como las de Batu et al., se comprobó que el principal desafío de la producción de álabes para aerogeneradores es lograr reducir el impacto ambiental que involucra su proceso de fabricación. Su estudio, lo realizaron con el fin de minimizar la contaminación por medio del uso de materiales compuestos reforzados con fibras naturales, por tal motivo se evaluaron once compuestos reforzados con fibras naturales en diferentes resinas epoxi. Se analizaron el esfuerzo, la deformación y el peso del álabe bajo distintas cargas para encontrar el tipo de fibra que lograra extender la vida útil de la pala. Para obtener un diseño seguro se deben cumplir estándares de deformación, tensión y principalmente disminuir el peso de las mismas. La ventaja del bajo peso o densidad radica especialmente en vencer la fuerza de fricción y comenzar a girar con velocidades de viento bajas. Cuando se reduce la velocidad de arranque se obtienen mejoras significativas en el rendimiento de la turbina. Las fibras naturales seleccionadas en este estudio demostraron una reducción del peso entre un 28% a un 38% en comparación con la fibra de vidrio, en cuanto a los niveles de tensión y deformación hubo resultados muy similares con respecto a las palas de fibra de vidrio, por lo tanto, el rendimiento mecánico se puede elevar implementando materiales compuestos reforzados con fibras naturales, además de obtener ventajas gracias a la biodegradación de estos materiales [73].

## 5 MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Selección de materiales de partida

Para la matriz, se tomaron tres tipos diferentes de resinas termoestables con la finalidad de identificar cuál de estas es la matriz más adecuada para fabricar un material biocompuesto con fibras naturales. La primera corresponde a una resina poliéster ortoftálica pre-acelerada, que luego debe ser catalizada (iniciada) al 1% en peso con Peróxido de metil etil cetona (MEK peróxido); su elección como candidata a matriz se debió a su bajo costo y disponibilidad. La resina epoxica elegida en segundo lugar, tiene la característica de un desempeño alto para el proceso de infusión con una viscosidad de 125 cPs y está fabricada a base de Bisfenol A modificado y su respectivo endurecedor compuesto de Amina modificado; estos componentes se mezclan en una relación en peso de 100:30 respectivamente, características recomendadas por la empresa nacional Carbon Fiber Stocks de donde se adquirieron estos materiales. Por último, la tercera matriz evaluada fue una resina bioepoxica fabricada con un alto contenido de compuestos biológicos, además de sus propiedades mecánicas; la relación en peso de los componentes como 100: 43 resina: endurecedor según lo expresado en la ficha técnica y es importada de la empresa estadounidense proveedora: Entropy Resins.

En cuanto a las fibras a evaluar, se utilizaron tres tejidos, uno de fique, el segundo de fique-algodón y el tercero de moriche como refuerzos para los biocompuestos. El tejido de fique (Furcraea Cabuya), tiene una configuración de trenzado 0/90° no equilibrado, con doble fibra de urdimbre y fibra individual en la trama. El tejido híbrido de fique-algodón (Furcraea Cabuya-Gossypium Barbadosense), es fabricado en proporción aproximada a 75/25 de porcentaje en peso respectivamente, con una configuración trenzada 0/90° no equilibrado, el fique se encuentra en la dirección urdimbre y el algodón en la dirección trama. Estos tejidos fueron adquiridos de la empresa Ecofibras, cooperativa de artesanos dedicada al diseño y comercialización de productos elaborados con fibra de fique. Por otra parte, el tejido de moriche (Mauritia Flexuosa) tiene configuración 0/90° no equilibrado, las fibras en dirección urdimbre están juntas mientras que las de dirección trama se encuentran separadas. Este tejido fue adquirido desde la amazonia colombiana por medio de artesanos de un resguardo indígena de San José del Guaviare. En la Figura 5-1 se observan los tejidos utilizados, a los cuales se les realizó un proceso de secado en horno de gas a una temperatura de 90° C por 3 horas, con el propósito de controlar la humedad que pudieran absorber.

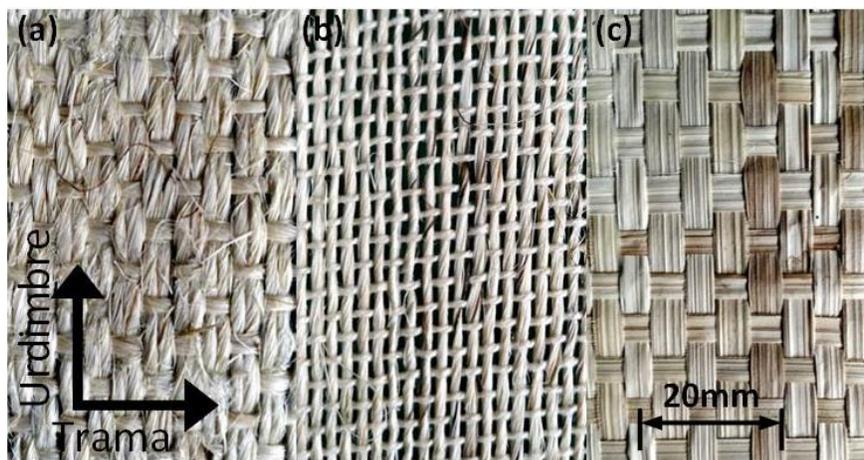


Figura 5-1. Tejidos de fibras naturales, (a) Fique, (b) Fique-algodón y (c) Moriche

A continuación, se presentan en detalle los materiales seleccionados para el diseño de mezclas, con el cual se fabricará el material biocompuesto y que por consiguiente incorporará como refuerzo una fibra natural de origen colombiano. En este sentido, se tuvieron en cuenta criterios de selección basados en propiedades mecánicas (módulo de Young, la resistencia a la tracción y porcentaje de deformación), densidad, costos y disponibilidad como se muestran en la Tabla 5-1.

**Tabla 5-1. Materiales seleccionados para la fabricación de bio-compuesto**

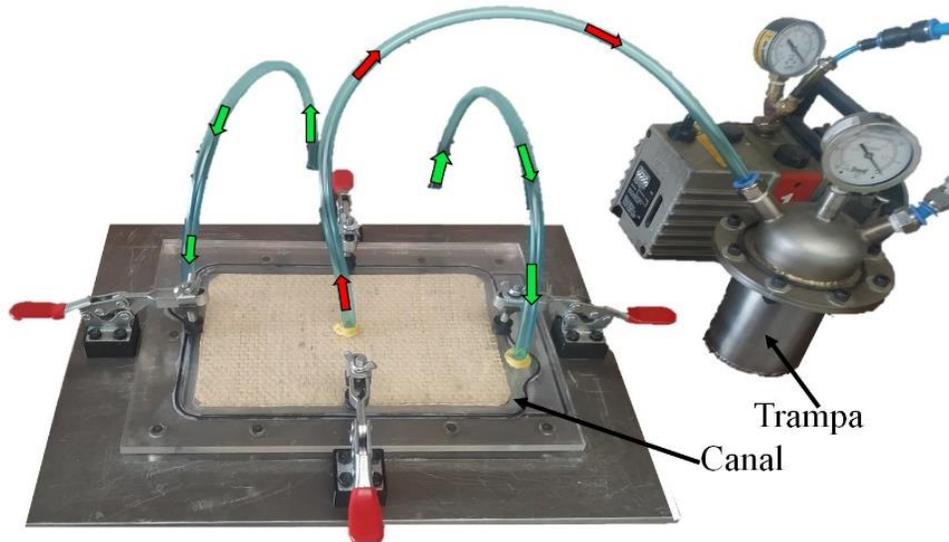
Material	Propiedades mecánicas			Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	Costos para el 2020	Disponibilidad	Fuente
	Módulo [GPa]	Esfuerzo a tensión [MPa]	Elongación [%]				
<b>Resina Poliéster</b>	3.6	45	2.4	1192	36,450 COP/Kg	Alta	Ficha técnica
<b>Resina Epoxi</b>	2.27	49.32	1.23	1073	112,550 COP/Kg	Alta	Ficha técnica
<b>Resina Bioepoxi</b>	3.2	67.6	6	1100	192,475 COP/Kg	Media	Ficha técnica
<b>Fibra de fique</b>	8.2-9.1	132.4	9,8	723	22,500 COP/m <sup>2</sup>	Alta	[74]
<b>Fibra de fique – algodón</b>	-	-	-	-	46,500 COP/m <sup>2</sup>	Media	-
<b>Fibra de moriche</b>	6.73- 12.33	406.63- 763.43	12.97-68.17	950	156,000 COP/m <sup>2</sup>	Baja	[75], [76]

## 5.2 Molde para la fabricación de laminados con el proceso de infusión en vacío

Con el fin de obtener laminados y productos finales de calidad, se fabricó un molde de infusión en vacío para el desarrollo experimental. Este instrumento permitió obtener laminados con condiciones replicables y así fijar un punto de comparación entre los mismos, además siendo infusión en vacío el mismo proceso de fabricación para el alabe final se debe garantizar que las propiedades de los materiales obtenidos serán similares a las del alabe final. Este molde, como se ilustra en la Figura 5-2, permite succionar resina desde el exterior (manguera con flechas verdes) para la impregnación de las fibras iniciando por un canal externo hacia el centro, donde se encuentra una tubería de salida (manguera con flechas rojas) que posteriormente deposita el exceso de la resina en un recipiente (trampa de resina) para evitar que llegue a la bomba de vacío.

El molde está diseñado para sellar herméticamente hasta una presión definida según las condiciones de procesamiento gracias a unos empaques tipo oring posicionados en los componentes móviles. De tal manera, se realizó una transferencia de resina que permitió impregnar de forma controlada las fibras naturales hasta obtener una superficie plana y homogénea con una sección transversal constante y dimensiones de 27 cm de largo por 18 cm de ancho y un espesor máximo de 1cm en el laminado. Se utilizó una bomba de vacío de

1.5 cmf que permitió seleccionar presiones de vacío en un rango de 0 a 0.8 bar de acuerdo con la fase de fabricación de biocompuestos.



**Figura 5-2. Molde para el proceso de infusión en vacío**

### 5.3 Fabricación de materiales biocompuestos

Los laminados se fabricaron con dos capas de los distintos tejidos de fibras naturales orientadas 0/90°. El objetivo de la configuración consistió en establecer un punto de comparación entre los diferentes compuestos debido a que todos los refuerzos estaban direccionados. Además, los tejidos representan diferencias significativas en las dimensiones, disposición y superficie de las fibras de acuerdo con las especificaciones de los proveedores. El proceso de fabricación de los biocompuestos se realizó a una temperatura ambiente de 20° C y tiempo de curado de 18 horas en el molde.

De acuerdo con lo anterior, se fabricaron nueve materiales biocompuestos para un primer análisis de interacción de las combinaciones de las tres fibras (fique, fique-algodón y moriche) y las tres resinas (poliéster, epoxi y bioepoxi). A estos materiales, se les realizaron ensayos mecánicos de tracción y se definieron criterios de selección para elegir el material con las mejores características y propiedades que pueda tener el mayor potencial para ser utilizado en la fabricación de las palas de un aerogenerador. En un segundo análisis, se fabricaron 3 laminados para evaluar los efectos del vacío de 0, 0.4 y 0.8 bar en el proceso de fabricación de los compuestos epoxi/fique. De estos materiales, se definió el mejor sistema por medio de ensayos de caracterización mecánica, térmica y morfológica. Para el sistema de 0 bar, el proceso de aplicación de vacío consistió en hacer la infusión teniendo el cuidado de sellar el ducto de succión en la trampa antes de terminar la impregnación, así se logró una estabilidad del laminado sin presión y totalmente impregnado. Para los otros sistemas, luego de tener el laminado totalmente impregnado se selló la entrada de resina y se siguió aplicando vacío hasta llegar a las presiones deseadas. Para un tercer análisis se fabricaron compuestos con resina epoxica y tejidos de fibras de fique con tratamiento químico, con el fin de establecer el cambio que produce este tratamiento sobre las propiedades mecánicas. Se obtuvieron un total de 13 laminados de biocompuestos con porcentajes en peso de fibra natural indicados en la Tabla 5-2. Estos porcentajes se calcularon midiendo el peso inicial de

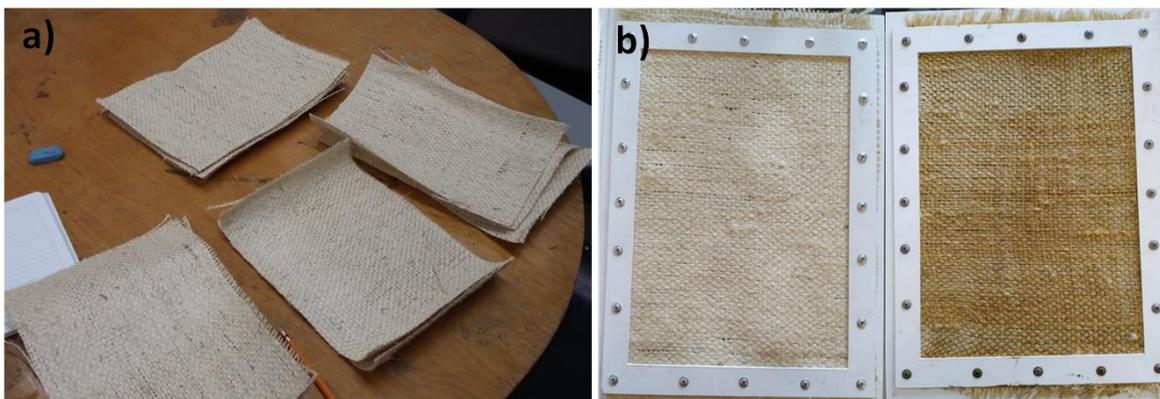
los tejidos de fibra natural para luego relacionarlos con el peso total del laminado al cortar los bordes de exceso de resina.

**Tabla 5-2. Porcentajes en peso de fibra de los biocompuestos.**

Matriz / Refuerzo	Fase de selección			Caracterización al variar el vacío		Tratamiento químico	
	Fique [% Peso]	Fique- Algodón [% Peso]	Moriche [% Peso]	Vacío [bar]	Epoxi / Fique [% Peso]	T. de Tratamiento [min]	Epoxi / Fique [% Peso]
Poliéster	31	23	19	0	33	Sin trat	-
Epoxica	31	23	21	0.4	31	30	31
Bioepoxica	30	25	20	0.8	31	60	29

#### 5.4 Tratamiento químico de las fibras naturales

Se llevó a cabo un tratamiento químico a los tejidos de fibra natural de fique con el objetivo de eliminar componentes de lignina y hemicelulosa ya que estos no contribuyen al compuesto con resina epoxica por su poca compatibilidad. Para tal propósito, se utilizó una solución de NaOH a una concentración constante de 20 % en peso/volumen por periodos de tiempo que variaron en 30, 60 y 120 minutos. Este proceso de alcalinización se realizó recortando los tejidos de fique a un tamaño de 30 x 45 cm como se muestra en la Figura 5-3 a), estas medidas se tomaron aumentadas para contrarrestar la reducción de la longitud de las fibras que se requieren bajo el tamaño del molde (18 x 27 cm). Para prevenir las arrugas producidas por la reducción de los tejidos, se enmarcaron las fibras naturales con un soporte de marco en los extremos como se muestra en la Figura 5-3 b), donde se muestra el tejido antes y después del tratamiento.



**Figura 5-3. Tratamiento químico de fibras naturales. a) corte y b) fibras enmarcadas antes (izquierda) y después (derecha) del tratamiento con solución de NaOH**

Se determinó un peso promedio de 85 g para los tejidos y se fijó una relación de fibra/mezcla de 1:15 en peso/volumen (g/ml) para determinar la cantidad de solución. Así, para los tejidos se preparó una solución con 1275 ml de H<sub>2</sub>O y 255 gr de NaOH, en la cual se sumergieron los tejidos y se dejó actuar por 30 minutos, este procedimiento se repitió para 60 y 120 min, para posteriormente lavarlos con abundante agua. Seguidamente, se mide el PH de los tejidos inmersos en agua, con lo cual se adiciona ácido acético rápidamente para luego volver a lavar, esta acción se repite hasta neutralizar las fibras. Finalmente, los tejidos se secaron a

temperatura ambiente por 24 horas y luego en horno a 120 °C durante 3 horas con el fin de eliminar humedad.

## 5.5 Ensayos de caracterización de materiales

### 5.5.1 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

El análisis de la morfología tanto de las fibras naturales como de los biocompuestos se llevó a cabo con un equipo SEM termoiónico JEOL-JSM 6490LV a un voltaje acelerado de 20 KV, con preparación de metalización de las muestras. Para las fibras naturales se realizó un análisis de la estructura en forma longitudinal y transversal, para establecer una comparación de sus estructuras microscópicas. De otro lado para los biocompuestos, se evaluó la interfaz fibra/matriz, donde intervino la variación del vacío en el proceso de impregnación manual asistida con vacío y el efecto de la manufactura con infusión en vacío en la fabricación del material.

### 5.5.2 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Por medio de la espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier FTIR, se evaluó la estructura química de las fibras de fique, fique-algodón y moriche. Se utilizó el espectrómetro ThermoFisher ATR iS50, con resolución de 0.5 cm<sup>-1</sup> y rango de frecuencia 4000-500 cm<sup>-1</sup>, operando en modo de reflectancia total atenuada ATR.

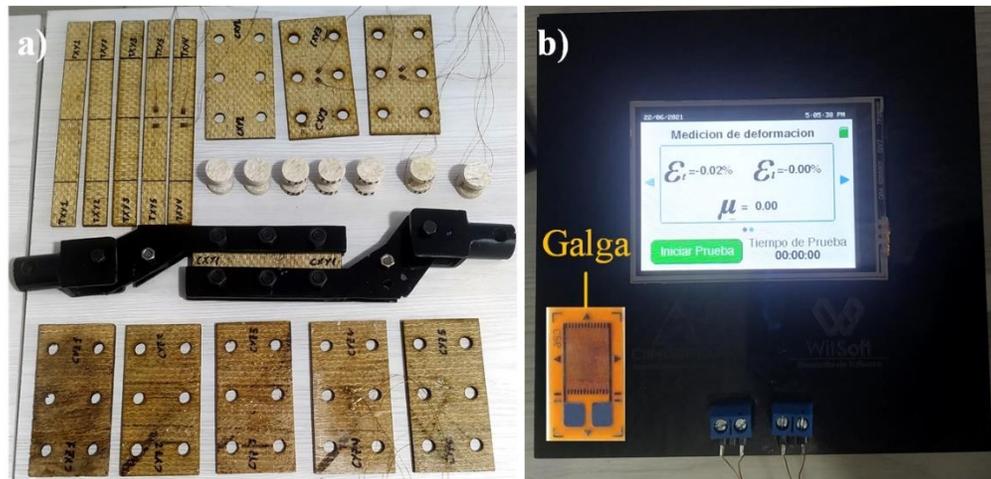
### 5.5.3 Análisis termogravimétrico (TGA)

Se utilizó análisis termogravimétrico para medir las transiciones térmicas de las fibras y los biocompuestos, para tal propósito se usó el equipo TGA Q500 a una velocidad de calentamiento de 10°C/min. Se programó una rampa de calentamiento desde temperatura ambiente hasta de 600°C con un flujo de nitrógeno de 50 ml/min.

### 5.5.4 Caracterización mecánica

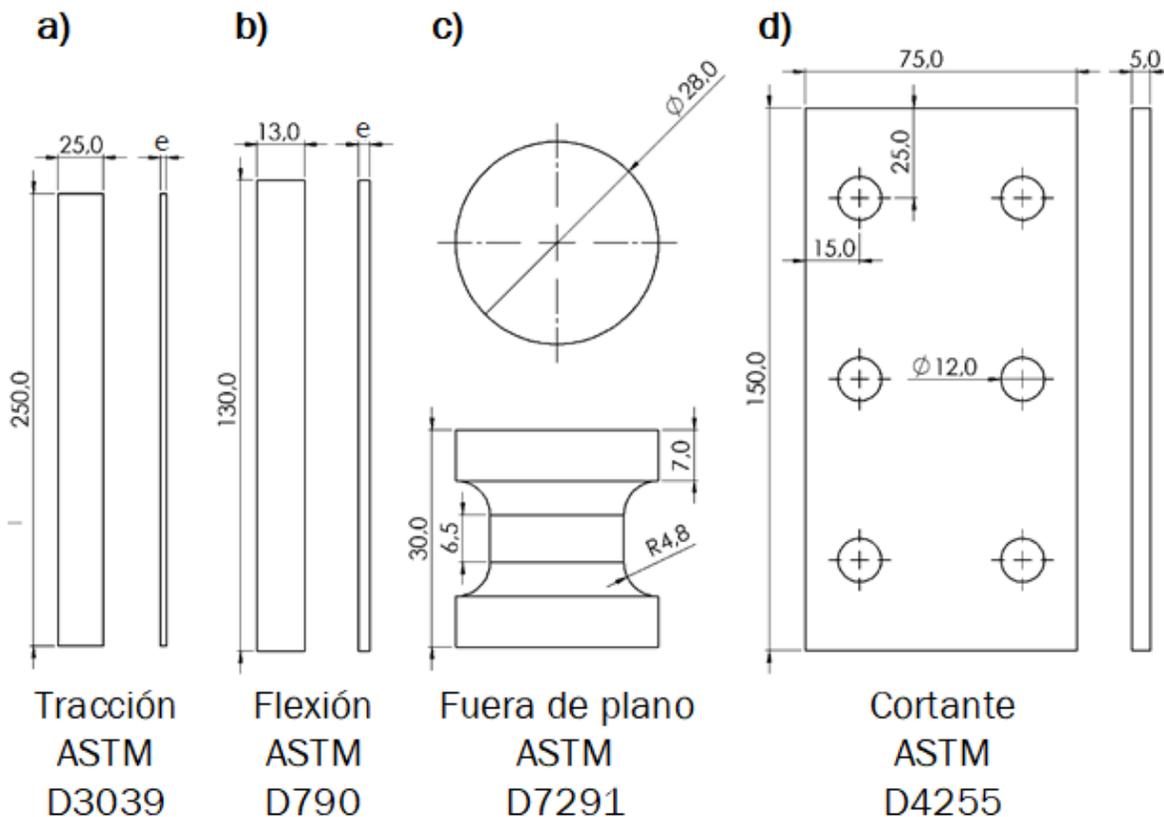
Se determinaron propiedades mecánicas de los materiales biocompuestos, para esto se utilizó una máquina universal Shimadzu serie UH-I y los accesorios correspondientes. Se realizaron ensayos de tracción bajo norma ASTM D3039 con una velocidad de avance de 2mm/min para cada configuración. Además, se realizaron ensayos de flexión en tres puntos bajo la norma ASTM D790 la velocidad de las pruebas se determinó con la ecuación  $R=ZL^2/6d$  para cada muestra con una longitud de soportes de 80 mm.

Para conocer las propiedades orto trópicas del biocompuesto Epoxi/Fique en su totalidad, se probaron además de los ensayos anteriores, mediciones a tracción fuera de plano de acuerdo con la norma ASTM D7291 a una velocidad de avance de 1 mm/min. De otro lado se realizaron ensayos de cortante en dirección xy y xz con forme a la norma ASTM D4255 con velocidad de avance de 5 mm/ min, estas muestras se ven representadas en la Figura 5-4 a). Para complementar este análisis, se construyó un dispositivo de medición para determinar la deformación ver Figura 5-4 b) que se apoya en galgas extensiométricas para relacionar su cambio de resistencia con cambios dimensionales de las probetas (deformación) y de esta forma conocer la deformación en las diferentes direcciones del material y obtener el coeficiente de Poisson.



**Figura 5-4. Preparación para caracterización de propiedades ortotrópicas de los laminados. a) probetas de tracción en el plano, fuera de plano y ensayo de esfuerzo cortante b) dispositivo de medición de deformación con galgas extensiométricas.**

Para todos los ensayos se registraron condiciones del ambiente con una temperatura alrededor de 20°C, además se fabricaron probetas para un total de 5 ensayos por material. En la Figura 5-5 se observa todas las geometrías de las muestras para los distintos ensayos junto a la norma correspondiente, la letra e simboliza el espesor que varía dependiendo del tipo de biocompuesto.



**Figura 5-5. Geometría de las probetas para los diferentes ensayos de caracterización mecánica. a) Tracción, b) Flexión, c) Fuera de Plano y d) Cortante. Todas las medidas están dadas en mm.**

## 5.6 Simulación estructural del ábabe de aerogenerador

Para abordar esta sección, se recibe un diseño de álabes de un aerogenerador de eje vertical que corresponden a un perfil aerodinámico multielemento optimizado, como se muestra en la Figura 5-6. Esta geometría, está compuesta por 4 álabes organizados en un par de álabes grandes y un par de pequeños para completar el multielemento simétrico en un eje central.

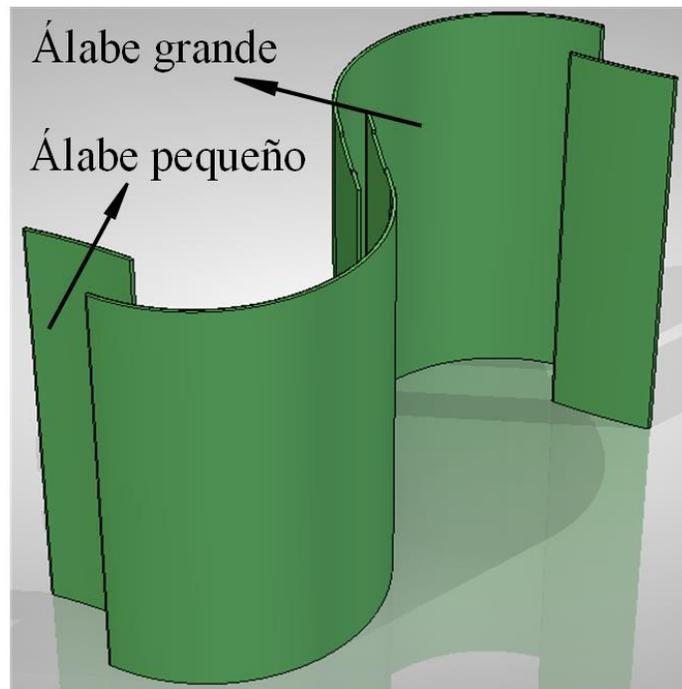


Figura 5-6. Álabes que componen el perfil aerodinámico multielemento.

Por medio de análisis numérico, se realizaron simulaciones utilizando el software ANSYS 2020 R2 con el apoyo de una licencia de investigación para este módulo, donde se estableció el comportamiento de los materiales biocompuestos en el ábabe de un aerogenerador de baja potencia. Se utilizó el módulo de ACP (Pre) para analizar la influencia del direccionamiento de tres láminas compuestas de Epoxy/Fique que conforman el laminado de los álabes de una sección de un generador de eje vertical. El modelo numérico está compuesto de 3 fases (A, B y C) como se muestra en la Figura 5-7, donde se realizaron 9 simulaciones sin modificar la configuración de la sección de fluidos (A) y estática estructural (C).

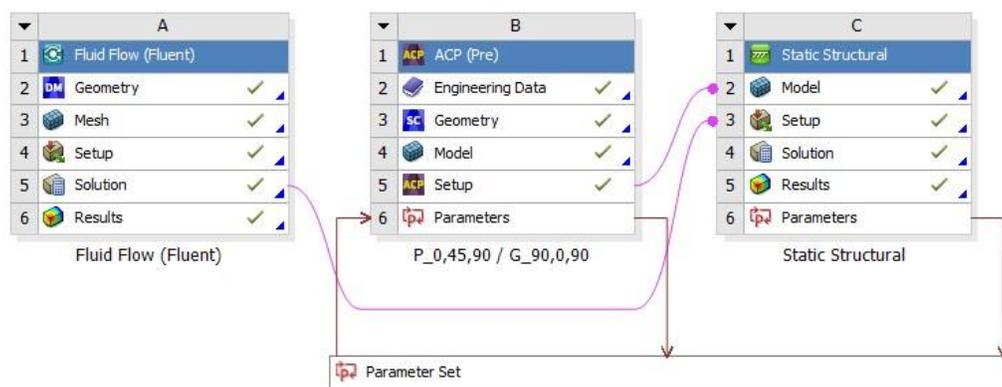
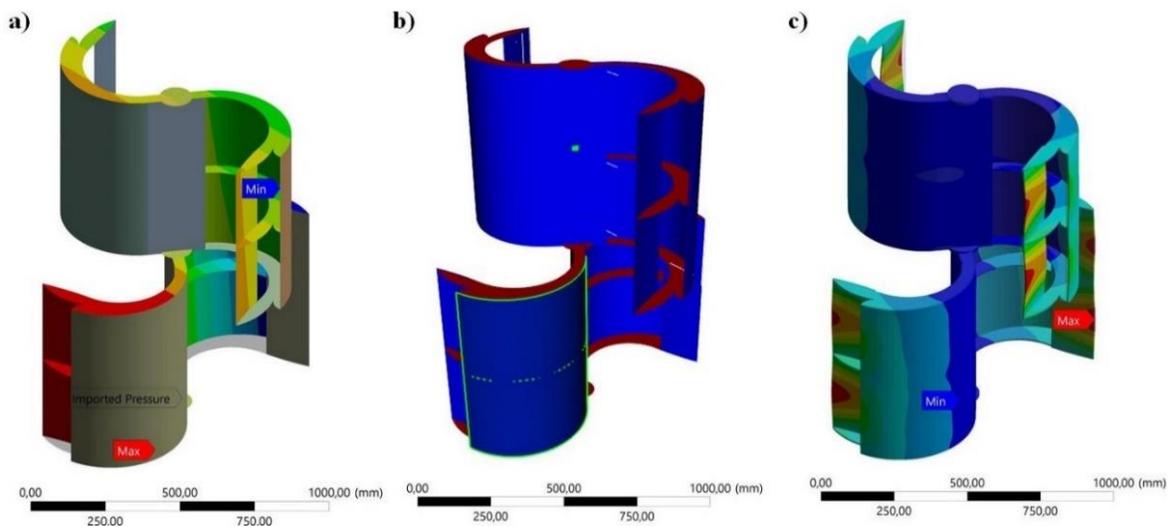


Figura 5-7. Modelo numérico compuesto de 3 fases

En una primera fase como se muestra en la Figura 5-8 a), se realizó una simulación que consta de un análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) utilizando el método de volúmenes finitos, el cual analiza el comportamiento del fluido circundante en la superficie del alabe. Con este modelo numérico se obtiene las cargas o presiones a las que esta sometidos los álabes del aerogenerador. El análisis estático estructural ver Figura 5-8 c), se enfocó en el estudio la deformación total, el esfuerzo y el factor de seguridad en los álabes. La configuración de estas dos fases del modelo, incluyendo la geometría son extraídas bajo el consentimiento del trabajo de Luis Antonio Gallo Jaramillo (# ORCID: 0000-0002-8858-4877), quien hace parte del proyecto general como investigador en la línea de diseño de un generador de eje vertical para bajas velocidades de viento y dentro del cual se encuentra también enmarcada este trabajo de maestría.



**Figura 5-8. Fases del modelo numérico. a) Dinámica de fluidos, b) ACP (Pre), c) Estático Estructural.**

Para la configuración correspondiente a la fase del material compuesto Figura 5-8 b), se alimentó el material del modelo con las propiedades mecánicas obtenidas del desarrollo experimental del compuesto y se transformó la geometría a un total de 20 superficies. El mallado se configuró con un control de tamaño en las caras y un tamaño de elemento de 1mm para un total de 2'891,602 nodos y 2'887,646 elementos. Posteriormente, se adaptó el entorno del setup de ACP donde se determinó los diferentes materiales con el ordenamiento de las láminas y el direccionamiento de las geometrías. La variable de estudio fue la dirección de la lámina compuesta Epoxi/Fique con propiedades ortotrópicas en las geometrías de los álabes, para determinar la orientación de tres de estas laminas en el laminado final y su influencia en la resistencia y deformación tanto del álabes pequeño como el grande.

### 5.7 Fabricación de prototipo de álabes

Se fabricó un álabes con el proceso de infusión en vacío, con el cual se permite la reproducción estándar de la geometría propuesta. El alcance inicial de este prototipo se tenía contemplado hasta la fabricación de un solo álabes, sin embargo, se logró fabricar toda una sección del aerogenerador, que está compuesta a su vez de dos alabes pequeños y dos grandes, obteniendo al final un producto funcional terminado.

El desarrollo de este álabe se inició con la fabricación de los modelos en madera a tamaño real con preparación de la superficie, pintura y acabados tipo espejo. Esto permitió continuar con la fabricación de los moldes correspondientes que tenían dos capas de gelcoat en la superficie, refuerzo en fibra de vidrio y la parte estructural en madera. Con estos moldes y la correcta preparación se fabricaron los álabes de material biocompuesto Epoxi/Fique y se ensamblaron en una sección que contempla el perfil aerodinámico de multielemento. Los acabados finales de los álabes son tipo gelcoat con protección a los rayos ultravioleta y la humedad, para brindar una mayor funcionalidad en ambientes naturales. Más detalles de este proceso se muestran en la sección de resultados y análisis.

## 6 RESULTADOS Y ANÁLISIS

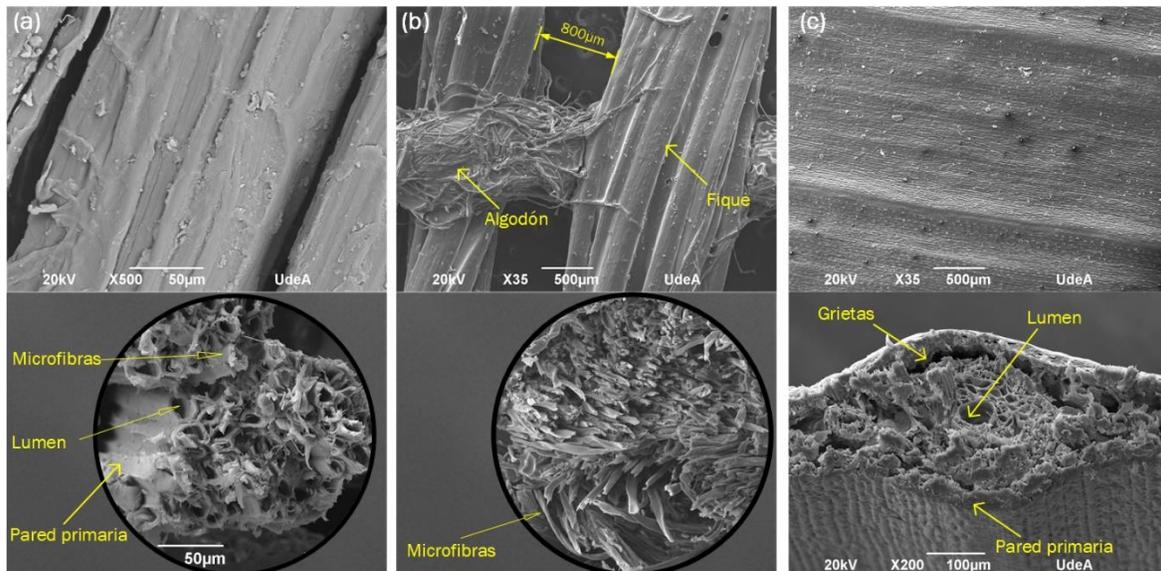
### 6.1 Selección de los materiales

Para la selección de los materiales con los que se fabricaron los álabes del aerogenerador, se contaron con diferentes etapas. Se inició con un análisis de caracterización de las fibras naturales debido a la importancia de conocer el comportamiento de estas especies, para posteriormente realizar las mezclas con las diferentes resinas. Seguido, se realizó una caracterización mecánica a tracción de los compuestos en el cual se realizaron diferentes combinaciones con las 3 fibras naturales colombianas y las 3 resinas disponibles, para luego emplear una matriz de selección y definir el sistema de material biocompuesto más indicado para la aplicación. A continuación, se detalla este proceso:

#### 6.1.1 Caracterización de las fibras naturales

##### *Análisis morfológico de las fibras por SEM*

Se realizó un análisis con microscopía electrónica de barrido a las diferentes fibras naturales en la sección transversal y longitudinal, con el fin de diferenciar la morfología y el estado de los tejidos. En la Figura 6-1 a) se muestra la micrografía SEM de las fibras de fique, en la cual, la fibra individual tiene una superficie compacta con ausencia de fibrilación. Estas fibras están espaciadas unas de otras a una distancia de 10  $\mu\text{m}$  aproximadamente, adicionalmente se observan rugosidad sobre la superficie con algunas impurezas y material ceroso típico de las fibras naturales crudas [77]. Por otro lado, se analizó la sección transversal de las fibras, en donde se aprecia las paredes celulares de las microfibrillas rodeadas por su correspondiente lumen, en la cual se evidencia una estructura propia de la naturaleza de las fibras naturales [78]. En consecuencia, las fibras muestran una forma irregular que tiende a circular, con un orificio central de espesor de pared, de entre 1 y 10  $\mu\text{m}$  y diámetro de lumen entre 0.1 y 20  $\mu\text{m}$ , similares a otras fibras [79].



**Figura 6-1.** Micrografías de las fibras naturales en dirección longitudinal (superior) y transversal (inferior) de, a) fique, b) fique-algodón y c) moriche.

Para los tejidos de fique-algodón, como se muestra en la Figura 6-1 (b), se observa el fique en dirección vertical y el algodón configurado horizontalmente con un espacio considerable entre hilos a una distancia aproximada de 800  $\mu\text{m}$ . Este material presenta una gran cantidad de impurezas adheridas en la superficie de las fibras, ya que el tejido está recubierto con una capa de material ceroso no celulósico. Con relación a este fenómeno se reportó un comportamiento similar en la investigación de Y. Li et al. [80], quienes estudiaron la morfología de las fibras de cañamo. A diferencia de las fibras de fique, el algodón presenta microfibrillas individuales y desordenadas, sin unión superficial, con diámetros menores.

El moriche presenta morfológicamente, una superficie amplia, lisa y compacta en lo que respecta a la pared primaria de las fibras como se muestra en la Figura 6-1 (c), con una medida de su ancho aproximada de 4 a 5  $\mu\text{m}$ , pero internamente muestra una configuración dividida en microfibrillas alrededor de un lumen central de tamaño considerable (ver sección transversal). Además, se logran observar una serie de grietas entre las microfibrillas centrales y el conjunto de la pared celular primaria que sumado a la superficie poco rugosa podría afectar la compatibilidad con la matriz y en consecuencia el desempeño del compuesto.

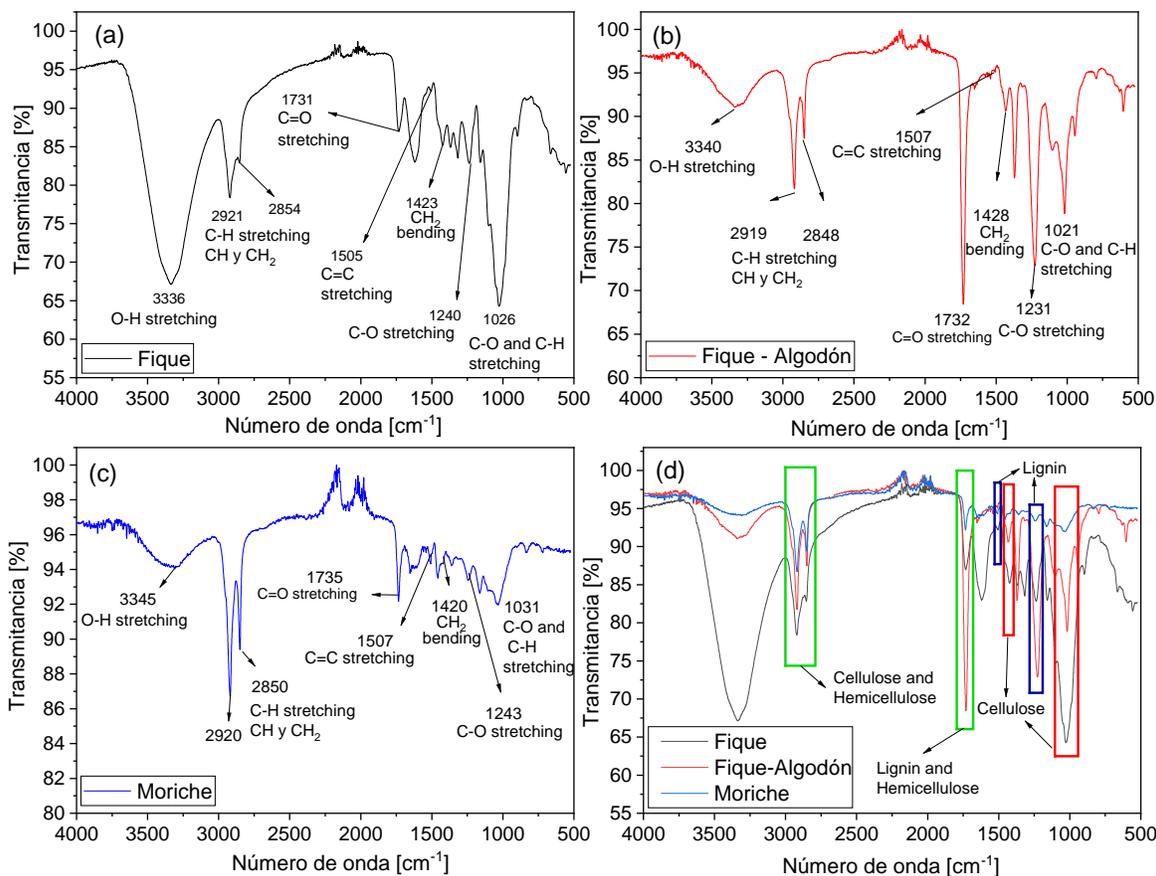
En general, al observar la morfología y disposición de las fibras naturales, se prevé que el mejor comportamiento podría presentarse en los compuestos que contienen el tejido de fique, que con respecto al moriche presenta una mayor superficie rugosa que actuaría como un área de anclaje más eficiente con la resina. Así mismo, el fique muestra una mejor configuración con un tejido más compacto y denso comparado con el de fique-algodón, el cual presenta también un mayor número de impurezas.

#### *Evaluación composicional por FTIR y TGA*

Se analizaron las estructuras químicas de las fibras naturales mediante FTIR ATR, con los espectros mostrados en la Figura 6-2, en esta se relaciona: a) fique, b) fique-algodón, c) moriche y d) la agrupación de todas. En estas se muestran las bandas más significativas de transmitancia de grupos químicos característicos de fibras lignocelulósicas.

En general para todas las fibras se puede identificar una banda amplia en la región de 3600-3100  $\text{cm}^{-1}$  correspondiente a la vibración de estiramiento O-H del enlace hidrógeno de los grupos hidroxilo [81], [82]. Esta banda centrada alrededor de los 3340  $\text{cm}^{-1}$  es más intensa para el fique, seguido por el fique-algodón y tenue para el moriche. Los picos alrededor de 2920 y 2859  $\text{cm}^{-1}$  son característicos de vibración de estiramiento C-H de CH y CH<sub>2</sub> en componentes de celulosa y hemicelulosa [83], [84]. Estos muestran un cambio bajo de intensidad al compararlo entre las fibras, siendo el de fique el de la mayor intensidad. Cerca de los 1730  $\text{cm}^{-1}$ , se observa vibración de estiramiento del grupo carbonílico C=O, que hace referencia al ácido carboxílico en la lignina o el grupo éster en la hemicelulosa [85]–[87]. Para este grupo funcional, la mayor intensidad se presenta el fique-algodón seguido del fique y moriche respectivamente. La pequeña banda alrededor de 1507  $\text{cm}^{-1}$ , se puede atribuir al estiramiento C=C del anillo aromático [79] y cercano a 1240  $\text{cm}^{-1}$  en el cual está asociado con la vibración de estiramiento C-O del grupo acetilo [87]. En consecuencia, en este pico se observa mayor cantidad de lignina en las fibras de fique-algodón, seguido del fique y el moriche que muestran poca intensidad. El pico próximo a los 1425  $\text{cm}^{-1}$  que corresponde a la flexión simétrica del CH<sub>2</sub> [88], y la banda con alta intensidad cercana a los 1035  $\text{cm}^{-1}$  se

relaciona a la vibración de estiramiento del enlace C-O y C-H [89]. Ambos pertenecen a la celulosa, mostrando mayor intensidad para las fibras de fique, seguido del fique-algodón y el moriche.



**Figura 6-2. FTIR de las fibras de fique, fique-algodón y moriche.**

En las curvas de pérdida de masa (ver Figura 6-3), se puede identificar una primera pérdida atribuida a la evaporación de la humedad, en donde se observa que la fibra de moriche es más afectada con un 6% en comparación con el fique algodón con un 5.2% y el fique con un 4% en un rango de temperatura de 35 a 100° C. Seguido de esta, se observa una pérdida significativa de masa en el rango de 200 a 400°C asociada con los componentes primarios de la fibra natural como la lignina, celulosa y hemicelulosa. Por otro lado, se evidencia una mayor estabilidad térmica para las fibras de fique y fique-algodón en comparación con las de moriche, estas últimas soportan menor temperatura en un valor promedio de 20°C.

Con lo que respecta a las curvas de la primera derivada, se evidencian cuatro picos característicos, el primero se asocia con la eliminación del agua en el cual se muestra más pronunciado para la fibra de moriche. A una temperatura promedio de los 290°C se observa el segundo pico atribuido a la despolimerización térmica de hemicelulosas y pectina y los enlaces glicosídicos de la celulosa [90]. Un tercer pico entre los 345 y 360 °C se debe a la degradación de la celulosa [91], el cual se aprecia con mayor intensidad para el fique, seguido del fique-algodón y de menor tamaño para el moriche. Al final se presenta un pico que corresponde con la descomposición final de la lignina en el rango de los 400 a los 450°C,

fase que se degrada en todo el rango de temperatura [40]. Barbosa et al. presenta resultados similares de esta caracterización de la fibra de moriche [92].

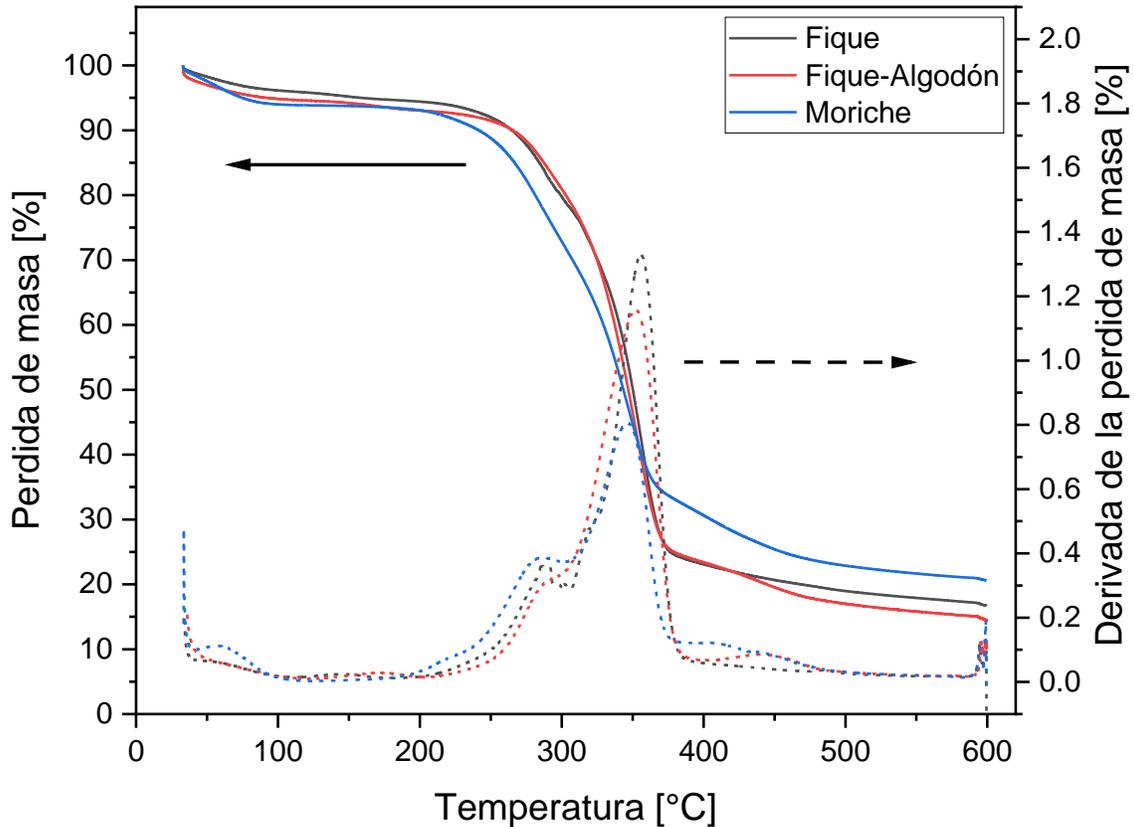
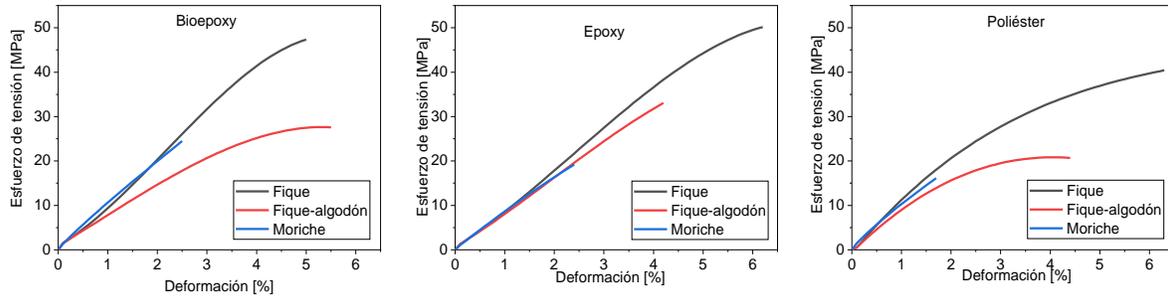


Figura 6-3. Análisis TGA de fibras naturales

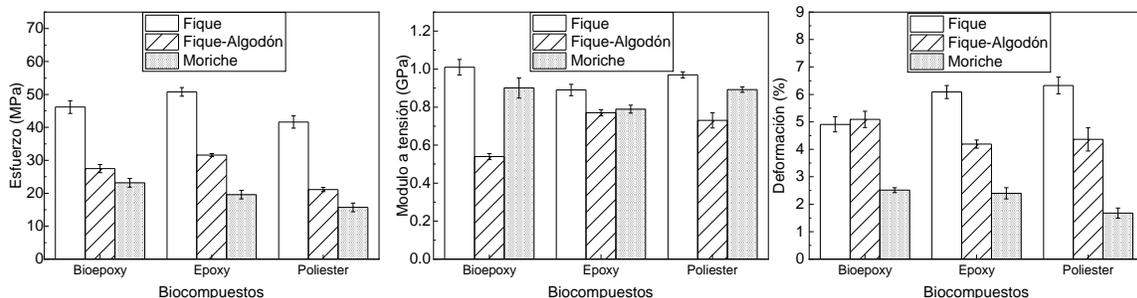
### 6.1.2 Caracterización mecánica de los diferentes sistemas resina/fibra

Se realizaron ensayos mecánicos de los materiales biocompuestos, estos están conformados por tres resinas (poliéster, epoxica y bioepoxica) como matriz y tres configuraciones de tejidos de diferentes fibras naturales (fique, fique-algodón y moriche) como refuerzo, a una presión de vacío de 0.4 bar. Cada configuración de tejido consta de dos tejidos de la misma fibra natural con una variación en la disposición de 90 grados uno del otro, esto para mostrar un sistema equilibrado para fines comparativos entre las diferentes fibras naturales. Haciendo el respectivo análisis, se presenta un comportamiento elástico lineal frágil, que es característico de compuestos con matriz termoestable [93], [94]. Estas tendencias del ensayo a tracción se muestran en la Figura 6-4, donde se muestran los diagramas esfuerzo vs deformación de las nueve combinaciones divididas por el tipo de matriz, a) Bioepoxi, b) Epoxi y c) Poliéster.



**Figura 6-4. Diagramas esfuerzo vs deformación de los biocompuestos según el tipo de matriz, a) Bioepoxi, b) Epoxi y c) Poliéster.**

De igual manera, se evaluó el comportamiento mecánico para cada una de las configuraciones, con el estudio de las propiedades de esfuerzo, la rigidez y la deformación. La Figura 6-5 a) muestra los resultados de esfuerzo en donde se evidencia un mejor desempeño para los biocompuestos fabricados con fique, seguido del fique-algodón y por último el moriche. Esos resultados muestran un efecto significativo al variar de igual forma el tipo de matriz, donde el sistema fabricado con resina epoxica tiene los valores más altos de resistencia. Así, entre los mejores comportamientos de esfuerzo al variar la matriz, se obtuvo el mejor resultado para epoxi/fique con un valor de  $50.7 \pm 1.3$  MPa, siendo 8.9% mejor que bioepoxi/fique el cual arrojo  $46.2 \pm 1.9$  MPa y 17.9% mejor que poliéster/fique con un total de  $41.6 \pm 1.8$  MPa.



**Figura 6-5. Resultados de ensayos mecánicos a biocompuestos con diferente matriz, a) esfuerzo, b) módulo a tensión y c) deformación.**

Los valores del módulo a tensión se observan en la Figura 6-5 b), en los cuales se evidencia una rigidez mayor para los biocompuestos fabricados con fique, seguido del moriche y por último el fique-algodón. En lo que respecta al tipo de matriz con la fibra de fique y moriche, la resina bioepoxi arroja los mejores resultados seguido del poliéster y por último en esta propiedad el epoxi. Los valores del comportamiento de la pendiente de elasticidad son superiores para el compuesto bioepoxi/fique con  $1.01 \pm 0.041$  GPa, siendo este 3.6% superior a poliéster/fique con  $0.975 \pm 0.016$  GPa y 12.1% mejor que epoxi/fique con  $0.889 \pm 0.03$  GPa. Para el porcentaje de alargamiento, ver Figura 6-5 c), se comprueba que la deformación es mayor para las placas fabricadas con tejido de fique al usar las resinas de poliéster y epoxi respectivamente, sin embargo, el compuesto con fique algodón presenta la mayor deformación al combinarla con la resina bioepoxi. Para esta propiedad el valor más alto al comparar entre los diferentes tipos de fibras fue el de poliéster/fique con un total de  $6.3 \pm$

0.3%, siendo mayor un 3.2% mejor que epoxi/fique con  $6.1 \pm 0.2\%$  y por último a 19% mayor que bioepoxi/fique-algodón con  $5.1 \pm 0.3\%$  de deformación. Estos resultados muestran al biocompuesto epoxi/fique como el material con mayor resistencia a la tracción, el biocompuesto bioepoxi/fique con la mayor rigidez y el material de poliéster/fique con la mayor deformación. En términos generales, el tejido de fique es la fibra natural con mayores prestaciones en propiedades mecánicas a tensión, tal como se predijo en el análisis morfológico el tejido presenta mejores zonas de anclaje en la interfase al compararlo con el moriche y es más compacto y denso contrastándolo con el fique algodón. Así mismo, en el análisis composicional se identificó mayor cantidad de celulosa en los tejidos de fique a comparación de los otros tejidos, por esto se asume que este componente permitió evidenciar valores mayores de resistencia y rigidez.

Sin embargo, es necesario un análisis para seleccionar el tipo de matriz para establecer el compuesto con mejores prestaciones en la aplicación del álabe.

#### *Selección del material biocompuesto para la posterior fabricación del álabe*

En concordancia con la caracterización anterior, se realizó una matriz de selección (Ver Tabla 6-1) de todos los laminados, además del criterio de propiedad mecánica ya definido, se utilizó el costo, la disponibilidad y el menor impacto ambiental de los materiales. Así en este ejercicio, se asignaron notas de evaluación del 1 al 9 a cada sistema y se otorgó un peso a cada variable asumiendo la importancia de esta en la aplicación de construcción de álabes de aerogenerador. El criterio de costo fue evaluado con los precios de adquisición de los materiales con un peso de 15 % en la matriz de selección, siendo las peores notas para las mezclas con resina bioepoxi al ser 41.5 % más costosa que la epoxica y 79.21 % que el poliéster. Así mismo la fibra natural con mayor valor en el mercado fue el moriche con 70.2 % más coste que el fique algodón y 85.6 % más precio que el fique. En este contexto, la puntuación mayor la obtuvo el sistema Poliéster/Fique por ser el biocompuesto más económico hasta la evaluación menor para el compuesto Bioepoxi/Moriche. Por otra parte, con un peso de 25 % la disponibilidad de la mayoría de los materiales es buena, ya que estos se encuentran en el mercado nacional con empresas constituidas, excepto la resina bioepoxica que por sus componentes es necesario importarla de una empresa estadounidense y la fibra menos asequible corresponde al tejido de fibra de moriche que es fabricado en un resguardo indígena ubicado en San José del Guaviare sobre pedido. En este aspecto, las peores calificaciones fueron para los biocompuestos con moriche y la mejor puntuación la comparten los 4 biocompuestos fabricados con los materiales de buena disponibilidad. A las propiedades mecánicas se les asignó un peso de 50% por su implicación directa en el desempeño mecánico del aerogenerador, siendo los compuestos con tejido de fique los mejor valorados y Poliéster/Moriche el material de menor puntuación. Para finalizar, se asignó un criterio de menor impacto ambiental que relaciona directamente la procedencia de las resinas y su impacto a la hora de producirlas sin tener en cuenta los materiales de refuerzo ya que su procedencia es de origen natural. La resina bioepoxica fue la de mejor calificación ya que en su fabricación se usan insumos en cierto porcentaje de origen natural, seguido del poliéster y de último en puntuación la resina epoxica.

**Tabla 6-1. Matriz de selección del material biocompuesto.**

Variable	Costo del material		Disponibilidad		Propiedades mecánicas		Menor impacto ambiental		Total
Peso [%]	15		25		50		10		100
	Nota	Nota P.	Nota	Nota P.	Nota	Nota P.	Nota	Nota P.	
Bioepoxi / Fique	3	0,45	6	1,5	8	4	8	0,8	6,75
Bioepoxi / Fique- Algodón	2	0,3	6	1,5	5	2,5	8	0,8	5,1
Bioepoxi / Moriche	1	0,15	3	0,75	2	1	8	0,8	2,7
Epoxi / Fique	6	0,9	9	2,25	9	4,5	3	0,3	7,95
Epoxi / Fique- Algodón	5	0,75	9	2,25	6	3	3	0,3	6,3
Epoxi / Moriche	4	0,6	4	1	3	1,5	3	0,3	3,4
Poliéster / Fique	9	1,35	9	2,25	7	3,5	5	0,5	7,6
Poliéster / Fique- Algodón	8	1,2	9	2,25	4	2	5	0,5	5,95
Poliéster / Moriche	7	1,05	4	1	1	0,5	5	0,5	3,05

En la matriz de selección, se determinó que el fique es la fibra natural más indicada para la fabricación del biocompuesto, siendo la de mejor calificación en todos los sistemas con puntajes de 6.75 para Bioepoxi/Fique, 7.6 para Poliéster/Fique y 7.95 para Epoxi/Fique. En cuanto a la selección de la matriz del compuesto, la resina poliéster es la más económica pero sus propiedades son menores a la registrada por los otros sistemas, sumado a su corto tiempo de gel que limita el proceso de infusión en vacío y la resina Bioepoxica tiene un costo muy alto y menor disponibilidad. Es por estas razones, que el compuesto de Epoxi/fique es el material seleccionado para la fabricación del alabe del aerogenerador.

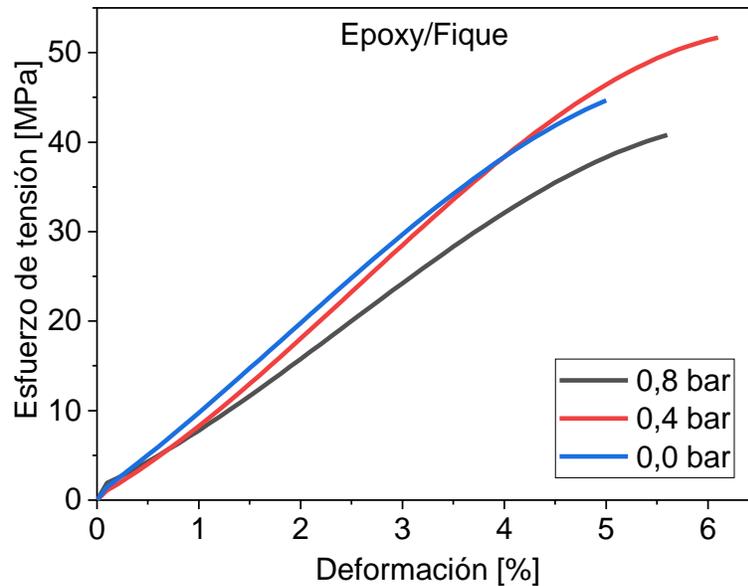
## 6.2 Caracterización del biocompuesto Epoxi/Fique variando el vacío en el proceso de fabricación

Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos de matriz polimérica dependen del proceso de fabricación, por tal motivo se abordó el estudio de la influencia de vacío sobre el desempeño del biocompuesto para determinar las condiciones óptimas de fabricación por la técnica de infusión en vacío, para lo cual se evaluaron materiales obtenidos a presiones de vacío de 0, 0.4 y 0.8 bar. En consecuencia, se realizaron ensayos mecánicos de tracción y flexión además de microscopia SEM para correlacionar el desempeño mecánico con la morfología de los materiales obtenidos, para lo cual se representan los resultados a continuación:

## 6.2.1 Caracterización mecánica

### *Ensayos de tracción*

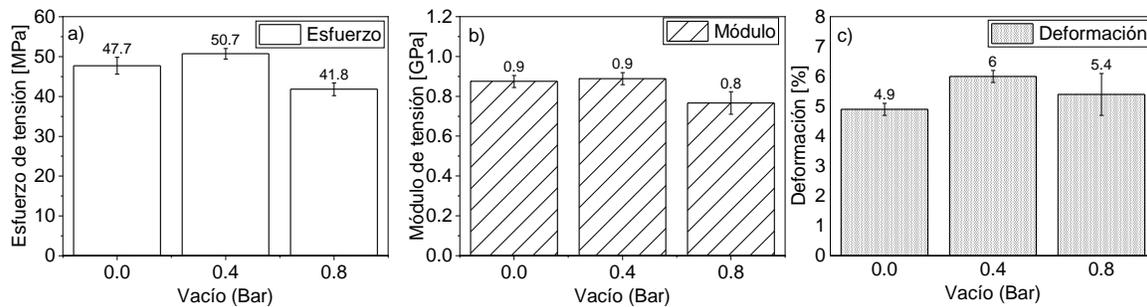
En la Figura 6-6 se representan las curvas de esfuerzo vs deformación, con el propósito de evaluar el efecto de la presión de vacío en el proceso de fabricación. Según los resultados obtenidos en estas gráficas se observa un comportamiento elástico lineal para todos los sistemas. De este modo, se reveló en los ensayos que el material presenta un comportamiento frágil, propio de la naturaleza de los compuestos con matriz termoestable [93], [94].



**Figura 6-6. Diagramas esfuerzo vs deformación de los biocompuestos Epoxy/Fique, a diferentes presiones de vacío**

De igual manera se evaluó el comportamiento mecánico con el estudio de las propiedades de esfuerzo, la rigidez y la deformación, teniendo en cuenta la variación de la presión en la fabricación de los laminados. La Figura 6-7 a) muestra los resultados de esfuerzo en donde se evidencia una influencia positiva para la mezcla Epoxi/Fique al aumentar la cantidad de vacío hasta 0.4 Bar, esta se ve reflejada en el aumento de la resistencia mecánica. Sin embargo, con un valor de 0.8 Bar se disminuyen los resultados, lo que demuestra que el proceso de fabricación tiene una influencia positiva hasta un punto y luego con el exceso de vacío disminuye el comportamiento mecánico del biocompuestos. Así, entre los mejores comportamientos de esfuerzo se obtuvo el mejor resultado para epoxi/fique 0.4 bar con un valor de  $50.7 \pm 1.3$  MPa, siendo 5.9 % mejor que epoxi/fique 0 bar el cual arrojó  $47.7 \pm 2.14$  MPa y 17.5 % mejor que epoxi/fique 0.8 Bar con un total de  $41.8 \pm 1.6$  MPa.

Los valores del módulo a tensión se observan en la Figura 6-7 b) donde se evidencia un aumento de la rigidez para Epoxi/Fique con la presión de vacío de 0.4 bar, sin embargo, se presenta una disminución de esta propiedad a una presión de 0.8 bar. Los valores del comportamiento de la pendiente de elasticidad son superiores para el compuesto Epoxi/Fique a 0.4 bar con  $0.889 \pm 0.03$  GPa, siendo este 1.5 % superior a epoxy/fique 0 bar con  $0.874 \pm 0.03$  GPa y 13.6 % mejor que epoxy/fique 0.8 bar con  $0.767 \pm 0.057$  GPa.

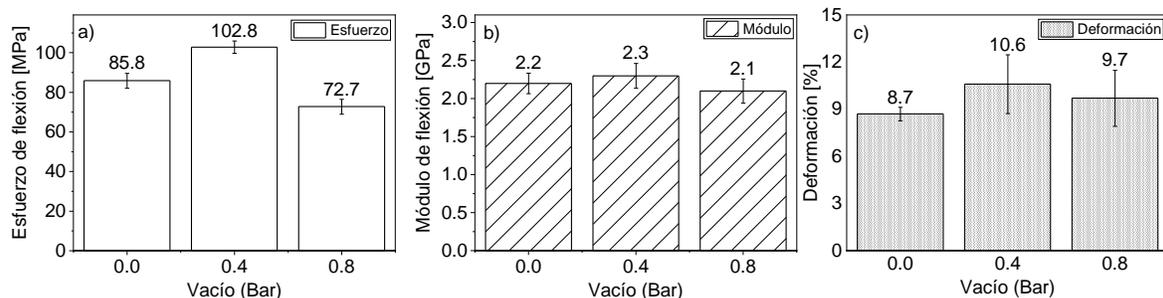


**Figura 6-7. Resultados de ensayos de tracción de Epoxi/Fique con variación del vacío, a) esfuerzo, b) módulo de elasticidad y c) deformación.**

Para el porcentaje de alargamiento, ver Figura 6-7 c), se evidencia que la deformación es mayor para las placas fabricadas con una presión de vacío de 0.4 bar. Sin embargo, al aumentar a 0,8 bar se disminuye esta propiedad. El valor más alto fue el de epoxi/fique 0.4 bar con un total de  $6 \pm 0.2$  %, siendo mayor un 18 % mejor que Epoxi/Fique 0 bar con  $4.9 \pm 0.2$  % y por último a 10 % mayor que Epoxi/Fique 0.8 bar con  $5.4 \pm 0.7$  % de deformación.

#### *Ensayos de flexión*

Por otro lado, en la Figura 6-8 se muestra el comportamiento a flexión de los materiales, en el cual se evaluó la resistencia mecánica, el módulo y el porcentaje de deformación. De acuerdo con estos resultados, se aprecia una mejora del esfuerzo a la flexión de los biocompuestos Epoxi/Fique al aumentar el vacío hasta 0.4 bar, y disminuye cuando se someten a una presión de 0.8 bar como se muestra en la Figura 6-8 (a). En el comportamiento a la rigidez ver Figura 6-8 (b) se aprecia una tendencia similar a los valores obtenidos de esfuerzo, donde los resultados no presentan cambios significativos con el aumento de vacío. En relación frente al porcentaje de deformación ver Figura 6-8 (c), se observa un comportamiento similar en el cual la variación de la elongación no se altera en intervalos mayores al 2% con la variación de la presión.



**Figura 6-8. Resultados de ensayos de flexión de Epoxi/Fique con variación del vacío, a) esfuerzo, b) módulo de elasticidad y c) deformación.**

En general, en los ensayos mecánicos a tracción y flexión para los diferentes biocompuestos se observa una tendencia de incremento para el esfuerzo y el módulo cuando se aumenta el

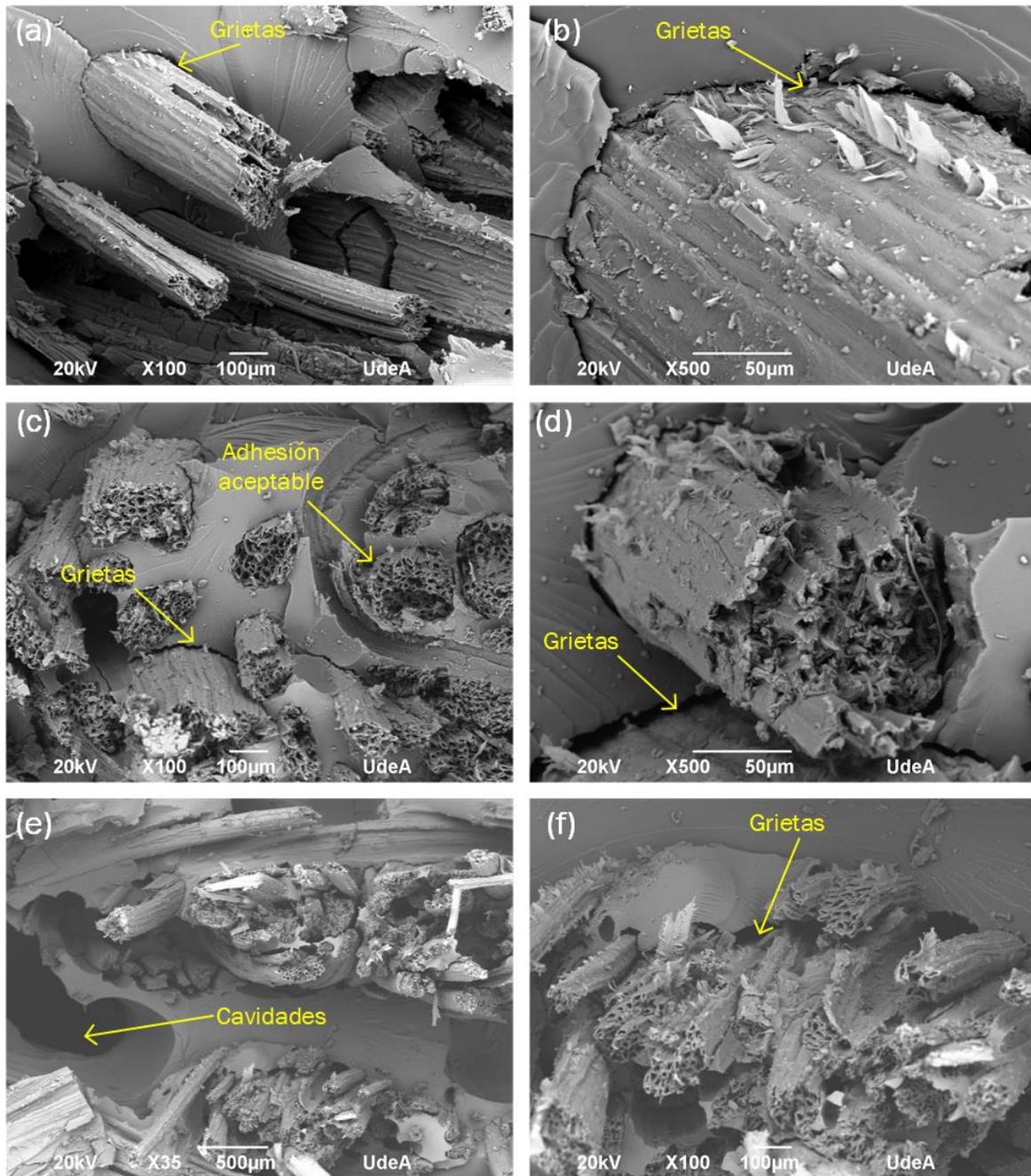
vacío hasta 0.4 bar, que está asociada con la capacidad de adherencia de las fibras de fique con la resina epoxica, luego de una caída en los valores de estas propiedades cuando el vacío asciende a 0.8 bar. Así, al comparar estos resultados se evidencia que el vacío excesivo en el proceso de fabricación genera una reducción en las propiedades de esfuerzo y modulo tanto para los ensayos de tracción como flexión.

### *Evaluación morfológica*

La morfología del biocompuesto se evaluó mediante microscopia electrónica de barrido SEM, con el propósito de analizar la interacción de refuerzo con la matriz. En la Figura 6-9 se muestran las micrografías de las zonas de fractura de las probetas ensayadas a tracción, para el compuesto Epoxi/Fique.

El estudio de la morfología se realizó teniendo en cuenta las presiones de vacío de 0, 0.4 y 0.8 bar, de las cuales se distinguen las características expresadas a continuación: en la Figura 6-9 a) y b) se observan las microestructuras del sistema epoxi/fique a 100 y 500 aumentos respectivamente para el sistema de 0 bar. Con relación a la interacción entre la fibra y la resina se evidencia la presencia de grietas en la interfaz de estos materiales, lo que demuestra una baja compatibilidad de estos componentes acompañado de un área de falla plana que caracteriza la fractura frágil propia de la resina epoxica. Para el sistema expuesto a presión de vacío de 0.4 bar se muestra la Figura 6-9 c) y d) con micrografías captadas a 100 y 500 aumentos respectivamente, se sigue evidenciando la presencia de grietas. Sin embargo, a diferencia de las micrografías de 0 bar, se logra identificar una adhesión aceptable en algunas fibras que están rodeadas de matriz, además, una reducción en el tamaño de las fibras expuestas luego de la fractura, lo que puede indicar una mejora en la interacción matriz/refuerzo. Para el caso de la presión de vacío de 0.8 bar como se muestra en la Figura 6-9 e) y f) con micrografías tomadas a 35 y 100 aumentos respectivamente, se evidencia la presencia de cavidades y grietas de gran tamaño. Estos defectos presentes por la suma de la baja adhesión entre fibras y resina con la alta presión de vacío se evidencian a una menor escala de aumentos de las micrografías en comparación con los otros sistemas de 0 y 0.4 bar.

Al comparar este análisis micrográfico con los resultados de las propiedades mecánicas, se puede establecer que el aumento de vacío hasta 0.4 bar en el proceso de fabricación mejora las características del compuesto reflejando los mejores resultados de resistencia y modulo a tracción. Por otra parte, el aumento de vacío hasta 0.8 bar es excesivo y debido a la baja compatibilidad fibra/matriz se originan grietas y cavidades mayores que precipitan la fractura actuando como concentradores de esfuerzo.



**Figura 6-9. Micrografías SEM del biocompuesto Epoxi/Fique, a) y b) a 0 bar, c) y d) a 0.4 bar y e) y f) a 0.8 bar.**

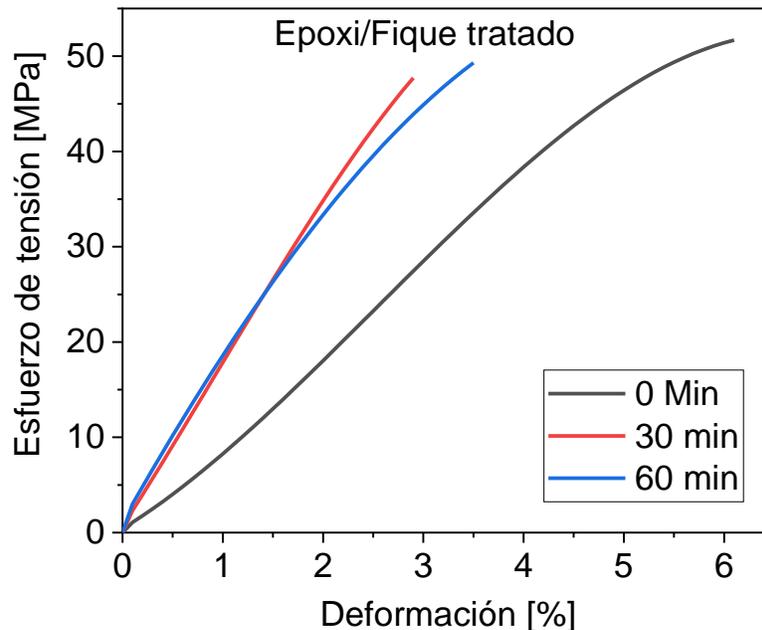
### 6.3 Efecto del tratamiento químico de las fibras de fique sobre el biocompuesto

Según los resultados anteriores se encuentra que aún a una presión de 0.4 bar es posible lograr una mejora en el comportamiento de los materiales compuestos, por lo que se sugiere tratar las fibras naturales con agentes químicos que permitan incrementar las interacciones con la matriz y en consecuencia mejorar las propiedades mecánicas. Se modificaron químicamente los tejidos de fibra de fique con un tratamiento de alcalinización de NaOH en una solución al 20% por dos periodos de 30 y 60 minutos, con el propósito de evaluar el efecto de este

tratamiento sobre las propiedades mecánicas en el biocompuesto, ya que según reportes se ha demostrado que esto genera un incremento en las propiedades mecánicas [95], [96]. En este contexto, los ensayos mecánicos realizados fueron tensión y flexión, cuyos resultados se muestran a continuación:

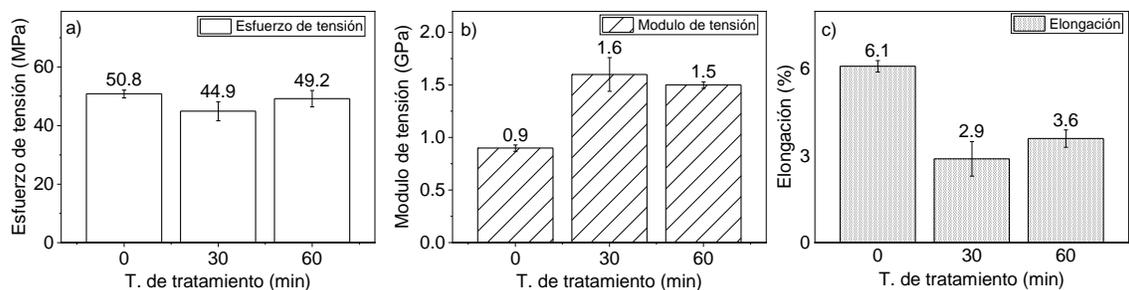
#### *Ensayos de tensión*

En la Figura 6-10, se presenta los diagramas de esfuerzo vs deformación de los biocompuestos Epoxi/Fique con y sin tratamiento químico en el material de refuerzo. De acuerdo con los resultados, se evidencia una tendencia lineal con un comportamiento frágil propio de estos materiales compuestos, principalmente por la naturaleza de la matriz termoestable.



**Figura 6-10. Curvas de esfuerzo de tracción vs deformación de Epoxi/Fique con y sin tratamiento químico en el refuerzo**

En la Figura 6-11 a) se muestran los resultados de esfuerzo a tensión de los materiales con y sin tratamiento químico, en los cuales, se identifica el mejor resultado al compuesto sin tratamiento con 50.8 MPa seguido de cerca por 3.1 % el tratado con 60 minutos con 49.2 MPa y por último con 12 % menor el biocompuesto tratado a 30 minutos con un resultado de 44.9 MPa. Sin embargo, no existe un cambio significativo en lo correspondiente al esfuerzo de tracción que refleje el mejor sistema.

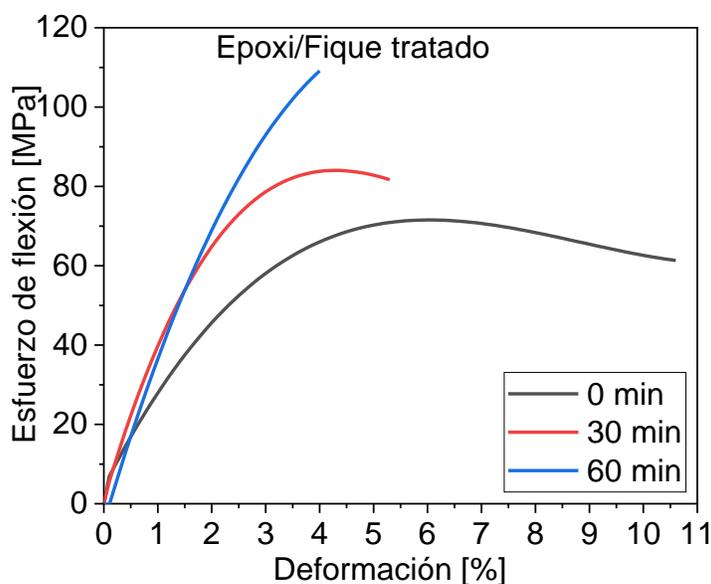


**Figura 6-11. Resultados ensayos de tracción a compuestos con fibras tratadas. a) esfuerzo, b) módulo y c) deformación**

Para el análisis del módulo a tensión de los biocompuestos, se muestra la Figura 6-11 b) donde al contrario del esfuerzo, si se nota un cambio significativo de los biocompuestos con fibra tratada al compararlos con el sistema sin tratamiento. Así, el mejor resultado lo obtuvo el compuesto de 30 minutos de tratamiento con 1.551 GPa seguido con un 6.1 % menos el material con 60 minutos con 1.457 GPa y finalizando con 42.7 % menos el sistema sin tratamiento con 0.889 GPa. Con respecto al porcentaje de deformación, se evidencia una disminución para los biocompuestos con tratamiento frente al material sin tratamiento, sin embargo, con los biocompuesto tratados no se identifica un cambio significativo. En esta propiedad, los resultados en forma descendiente se presentan como 6.1 % de deformación del compuesto sin tratamiento, seguido de 3.6 % que arrojó el tratamiento de 60 minutos y finalizando con 2.9 % para el tratamiento de 30 minutos.

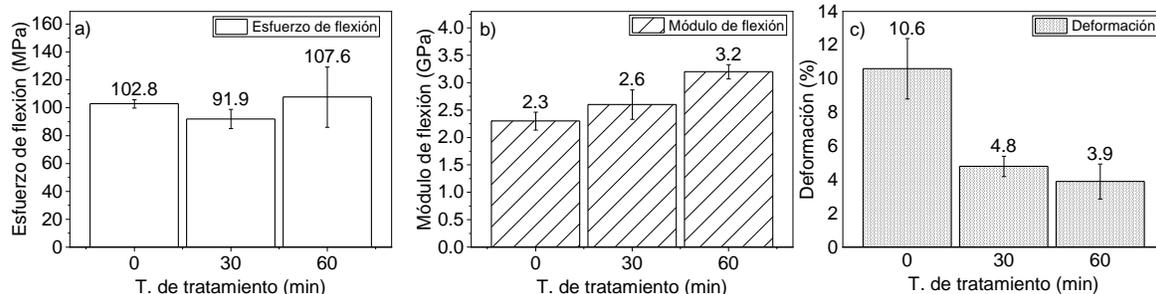
#### *Ensayos de flexión*

Se realizaron ensayos de flexión en tres puntos a los materiales biocompuestos con tejidos de fibras de fique con y sin tratamiento químico. Como se evidencia en la Figura 6-12, las curvas de esfuerzo de flexión vs deformación muestran un cambio de tendencia donde el material aumenta de fragilidad a medida que se expone el refuerzo al tratamiento químico.



**Figura 6-12. Curvas de esfuerzo de flexión vs deformación de Epoxi/Fique con y sin tratamiento químico en el refuerzo**

En la Figura 6-13 se muestran los resultados de esfuerzo de flexión, módulo de flexión y deformación de los biocompuestos Epoxi/Fique con y sin tratamiento químico. Se identifica un aumento significativo para las propiedades de esfuerzo y módulo de flexión a medida que aumenta la exposición al tratamiento químico con la solución de NaOH para un periodo de tiempo de 60 minutos con lo cual indica un efecto positivo en la adhesión fibra matriz.



**Figura 6-13. Resultados ensayos de flexión a compuestos con fibras tratadas. a) esfuerzo, b) módulo y c) deformación**

Los resultados de esfuerzo de flexión (ver Figura 6-13 a)) muestran al sistema con tratamiento de 60 minutos como el mejor material con 107.6 MPa siendo 14.6 % mayor que el compuesto tratado en 30 minutos con 91.9 MPa y 4.5 % mejor que el compuesto sin tratamiento que tiene un valor de 102.8 MPa. En consecuencia, se observa los valores de rigidez en la Figura 6-13 b) donde el compuesto con tratamiento de 60 minutos tiene 3.252 GPa siendo 18.5 % mayor que el biocompuesto con 30 minutos de tratamiento que obtuvo 2.648 GPa y 29,3 % mayor que el sistema sin tratamiento donde el valor de módulo fue 2.299 GPa. En cuanto a los valores de deformación, se presentó una tendencia similar a la elongación mostrada en los ensayos de tracción, en el cual se disminuye la deformación de los materiales al aumentar la exposición en el tratamiento químico. El mayor valor de deformación para los ensayos de flexión resulto del compuesto con 60 minutos de tratamiento al obtener un 10.6 %, seguido del biocompuesto de 30 minutos de tratamiento que arrojó 4.8 % y finalizando con el sistema sin tratamiento con un 3.9 %.

En concordancia con lo anterior, se puede argumentar que el tratamiento químico al tejido de fibras naturales de fique aumenta las propiedades de esfuerzo y rigidez del biocompuesto sobre todo cuando el material se encuentra a flexión donde se ve mayor marcado este fenómeno. Además, es preciso destacar que el sistema que presenta las mejores propiedades se obtiene al someter las fibras a 60 minutos de tratamiento, lo cual concuerda con otros autores [95], [97] que utilizan este tiempo de tratamiento además de la concentración con NaOH. Sin embargo, con respecto a la deformación total se evidencia una reducción de este valor al aumentar la exposición al tratamiento químico, lo que indica un aumento de la fragilidad del compuesto y siendo este un factor clave para el desempeño del álabe, se recomienda su estudio para trabajos posteriores.

#### 6.4 Desempeño estructural de los álabes por medio de simulación

En este estudio se analizó la variación de la disposición angular entre los tejidos de fibras naturales de fique en los álabes de un aerogenerador de eje vertical con el fin de determinar por medio de un análisis numérico la configuración con mayor desempeño mecánico. Este

enfoque se realizó en la sección de materiales compuestos ACP de ANSYS, el cual está dividido de la siguiente forma:

#### 6.4.1 Preprocesamiento

##### *Materiales*

Para este análisis, se configuró un material nuevo en el “engineering data” del proyecto de simulación, los datos de este compuesto corresponden a los de la Tabla 6-2, donde se expone los parámetros orto trópicos necesarios del biocompuesto para cada lamina y sus respectivos valores. Los valores de estas propiedades fueron asignados en el rango de este tipo de biocompuestos, con resultados caracterizados anteriormente en la sección 6.2 y otros encontrados en la literatura, como lo son el coeficiente de Poisson y los módulos cortantes [98]–[100]. Sin embargo, se contempló en esta sección la caracterización completa del material orto trópico con el fin de retroalimentar el software con las características completas del biocompuesto Epoxi/Fique en un nuevo análisis de simulación con el fin de validar el comportamiento final del álabe. Además de este material configurado, se incluyó una aleación de aluminio para el marco del álabe, consultado en el engineering data sources de ANSYS con referencia “General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277”.

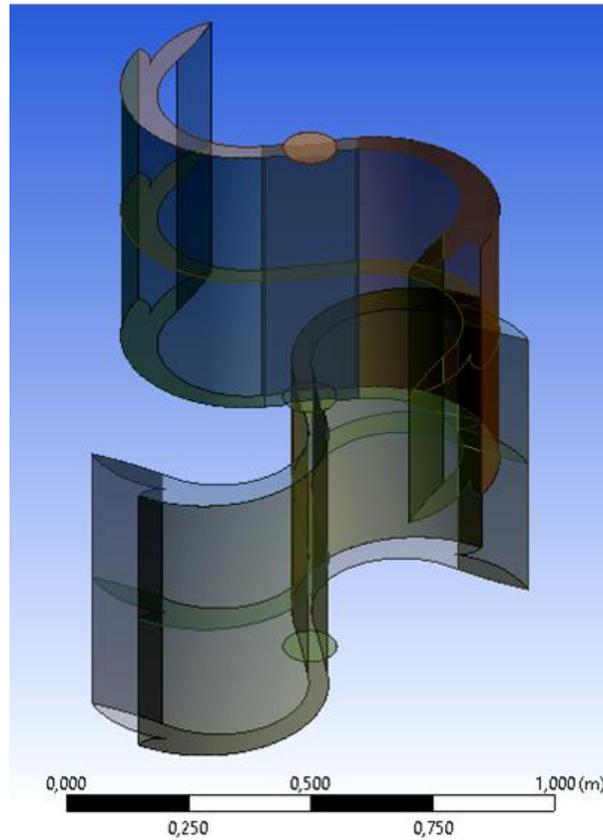
**Tabla 6-2. Parámetros orto trópicos del material biocompuesto Epoxi/Fique**

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor	Ref.
Módulo de Young X	$E_x$	MPa	890	-
Módulo de Young Y	$E_y$	MPa	890	-
Módulo de Young Z	$E_z$	MPa	850	-
C. Poisson YZ	$\nu_{yz}$	-	0.39	[98]
C. Poisson XZ	$\nu_{xz}$	-	0.34	[98]
C. Poisson XY	$\nu_{xy}$	-	0.34	[98]
Módulo cortante XY	$G_{xy}$	MPa	570	[98]
Módulo cortante YZ	$G_{yz}$	MPa	590	[98]
Módulo cortante XZ	$G_{xz}$	MPa	590	[98]
Densidad	$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	1060	-

##### *Geometría*

La geometría inicial, contempla la unión de 16 piezas tridimensionales (4 álabes grandes, 4 álabes pequeños, 4 bastidores principales, 2 bastidores centrales y 2 ejes), cada grupo de 4 álabes (2 pequeños y 2 grandes) componen un perfil aerodinámico mientras que los

bastidores y ejes comprenden la parte estructural y la unión del sistema. Para la operación de esta geometría en el módulo ACP, es necesario transformar cada pieza en una superficie que identifica la ubicación del laminado en material biocompuesto. En la Figura 6-14, se muestra el resultado del paso de las geometrías tridimensionales a 20 superficies, además se le asignó un nombre a cada superficie con el fin de identificar la sección que se configuró posteriormente.

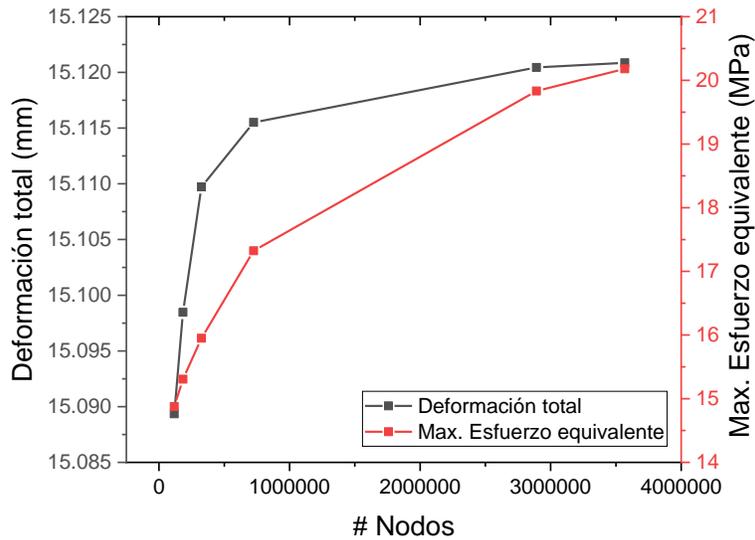


**Figura 6-14. Superficies de la geometría para el análisis en ANSYS ACP**

### *Mallado*

El proceso de mallado se realizó con un control de tamaño en las caras de todas las superficies, que al no contener cambios de sección drásticos se adaptó a todas las piezas casi en su totalidad con elementos cuadrados y el excedente con elementos triangulares. Este control de tamaño fue el parámetro de entrada que proporcionó el número de nodos y elementos, factores que fueron parámetros de salida junto con los resultados de esfuerzo y deformación con el fin de evaluar la eficiencia del modelo. La Figura 6-15 muestra el cambio en la deformación total de las geometrías y el máximo esfuerzo equivalente versus el número de nodos para 6 diferentes mallados que dependen del refinamiento, que en este caso está determinado por el tamaño del elemento. Para la deformación total y el máximo esfuerzo equivalente, se observa una variación de los resultados que tiende a aumentar al mismo tiempo que aumenta el número de nodos. Este cambio de resultados va disminuyendo a medida que la curva se estabiliza alrededor de 15.120 mm para la deformación total y 20.1

MPa para el esfuerzo equivalente, esto indica que para este modelo se podría seleccionar uno de estos mallados.



**Figura 6-15. Gráfico de deformación total y máximo esfuerzo equivalente vs el número de nodos.**

Se realiza un análisis de discretización temporal con las mismas variables para el mismo modelo, donde se tomaron los seis mallados y los respectivos tiempos de solución como se muestra en la Tabla 6-3. En esta, se puede observar el aumento de tiempo de procesamiento al disminuir el tamaño del elemento y la variación en los resultados de deformación. En consecuencia, se elige el tamaño del elemento de 1 mm ya que se observa un cambio de deformación poco significativo y evitando aumentar el gasto computacional.

**Tabla 6-3. Resultados del modelo con diferentes mallas para la deformación total.**

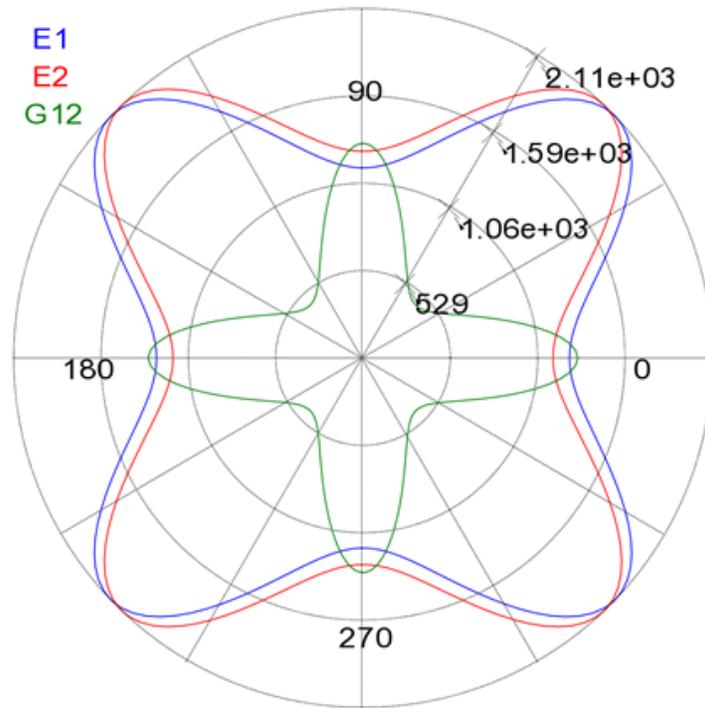
Malla	1	2	3	4	5	6
Tamaño del elemento [mm]	5	4	3	2	1	0.9
Número de elementos	116057	182117	323710	722970	2887646	3563967
Deformación total [mm]	15,0893	15,0984	15,1097	15,1155	15,1204	15,1208
Tiempo de simulación [horas]	0.33	0,58	1.08	2,33	12,2	15,2

#### 6.4.2 Procesamiento

##### *Configuración del modelo*

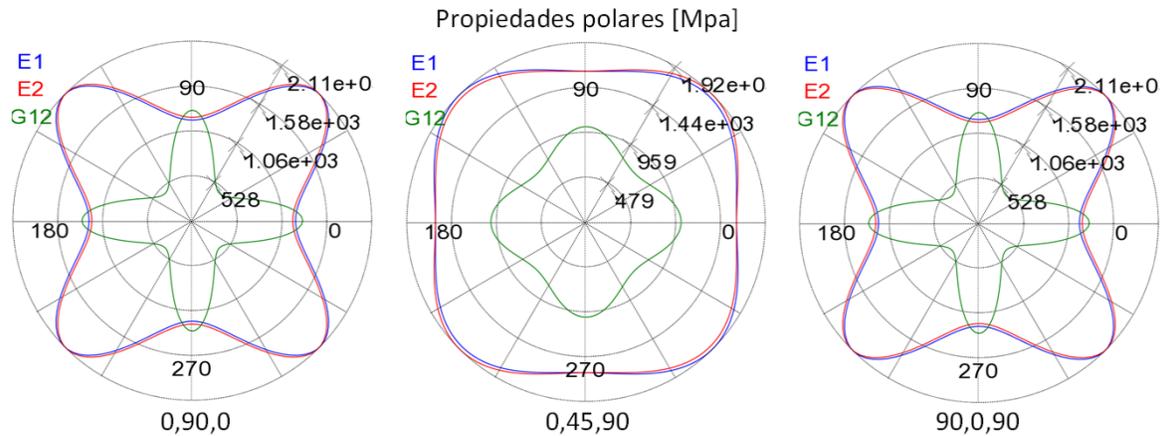
Para esta configuración se inició con el diseño del material compuesto, el cual está constituido por una serie de láminas de Epoxi/Fique, a este se le asignó un espesor de 1.7 mm, según los espesores posibles de obtener con una capa de fibra de fique y las propiedades del material incluido en el engineering data que corresponde a las expuestas en la Tabla 6-2 y representadas como propiedades polares en la Figura 6-16.

## Propiedades polares [Mpa]



**Figura 6-16. Propiedades polares de la lámina Epoxi/Fique**

Por otra parte, se configuró el laminado del biocompuesto con un total de 3 capas de tejido de fibra natural para dar un espesor aproximado al álabe de 5 mm según recomendaciones de diseño indicado en la sección experimental 5.6. Para esto se seleccionaron 3 configuraciones del material (0/90/0, 0/45/90 y 90/0/90) dependiendo del ángulo en que se situó los tejidos de fibra natural de fique una con respecto a la otra, en la Figura 6-17 se observan la variación de las propiedades polares de estos tres laminados.



**Figura 6-17. Propiedades polares de los laminados.**

Paso seguido, se implementó las rosetas correspondientes a cada superficie de la geometría, donde se configuró el eje x y el eje y paralelos a la superficie mientras que el eje z siempre con una ubicación perpendicular, con el objetivo de direccionar los laminados. Así mismo, se asignó cada material a su geometría correspondiente creando un grupo que identifica el laminado direccionado con el tipo de material que en este caso para los álabes corresponde al Epoxi/fique en un total de 12 superficies y para la parte estructural y de sujeción se establece el aluminio en 8 superficies.

Al variar la configuración de los laminados en cada uno de los álabes grandes y pequeños, se establece nueve posibles cambios que requieren simulaciones para seleccionar el sistema con mayor rendimiento mecánico. Por esto se implementaron para efectos de comparación nueve modelos numéricos donde solo vario la configuración del material. Estos modelos están normalizados bajo las condiciones del reglamento colombiano de construcción sismorresistente NSR-10 [101], que establece las velocidades mínimas de viento para probar la resistencia estructural en el territorio colombiano.

En consecuencia, para la configuración del análisis se agregó el efecto de la gravedad, una velocidad rotacional de 56 rad/s y soportes fijos en la parte superior e inferior de la geometría, estos últimos se determinan como soportes fijos considerando que aún no ha vencido la inercia de arranque del generador y es el punto donde se ejerce la mayor concentración de cargas sobre la geometría total. Además, el modelo está sometido a las cargas de presión derivadas de la influencia de los vientos sobre la geometría que fueron calculadas en el análisis de fluidos con el que se contaba de partida. En la Figura 6-18 se observa la geometría de los álabes y piezas estructurales con las cargas antes mencionadas anteriormente.

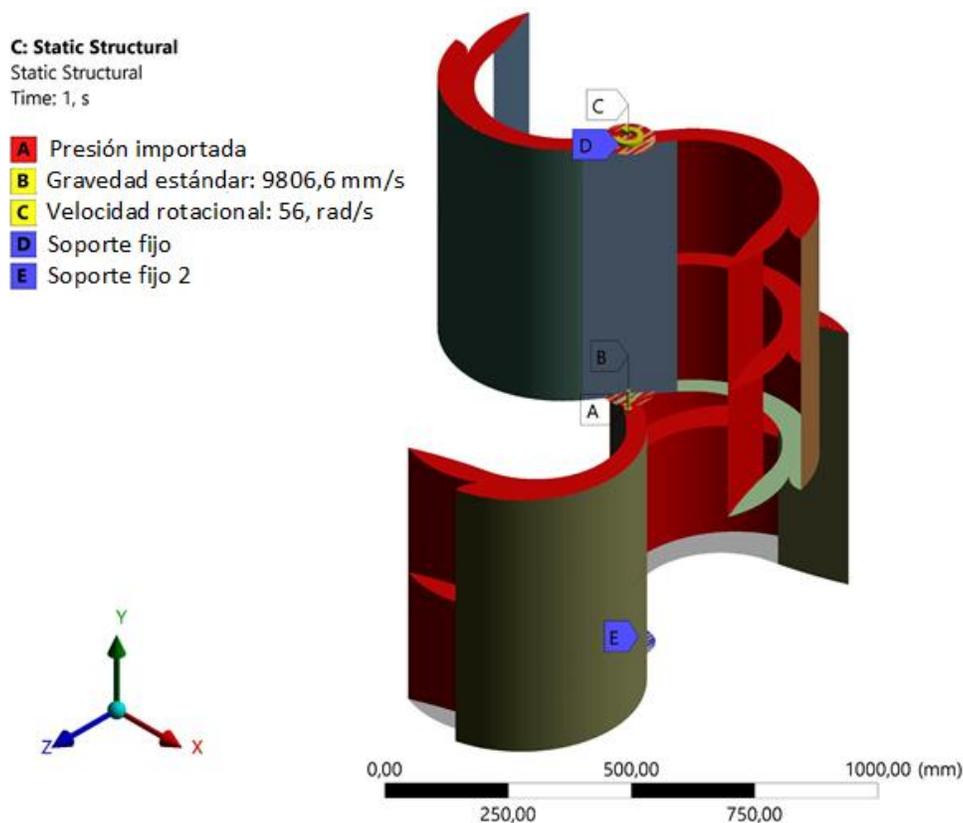
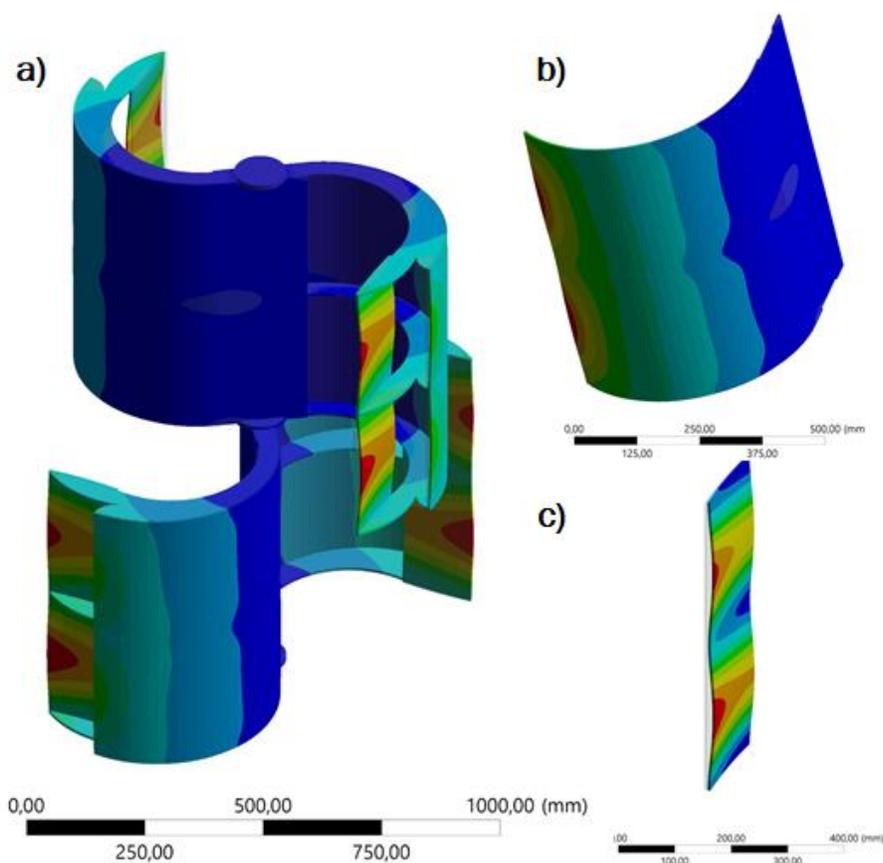


Figura 6-18. Cargas sometidas a la geometría.

Por último, se configuró como variables de salida para el modelo numérico la deformación total y el máximo esfuerzo equivalente de toda la geometría de los álabes grandes y pequeños de manera individual para definir las zonas críticas del sistema.

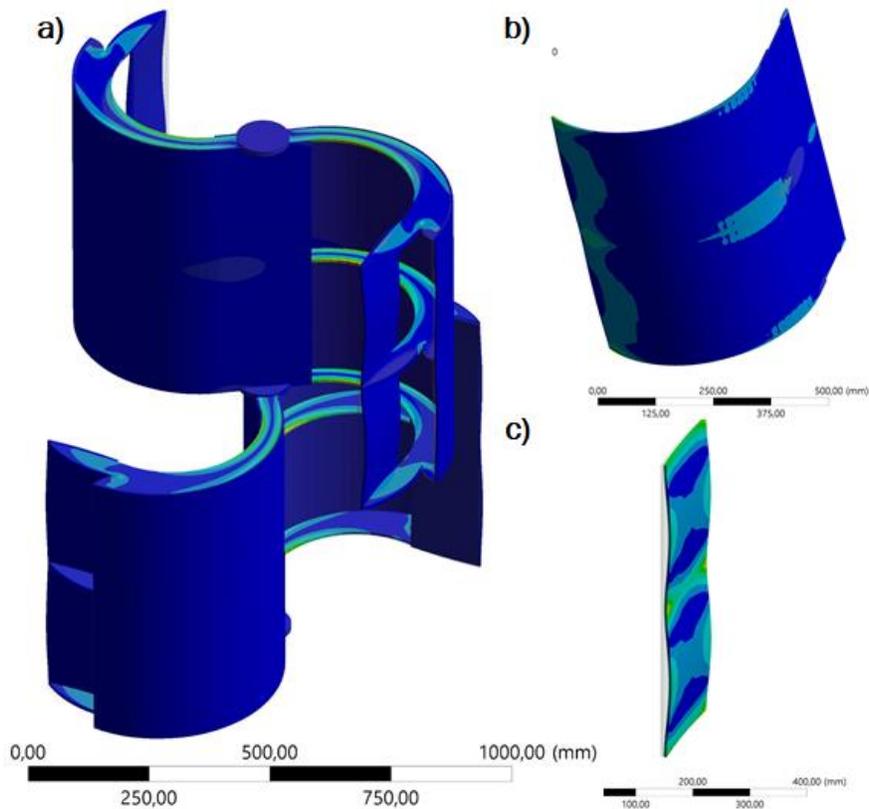
### 6.4.3 Posprocesamiento

Luego del análisis numérico de la sección geométrica, se obtiene la representación gráfica de la deformación total en los álabes y en la geometría completa como se muestra en la Figura 6-19. Se logra identificar en la figura general (ver Figura 6-19 a)) que la mayor deformación (color rojo) se presenta en los bordes tanto del alabe grande (ver Figura 6-19 b)) como del alabe pequeño (ver Figura 6-19 c)), mientras que la parte estructural adquiere una menor deformación.



**Figura 6-19. Representación gráfica de la deformación total**

Por otra parte, se obtiene la misma representación gráfica para el análisis del máximo esfuerzo equivalente como se muestra en la Figura 6-20, donde a diferencia de los resultados anteriores las mayores cargas de esfuerzo se presentan en los bastidores de la sección estructural (ver Figura 6-20 a)). Sin embargo, se aprecia una transferencia de esfuerzos en el alabe grande (ver Figura 6-20 b)) en las secciones que se encuentra en contacto con los bastidores y cercano al borde. Ya para el alabe pequeño (ver Figura 6-20 c)), los esfuerzos se distribuyen en gran parte de la superficie debido a las dimensiones reducidas de este con respecto al alabe grande.



**Figura 6-20. Representación gráfica del esfuerzo máximo equivalente**

En la tabla Tabla 6-4 se representan los resultados de deformación total y esfuerzo máximo equivalente para los 9 sistemas evaluados numéricamente. En general, no se observa una diferencia significativa en los resultados tanto de esfuerzo como de deformación, sin embargo, para el álabe pequeño la configuración que proyecta el menor valor de deformación es 0,45,90/0,45,90 esta conducta se evidencia para todo el sistema en general, además, se puede observar que este alabe pequeño es la pieza con mayor concentración de esfuerzos y por ende las mayores deformaciones. Por tal razón y sumado a la practicidad de tener la misma configuración en todos los álabes a la hora de manufacturar, se elige el sistema 0,45,90/0,45,90 para fabricación de los álabes. Según los esfuerzos arrojados con estos análisis y los valores obtenidos en la sección anterior para materiales se identifica que tanto el material compuesto sin tratamiento químico como los que tienen tratamiento químico podrían soportarlos con factores de seguridad mayores a 2. Sin embargo, hasta este punto estos resultados son la representación de un escenario con valores teóricos que necesitan ser validados, por lo que a continuación se procedió a fabricar el material con el sistema 0/45/90-0/45/90 y sin llevar a cabo un tratamiento químico, que al final si bien mejora las propiedades mecánicas del material, dificulta el proceso de fabricación del álabe y además se incrementa sus costos. Sin embargo, se identifica el material desarrollado con tratamiento químico como un buen candidato para la fabricación de aerogeneradores de eje horizontal, que normalmente están sometidos a mayores esfuerzos [102], [103].

**Tabla 6-4. Resultados de las simulaciones en términos de deformación total y esfuerzo máximo equivalente.**

Configuración (Pequeño-Grande)	Deformación alabe P [mm]	Esfuerzo alabe P [MPa]	Deformación alabe G [mm]	Esfuerzo alabe G [MPa]	Deformación general [mm]	Esfuerzo general [MPa]
0/45/90-0/45/90	14,289	18,953	8,091	14,283	14,331	127
0/45/90-0/90/0	14,332	18,883	7,577	13,203	14,371	128,43
0/45/90-90/0/90	14,333	18,915	7,536	13,656	14,371	128,11
0/90/0-0/45/90	15,709	19,597	8,092	14,252	15,751	124,25
0/90/0-0/90/0	15,752	19,527	7,579	13,174	15,79	125,68
0/90/0-90/0/90	15,753	19,557	7,538	13,624	15,791	125,36
90/0/90-0/45/90	15,120	19,832	8,093	14,257	15,163	125,19
90/0/90-0/90/0	15,164	19,757	7,579	13,178	15,202	126,63
90/0/90-90/0/90	15,165	19,798	7,538	13,629	15,203	126,3

#### 6.4.4 Validación de propiedades con la configuración 0/45/90-0/45/90

En esta práctica, se fabricaron laminados de Epoxi/Fique con la configuración 0/45/90-0/45/90 para luego evaluarlos con ensayos de tensión, tensión fuera de plano y ensayos de cortante para la caracterización de las propiedades orto trópicas. Así, se determinaron los parámetros de entrada que se muestran en la Tabla 6-5 para alimentar el modelo de simulación y comprobar los valores finales de deformación y esfuerzo máximo equivalente para los álabes y la geometría en general.

**Tabla 6-5. Parámetros de entrada con las propiedades del material con la configuración 0,45,90/0,45,90.**

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Módulo de Young X	$E_x$	MPa	$1630.5 \pm 87.2$
Módulo de Young Y	$E_y$	MPa	$1630.5 \pm 87.2$
Módulo de Young Z	$E_z$	MPa	$399.5 \pm 84.35$
C. Poisson YZ	$\nu_{yz}$	-	0.34
C. Poisson XZ	$\nu_{xz}$	-	0.34
C. Poisson XY	$\nu_{xy}$	-	0.32
Módulo cortante XY	$G_{xy}$	MPa	$573.13 \pm 8.8$
Módulo cortante YZ	$G_{yz}$	MPa	$146.4 \pm 11.4$
Módulo cortante XZ	$G_{xz}$	MPa	$146.4 \pm 11.4$
Densidad	$\rho$	$\text{Kg/m}^3$	$1182.7 \pm 35,7$

El modelo numérico con este material conserva las mismas características aplicadas al modelo anterior con el objetivo de comparar resultados. Luego del procesamiento

computacional se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 6-6, estos valores se asemejan a los mostrados en el anterior modelo por lo que se podría decir que son resultados esperados. La deformación (desplazamiento) mayor es presentada por los álabes pequeños y el valor máximo es de 15.128 mm mientras que el álabe grande tiene una deformación máxima de 8.861 mm, así mismo, el esfuerzo del álabe pequeño es mayor con 20.983 MPa en comparación con el álabe grande que obtuvo 17.067 MPa. Con estos resultados se logra la viabilidad de fabricar los álabes del generador con esta configuración de material biocompuesto.

**Tabla 6-6. Resultados de la simulación con el material final.**

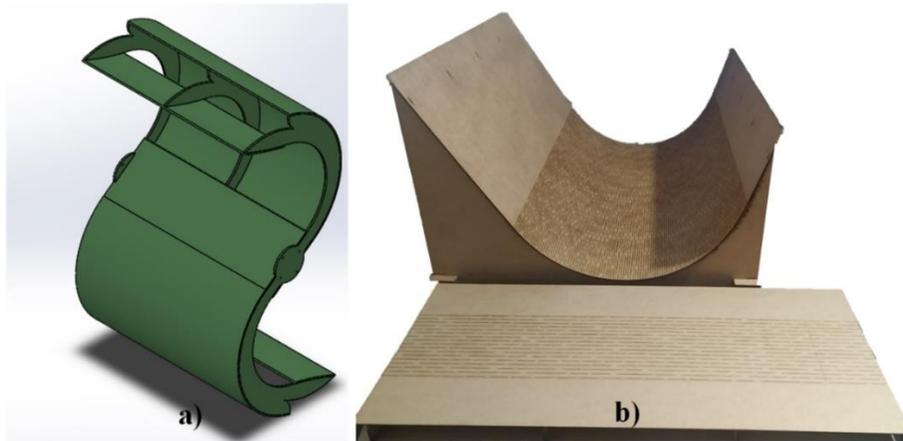
<b>Configuración (Pequeño/Grande)</b>	<b>Deformación alabe P [mm]</b>	<b>Esfuerzo alabe P [MPa]</b>	<b>Deformación alabe G [mm]</b>	<b>Esfuerzo alabe G [MPa]</b>	<b>Deformación general [mm]</b>	<b>Esfuerzo general [MPa]</b>
<b>0/45/90-0/45/90</b>	15,158	20,983	8,861	17,067	15.207	141.1

En conclusión, con el modelo numérico, se logra establecer que la configuración angular de los tejidos de fibra natural 0,45,90 para el laminado del biocompuesto, cumple con las exigencias estructurales para la fabricación de álabes de aerogenerador con la geometría planteada en esta investigación. En este sentido, las exigencias estructurales establecidas fueron: una deformación menor al 4% para evitar el cambio del perfil aerodinámico y esfuerzos en los álabes menores a 25,3 ya que satisfacen un factor de seguridad aproximado de 2. Además, se determinó las secciones críticas del sistema como los bordes de ataque de los álabes y la sección estructural de ensamble, verificando que estos cumplen satisfactoriamente con las cargas mínimas de operación.

## 6.5 Manufactura de álabes con el proceso de infusión en vacío

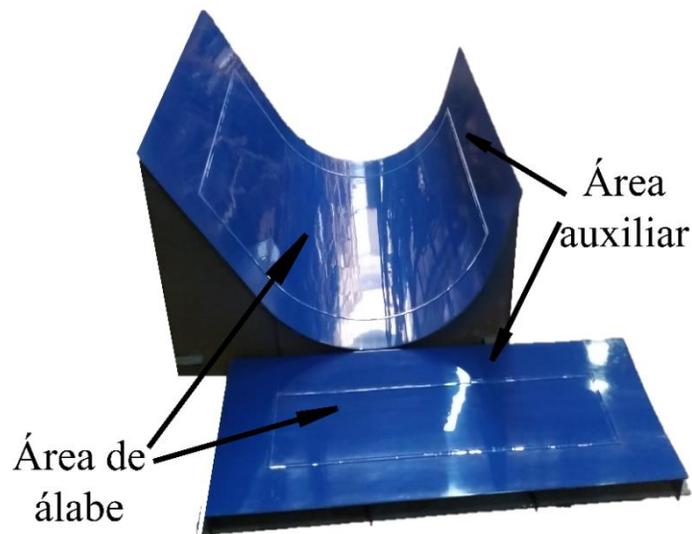
### 6.5.1 Fabricación del modelo

Para la fabricación del módulo que hace parte del aerogenerador, se necesita construir en total 4 álabes que conforman el perfil aerodinámico del mismo, para esto, se parte del diseño CAD de esta sección que se muestra en la Figura 6-21 (a). Este conjunto cuenta con dos geometrías duplicadas dispuestas simétricamente y soportadas por 3 piezas estructurales, que hacen parte del aerogenerador de eje vertical. Cada geometría necesita replicarse en un modelo con las dimensiones reales además de una superficie auxiliar en todo su alrededor que permite la ubicación de los accesorios para la fabricación por infusión en vacío. Estas secciones principales se aprecian de forma individual en la Figura 6-21 (b), en esta imagen se muestra el primer montaje de los modelos de álabes, en estos son indispensables varios procedimientos de preparación y pulido, sobre todo en el área de interés que es la superficie de donde se fabricó el molde.



**Figura 6-21. Geometría de los álabes, a) Diseño CAD y b) preforma del modelo en madera**

La preparación de los modelos se inició con el corte de una lámina de madera aglomerada de 3 mm de espesor por medio del proceso de prototipado rápido con láser, fundamental para generar la curva gracias a un patrón de corte que aumenta la flexibilidad del material. Luego se unió esta lamina a la parte estructural por medio de un adhesivo, para brindarle rigidez al modelo y continuar con la de fabricación. Para obtener un acabado superficial de gran calidad, se aplicó varios componentes que permitieron lograr una superficie lisa, iniciando por dos capas de sellador seguido de tres capas de masilla, una de fondo, pintura y el transparente que permitiera un posterior pulido. Para finalizar, el acabado a espejo se logró con una serie de lijas de grano fino, seguido de una pasta de pulido que permitió llegar al acabado que se muestra en la Figura 6-22. Para facilidad en la manipulación y mantener la rigidez del modelo, se dejó posicionada la estructura.

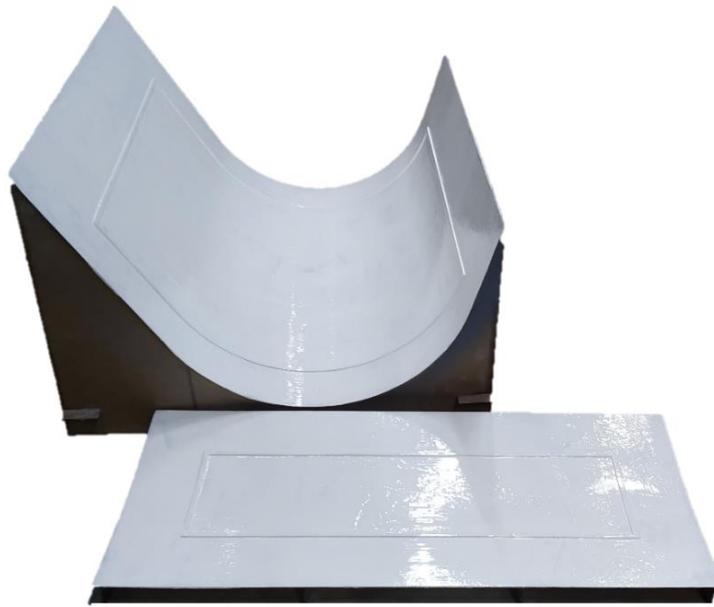


**Figura 6-22. Modelos de álabes**

### 6.5.2 Fabricación de molde

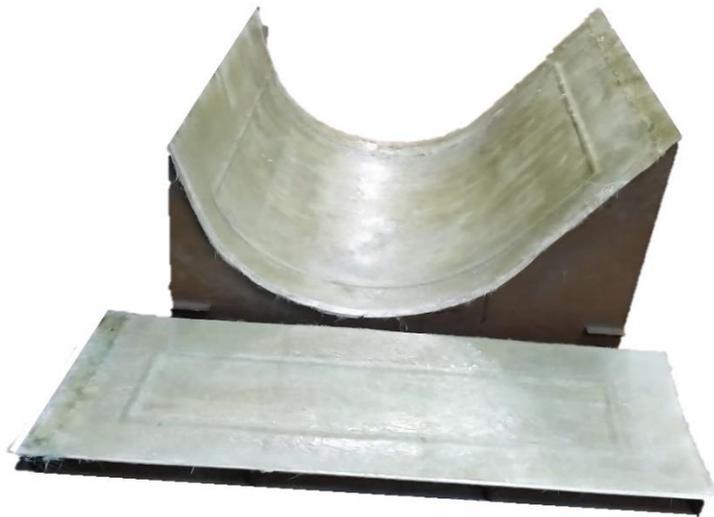
Para la obtención del molde en fibra de vidrio se utilizó el proceso de impregnación manual de las fibras de refuerzo y resina poliéster. Como método de preparación del modelo, se utilizó cera desmoldante y alcohol polivinílico PVA, los cuales permitieron una excelente calidad superficial y desmoldeo sencillo. En este sentido, la impregnación del molde se inició

aplicando un recubrimiento plástico resistente a rayaduras conocido como gelcoat, ver Figura 6-23. Este es fabricado con resina poliéster y un 2% de catalizador para luego esparcirlo con brocha en dos aplicaciones para obtener el espesor indicado dejándolo curar bien entre capas.



**Figura 6-23. Recubrimiento del modelo con gelcoat.**

Posteriormente se aplica resina de poliéster impregnando una capa de fibra de vidrio cortada al tamaño de la superficie del modelo permitiendo que la resina fluya y se amolde, así mismo, se va retirando el material de fibra de vidrio excedente en los bordes para mantener la limpieza del molde. Para evitar la pérdida de integración entre capas, solo empleo la resina necesaria y con la ayuda de un rodillo metálico se repasó las superficies para consolidar la adhesión, asegurado obtener una buena unión y eliminación de burbujas de aire. Esta primera capa se deja curar por más de 12 horas logrando una rigidez alta del molde, que ayudó en las siguientes etapas del proceso. En la Figura 6-24, se observa la adición de capas de fibra de vidrio, que debido de la necesidad estructural del molde requirió de 5 capas adicionales.



**Figura 6-24. Adición de capas de fibra de vidrio.**

Con el fin de proporcionar un poco de rigidez adicional, se adicionó un refuerzo estructural, adherido al molde usando retazos de la tela de fibra de vidrio, en este caso fabricado en madera como se muestra en la Figura 6-25.



**Figura 6-25. Adición de refuerzo estructural.**

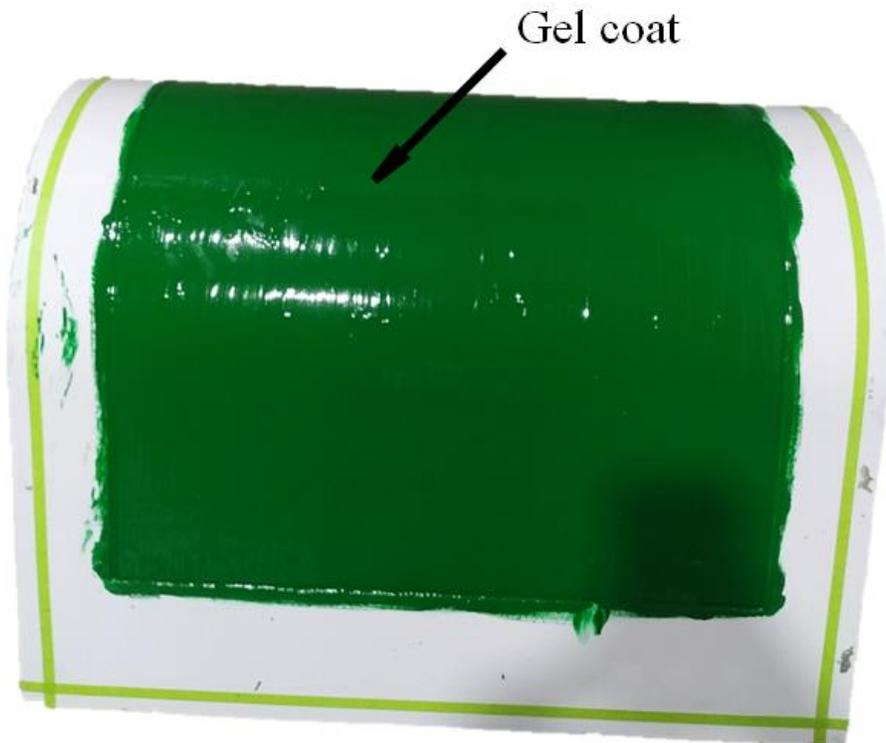
A continuación, se dejó curar el molde por 24 horas para lograr un endurecimiento y firmeza entre las capas que lo componen. El proceso de desmoldeo se realizó con la ayuda de un mazo de goma, golpeando toda la superficie estructural del molde y utilizando herramientas en forma de cuña para separar el modelo. Se recortaron los bordes sobrantes y se pulió la superficie de interés hasta obtener el acabado con el cual se fabrican las piezas. En la Figura 6-26, se aprecia el resultado de todo el proceso de fabricación del molde.



**Figura 6-26. Molde de álabes para la fabricación por infusión en vacío.**

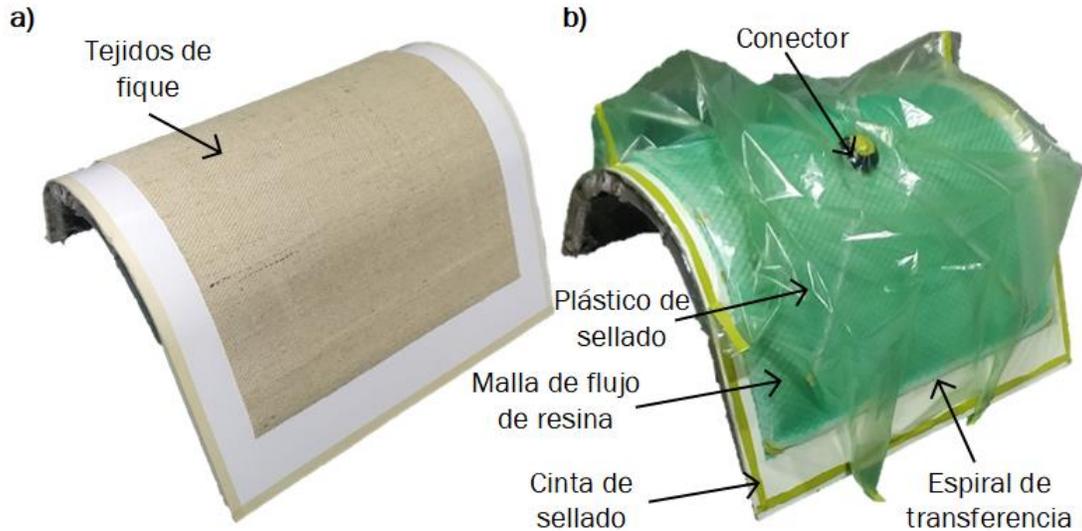
### 6.5.3 Fabricación de álabes

Para la fabricación de los alabes, se preparó el molde para el proceso de infusión en vacío, a este se le dio un alto detalle de pulido en la sección del álabe utilizando cera desmoldante en repetidas ocasiones hasta lograr una superficie espejo, además se aplicó una capa de alcohol polivinílico para un desmoldeo sencillo. En primera instancia, se cubrió el área del álabe con una capa de gel coat catalizado al 1.5 % en peso utilizando una brocha y luego se dejó curar por tres horas. Se utilizó gel coat ISO-NPG incoloro ya que este tiene excelente resistencia a la humedad, varios agentes químicos moderados y las inclemencias del tiempo por su contenido de Neopentil Glicol (ISO-NPG). En este proceso de fabricación se aplicó gel coat incoloro a un par de los álabes, al otro par se le aplicó el mismo gel coat con un tinte verde al 6 % en peso, en la Figura 6-27 se puede observar esta primera capa del proceso.



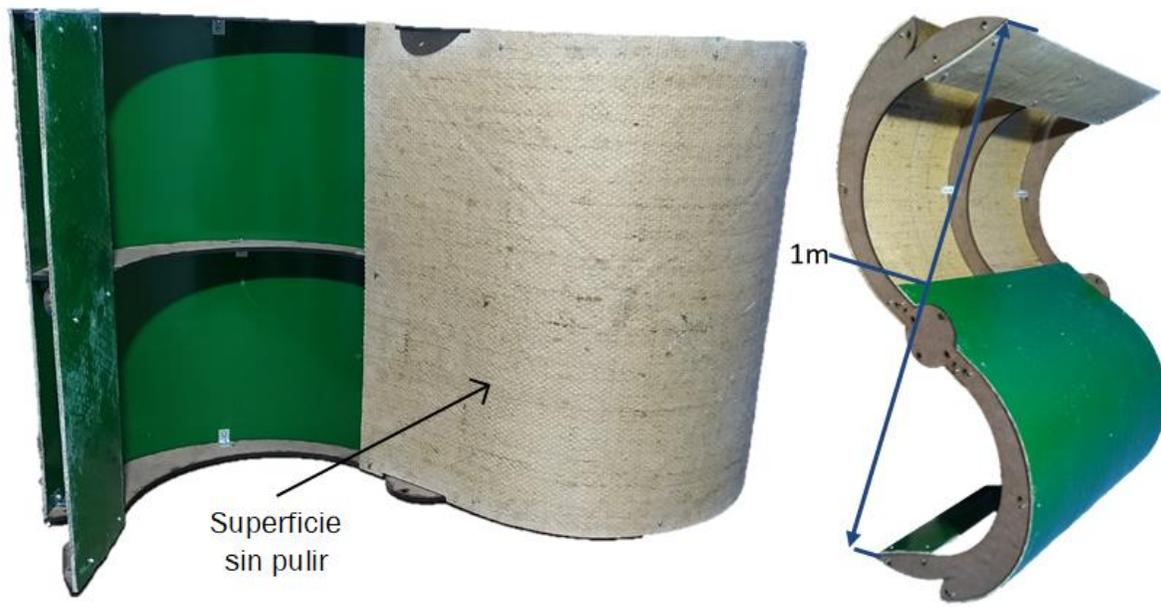
**Figura 6-27. Molde con la capa de gel coat en el área del álabe.**

Luego se dispusieron tres capas de tejido de fibra natural de fique orientadas en 0, 45 y 90 grados sobre el gel coat con las dimensiones del área de interés. Para quitar la humedad, se llevaron los tejidos al horno a 90° C por 3 horas, además, se plancharon con el fin de eliminar arrugas que pudieran afectar el espesor homogéneo necesario. En la Figura 6-28 a) se observa los tejidos dispuestos en el molde sobre los cuales se ubicaron el tejido antiadherente, la malla de flujo de resina, el espiral de transferencia, los conectores y el plástico de sellado todo unido con cinta de sellado, estos componentes se muestran en la Figura 6-28 b).



**Figura 6-28. a) disposición de los tejidos de fique y b) componentes para el proceso de infusión en vacío.**

El proceso de infusión se desarrolló con una bomba de vacío de 1.5 cmf a una presión de 0.4 bar, provocando la impregnación de todos los tejidos de fibra natural con resina epoxica, para luego sellar las mangueras de entrada y salida y dejar curar en el molde por 48 horas. Seguido de esto, se retiraron todos los materiales del molde incluyendo el laminado del álabe que luego se cortó hasta lograr la dimensión adecuada para retirar posteriormente el tejido antiadherente. El área de contacto con el molde presenta una calidad superficial tipo espejo con una capa de gel coat, mientras que el área de contacto con el tejido antiadherente presenta una rugosidad sin gel coat, por lo que fue necesario pulir esta sección y aplicar gel coat para sellar todos los bordes y superficies del álabe. Como proceso complementario, se realizan los agujeros de sujeción y las ranuras donde se incrustan las secciones estructurales, donde quedan expuestos nuevamente bordes que se sellan con gel coat. Para finalizar se realizó una operación de lijado iniciando de grano grueso hasta grano fino y finalizando con una pasta de pulido en todas las superficies, el resultado de estas operaciones sumado al ensamble de las piezas se puede observar en la Figura 6-29.



**Figura 6-29. Sección del perfil aerodinámico compuesta de cuatro alabes fabricados con Epoxi/Fique por infusión en vacío.**

#### 6.5.4 Anotaciones finales

Como producto de esta investigación y al observar el avance del desarrollo de los alabes de aerogenerador de eje vertical para bajas velocidades de viento con el material Epoxi/Fique, el proyecto general del que hacía parte este trabajo, decidió fabricar el generador que constó de 8 álabes grandes y 8 álabes pequeños. En la Figura 6-30 se muestra los álabes fabricados por el proceso que se desarrolló en esta investigación, este generador eólico fue instalado en la sede principal de la Universidad de Pamplona.



**Figura 6-30. Aerogenerador con álabes de material Epoxi/Fique.**

## 7 CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación contempló el uso de tejidos de fibra natural colombiana para la fabricación de un material biocompuesto que se implemente en la manufactura de álabes de aerogenerador de baja potencia. En consecuencia, como desarrolló metodológico se inició con la selección de materiales para la fabricación del biocompuesto, donde se generó una matriz de selección con criterios de disponibilidad, costo, propiedades mecánicas y menor impacto ambiental. Luego de elegir los materiales, se desarrolló y caracterizó mecánica, química y morfológicamente el compuesto variando presiones de vacío para analizar su influencia en las propiedades del biocompuesto. Luego se implementó un tratamiento químico de compatibilización fibra/matriz que fue caracterizado nuevamente con ensayos mecánicos. Para seleccionar la disposición de las capas de tejidos de fibra natural en el laminado que compone la geometría de los álabes, se implementó un modelo numérico de simulación que arroja una configuración del laminado que fue valorado mecánicamente y retroalimentó el modelo numérico. Ya con la configuración establecida del material biocompuesto, se fabricaron álabes de aerogenerador de eje vertical diseñado para bajas velocidades de viento por el proceso de infusión en vacío. De estas etapas desarrolladas se puede concluir que:

Por medio de una matriz de selección, se determinó que el tejido con fibra natural de fique es el refuerzo más indicado para la fabricación del biocompuesto, siendo la de mejor calificación en todos los criterios y la resina epoxica es la matriz del material con mayor compatibilidad y prestaciones para el proceso de fabricación por infusión en vacío. Por estas razones, que el compuesto de Epoxi/fique es el material seleccionado para la fabricación del alabe del aerogenerador.

Al comparar los resultados de las propiedades mecánicas con análisis micrográfico, se logró establecer que el aumento de vacío hasta 0.4 bar en el proceso de fabricación mejora las características del compuesto reflejando los mejores resultados de resistencia y modulo a tracción. Por otra parte, el aumento de vacío hasta 0.8 bar es excesivo y debido a la baja compatibilidad fibra/matriz se originan grietas y cavidades mayores que precipitan la fractura actuando como concentradores de esfuerzo.

Por otra parte, se puede argumentar que el tratamiento químico al tejido de fibras naturales de fique aumenta las propiedades del biocompuesto sobre todo cuando el material se encuentra a flexión donde se ve mayor marcado este fenómeno. Además, es preciso destacar que el sistema que presenta las mejores propiedades se obtiene al someter las fibras a 60 minutos de tratamiento con una solución de NaOH en una concentración de 20% en peso.

Con el modelo numérico, se logra establecer que la configuración angular de los tejidos de fibra natural 0/45/90 para el laminado del biocompuesto, cumple con las exigencias estructurales para la fabricación de álabes de aerogenerador con la geometría planteada en esta investigación. Además, se determina las secciones críticas del sistema como los bordes de ataque de los álabes y la sección estructural de ensamble, verificando que estos cumplen satisfactoriamente con las cargas mínimas de operación.

El proceso de fabricación de los álabes por medio de infusión en vacío fue satisfactorio al lograr calcar la geometría expuesta en el diseño y el uso del material biocompuesto con Epoxi/Fique, obteniendo no solo un prototipo de alabe, sino el componente aerodinámico completo del aerogenerador que comprende dos álabes pequeños y dos grandes que cumplen

con los requerimientos de operación en términos de propiedades mecánicas, visuales y aerodinámicas.

Con el presente estudio queda demostrado que las fibras colombianas y en especial las fibras de fique se presentan como una alternativa de refuerzo para la fabricación de biocompuestos de matriz polimérica. En este contexto es muy importante para el país seguir explorando otras opciones a través de la investigación con este tipo de materiales naturales para aplicación más técnicas, a fin de buscar nuevos retos comerciales que permitan abrir otras oportunidades de mercado en la industria nacional del fique, e igualmente desarrollar nuevos materiales más amigables con el medio ambiente.

## 8 REFERENCIAS

- [1] F. Ballester, “Contaminacion atmosferica , cambio climatico y salud,” *Rev Esp Salud Pública*, vol. 79, no. 2, pp. 159–175, 2005, doi: 0120-4157.
- [2] N. Wagner, R. Gorini, M. D. Bazilian, F. Boshell, D. Saygin, and D. Gielen, “The role of renewable energy in the global energy transformation,” *Energy Strateg. Rev.*, vol. 24, no. January, pp. 38–50, 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.01.006.
- [3] I. E. A. IEA, “Key world energy statistics,” *Intergov. Panel Clim. Chang.*, 2008, [Online]. Available: <http://www.indiaenvironmentportal.org.in/content/272050/key-world-energy-statistics-2008/>.
- [4] A. Zerrahn, “Wind Power and Externalities,” *Ecol. Econ.*, vol. 141, pp. 245–260, 2017, doi: 10.1016/j.ecolecon.2017.02.016.
- [5] R. E. N. Members, *Renewables 2021 global status report 2021*. 2021.
- [6] Congreso de Colombia, “Ley N° 1715 del 13 de mayo de 2014,” *Upme*, 2014, doi: 10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- [7] Upme, “Resolución 045,” *minambiente*. pp. 1–7, 2016, [Online]. Available: <https://www.incp.org.co/Site/2016/info/archivos/resolucion-045-minminas.pdf>.
- [8] P. de las N. U. para el D.- PNUD, “Análisis de conflictividades y construcción de paz,” p. 91, 2014.
- [9] R. H. (UPME) Ramirez, “RESPUESTA UPME,” Bogotá, 2018. [Online]. Available: [http://www.camara.gov.co/sites/default/files/2018-10/RESPUESTA\\_UPME.pdf](http://www.camara.gov.co/sites/default/files/2018-10/RESPUESTA_UPME.pdf).
- [10] B. Griffa and L. Marcó, “Actualidad de la energía eólica a nivel mundial : generación , fabricantes , comercio exterior y precios .,” 2017.
- [11] O. Energy, “Las palas de los aerogeneradores,” 2019. [http://opex-energy.com/eolica/palas\\_aerogenerador.html#1.\\_FABRICACION\\_DE\\_LAS\\_PALAS](http://opex-energy.com/eolica/palas_aerogenerador.html#1._FABRICACION_DE_LAS_PALAS).
- [12] ALCIONE, “Ficha-Técnica-Aerogenerador-Enair-E70-PRO.pdf.” [Online]. Available: <https://soluciones.alcione.mx/wp-content/uploads/2017/01/Ficha-Técnica-Aerogenerador-Enair-E70-PRO.pdf>.
- [13] Windup, “Ficha técnica AEROGENERADOR mini-eólica \_A5.pdf.” [Online]. Available: [http://windup.pt/resources/Ficha técnica AEROGENERADOR mini-eólica \\_A5.pdf](http://windup.pt/resources/Ficha_técnica_AEROGENERADOR_mini-eólica_A5.pdf).
- [14] ENAIR, “Aerogenerador ENAIR 70 PRO,” 2019. [https://www.enair.es/descargas/Ficha\\_Tecnica/Ficha\\_Tecnica\\_E70\\_es.pdf](https://www.enair.es/descargas/Ficha_Tecnica/Ficha_Tecnica_E70_es.pdf).
- [15] G. Lichtenegger, A. A. Rentizelas, N. Trivyza, and S. Siegl, “Offshore and onshore wind turbine blade waste material forecast at a regional level in Europe until 2050,” *Waste Manag.*, vol. 106, pp. 120–131, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.018>.
- [16] M. Ramesh, K. Palanikumar, and K. H. Reddy, “Plant fibre based bio-composites: Sustainable and renewable green materials,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no.

April 2016, pp. 558–584, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.094.

- [17] S. Shahinur, *Natural Fiber and Synthetic Fiber Composites: Comparison of Properties, Performance, Cost and Environmental Benefits*. Elsevier Ltd., 2019.
- [18] D. Mendieta and J. Escribano, “Electricidad, Desarrollo Rural y Buen Vivir,” *III Simp. Int. Hist. la Electríf. Estrategias y cambios en el Territ. y la Soc.*, p. 16, 2015.
- [19] M. P. Groover, C. M. de la Peña Gómez, and M. Á. M. Sarmiento, *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Pearson Educación, 1997.
- [20] A. Miravete, *Materiales compuestos 03*, Editorial., vol. 1. Barcelona: Reverte, 2007.
- [21] S. N. A. Safri, M. T. H. Sultan, M. Jawaid, and K. Jayakrishna, “Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 133, pp. 112–121, 2018.
- [22] N. S. V. Gupta and K. V. S. Rao, “An experimental study on sisal/hemp fiber reinforced hybrid composites,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 7383–7387, 2018.
- [23] X. Zhang, W. Yang, and W. Blasiak, “Modeling study of woody biomass: interactions of cellulose, hemicellulose, and lignin,” *Energy & Fuels*, vol. 25, no. 10, pp. 4786–4795, 2011.
- [24] S. M.R., S. Siengchin, J. Parameswaranpillai, M. Jawaid, C. I. Pruncu, and A. Khan, “A comprehensive review of techniques for natural fibers as reinforcement in composites: Preparation, processing and characterization,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 207, no. October 2018, pp. 108–121, 2018, doi: 10.1016/j.carbpol.2018.11.083.
- [25] O. Faruk, A. K. Bledzki, H.-P. Fink, and M. Sain, “Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010,” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 37, no. 11, pp. 1552–1596, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>.
- [26] D. U. Shah, “Natural fibre composites: Comprehensive Ashby-type materials selection charts,” *Mater. Des.*, vol. 62, pp. 21–31, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.002>.
- [27] S. Shahinur and M. Hasan, “Natural Fiber and Synthetic Fiber Composites: Comparison of Properties, Performance, Cost and Environmental Benefits,” in *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, S. Hashmi and I. A. Choudhury, Eds. Oxford: Elsevier, 2020, pp. 794–802.
- [28] D. B. Dittenber and H. V. S. GangaRao, “Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 43, no. 8, pp. 1419–1429, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019>.
- [29] L. A. Pothan, *Natural fibre reinforced polymer composites: from macro to nanoscale*. Archives contemporaines, 2009.
- [30] B. Szolnoki *et al.*, “Development of natural fibre reinforced flame retarded epoxy resin composites,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 119, pp. 68–76, 2015, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2015.04.028.
- [31] D. Hristozov, L. Wroblewski, and P. Sadeghian, “Long-term tensile properties of

- natural fibre-reinforced polymer composites: Comparison of flax and glass fibres,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 95, pp. 82–95, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.03.079.
- [32] Y. Ro, J. F. Hunt, and R. E. Rowlands, “Cellulosic-Biowaste Composites and Their Stress Determination Using Digital Image Correlation,” *J. Eng. Mater. Technol.*, vol. 141, no. 1, p. 11011, Sep. 2018, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4041139>.
- [33] K. Shivakumar, A. Deb, and C. C. Chou, “An Exploration of Jute-Polyester Composite for Vehicle Head Impact Safety Countermeasures.” 2018, doi: <https://doi.org/10.4271/2018-01-0844>.
- [34] A. Verma, A. Gaur, and V. Singh, “Mechanical Properties and Microstructure of Starch and Sisal Fiber Biocomposite Modified with Epoxy Resin BT,” *Mater. Perform. Charact.*, vol. 6, no. 1MPC20170069, pp. 500–520, 2017, doi: 10.1520/MPC20170069.
- [35] S. Ramakrishna and Z.-M. Huang, “Biocomposites,” in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier, 2016.
- [36] T. Gereke, O. Döbrich, M. Hübner, and C. Cherif, “Experimental and computational composite textile reinforcement forming: A review,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 46, pp. 1–10, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.10.004>.
- [37] J. George, M. S. Sreekala, and S. Thomas, “A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites,” *Polym. Eng. Sci.*, vol. 41, no. 9, pp. 1471–1485, 2001.
- [38] D. N. Saheb and J. P. Jog, “Natural fiber polymer composites: a review,” *Adv. Polym. Technol. J. Polym. Process. Inst.*, vol. 18, no. 4, pp. 351–363, 1999.
- [39] E. Sarikaya, H. Çallioğlu, and H. Demirel, “Production of epoxy composites reinforced by different natural fibers and their mechanical properties,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 167, pp. 461–466, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.020>.
- [40] A.-F. M. Seyam, A. S. Monteiro, M. Midani, and J. Baruque-Ramos, “Effect of structural parameters on the tensile properties of multilayer 3D composites from Tururi palm tree (*Manicaria saccifera* Gaertn) fibrous@inproceedings{barbosa2015manufacturing, title={Manufacturing of epoxy composites incorporated with Buriti fibe,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 111, pp. 17–26, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.040>.
- [41] E. . Linares, G. Galeano, N. García, and Y. Figueroa, *Fibras vegetales utilizadas en artesanías en Colombia*, no. January 2008. 2008.
- [42] S. N. Monteiro *et al.*, “Fique fabric: A promising reinforcement for polymer composites,” *Polymers (Basel)*, vol. 10, no. 3, pp. 1–10, 2018, doi: 10.3390/polym10030246.
- [43] S. Delvasto, E. F. Toro, F. Perdomo, and R. M. de Gutiérrez, “An appropriate vacuum

- technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 2, pp. 187–192, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.01.010.
- [44] I. M. Cattani and J. Baruque-ramos, “Brazilian Buriti Palm Fiber ( *Mauritia flexuosa* Mart .),” pp. 89–98, doi: 10.1007/978-94-017-7515-1.
- [45] W. J. M. Espinosa, B. A. R. Valencia, and G. G. M. Contreras, “Physical-mechanical characterization of Moriche natural fibre (*Mauritia flexuosa*) and composite with bio-epoxy resin,” *J. Mech. Eng.*, vol. 65, no. 3, pp. 181–188, 2019, doi: 10.5545/sv-jme.2018.5730.
- [46] T. G. R. Portela, L. L. da Costa, N. S. S. Santos, F. P. D. Lopes, and S. N. Monteiro, “Tensile behavior of lignocellulosic fiber reinforced polymer composites: Part ii buriti petiole/polyester,” *Rev. Mater.*, vol. 15, no. 2, pp. 216–222, 2010, doi: 10.1590/s1517-70762010000200016.
- [47] V. C. Brambilla, L. V. R. Beltrami, K. Pelegrini, M. V. G. Zimmermann, R. N. Brandalise, and A. J. Zattera, “Development and Characterization of PLA / Buriti Fibre Composites – Influence of Fibre and Coupling Agent Contents,” vol. 25, no. 2, pp. 143–152, 2017, doi: 10.1177/096739111702500204.
- [48] M. R. Sanjay, P. Madhu, M. Jawaid, P. Senthamaraiannan, S. Senthil, and S. Pradeep, “Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 566–581, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.10.101.
- [49] K. Mylsamy and I. Rajendran, “The mechanical properties, deformation and thermomechanical properties of alkali treated and untreated Agave continuous fibre reinforced epoxy composites,” *Mater. Des.*, vol. 32, no. 5, pp. 3076–3084, May 2011, doi: 10.1016/J.MATDES.2010.12.051.
- [50] K. Mylsamy and I. Rajendran, “Influence of alkali treatment and fibre length on mechanical properties of short Agave fibre reinforced epoxy composites,” *Mater. Des.*, vol. 32, no. 8–9, pp. 4629–4640, Sep. 2011, doi: 10.1016/J.MATDES.2011.04.029.
- [51] N. Venkateshwaran, A. Elaya Perumal, and D. Arunsundaranayagam, “Fiber surface treatment and its effect on mechanical and visco-elastic behaviour of banana/epoxy composite,” *Mater. Des.*, vol. 47, pp. 151–159, May 2013, doi: 10.1016/J.MATDES.2012.12.001.
- [52] L. Boopathi, P. S. Sampath, and K. Mylsamy, “Investigation of physical, chemical and mechanical properties of raw and alkali treated *Borassus* fruit fiber,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 8, pp. 3044–3052, Dec. 2012, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2012.05.002.
- [53] P. Gañán and I. Mondragon, “Surface modification of fique fibers. Effect on their physico-mechanical properties,” *Polym. Compos.*, vol. 23, no. 3, pp. 383–394, 2002.
- [54] M. F. Muñoz-Vélez, M. A. Hidalgo-Salazar, and J. H. Mina-Hernández, “Effect of content and surface modification of fique fibers on the properties of a low-density polyethylene (LDPE)-Al/Fique composite,” *Polymers (Basel)*, vol. 10, no. 10, p.

1050, 2018.

- [55] O. A. Salinas, R. Benítez Benítez, and J. Martin Franco, “Chemical Modification of Figue Fiber by Alkalization and Esterification Utilizing Figue Fiber Dust as Residue of the Figuera Industry,” *J. Nat. Fibers*, pp. 1–9, 2020.
- [56] P. Bussetta and N. Correia, “Numerical forming of continuous fibre reinforced composite material: A review,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 113, no. July, pp. 12–31, 2018, doi: 10.1016/j.compositesa.2018.07.010.
- [57] S. Johnson, L. Kang, and H. M. Akil, “Mechanical behavior of jute hybrid bio-composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 91, pp. 83–93, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.12.052.
- [58] W. T. Kern, W. Kim, A. Argento, E. C. Lee, and D. F. Mielewski, “Finite element analysis and microscopy of natural fiber composites containing microcellular voids,” *Mater. Des.*, vol. 106, pp. 285–294, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.05.094.
- [59] H. Ullah *et al.*, “Structural Analysis of a Large Composite Wind Turbine Blade under Extreme Loading,” *4th Int. Conf. Power Gener. Syst. Renew. Energy Technol. PGSRET 2018*, no. September, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/PGSRET.2018.8685980.
- [60] A. P. Mathew, A. S. B. P., and R. S., “Structural analysis of composite wind turbine blade,” *Int. Res. J. Eng. Technol. - IRJET*, vol. 05, pp. 1377–1388, 2018, [Online]. Available: [www.irjet.net](http://www.irjet.net).
- [61] C. V. Amaechi, N. Gillett, A. C. Odijie, X. Hou, and J. Ye, “Composite risers for deep waters using a numerical modelling approach,” *Compos. Struct.*, vol. 210, no. February 2018, pp. 486–499, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.11.057.
- [62] C. Wang, K. Shankar, and E. V. Morozov, “Global design and analysis of deep sea FRP composite risers under combined environmental loads,” *Adv. Compos. Mater.*, vol. 26, no. 1, pp. 79–98, 2017, doi: 10.1080/09243046.2015.1052187.
- [63] H. Taş and I. F. Soykok, “Effects of carbon nanotube inclusion into the carbon fiber reinforced laminated composites on flexural stiffness: A numerical and theoretical study,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 159, no. April 2018, pp. 44–52, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.09.055.
- [64] M. Ozyildiz, C. Muyan, and D. Coker, “Strength Analysis of a Composite Turbine Blade Using Puck Failure Criteria,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1037, no. 4, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1037/4/042027.
- [65] F. Sotoudeh, R. Kamali, and S. M. Mousavi, “Field tests and numerical modeling of INVELOX wind turbine application in low wind speed region,” *Energy*, vol. 181, pp. 745–759, 2019.
- [66] S. N. Akour, M. Al-Heydari, T. Ahmed, and K. A. Khalil, “Experimental and theoretical investigation of micro wind turbine for low wind speed regions,” *Renew. energy*, vol. 116, pp. 215–223, 2018.
- [67] A. Suresh and S. Rajakumar, “Design of small horizontal axis wind turbine for low wind speed rural applications,” *Mater. Today Proc.*, vol. 23, pp. 16–22, 2020.
- [68] M. Anthony, V. Prasad, K. Raju, M. H. Alsharif, Z. W. Geem, and J. Hong, “Design

of rotor blades for vertical axis wind turbine with wind flow modifier for low wind profile areas,” *Sustainability*, vol. 12, no. 19, p. 8050, 2020.

- [69] L. Mishnaevsky, K. Branner, H. N. Petersen, J. Beauson, M. McGugan, and B. F. Sørensen, “Materials for wind turbine blades: an overview,” *Materials (Basel)*, vol. 10, no. 11, p. 1285, 2017.
- [70] M. Jureczko, M. Pawlak, and A. Mężyk, “Optimisation of wind turbine blades,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 167, no. 2–3, pp. 463–471, 2005.
- [71] M. J. Mochane *et al.*, “Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A review,” 2019.
- [72] G. R. Kalagi, R. Patil, and N. Nayak, “Experimental study on mechanical properties of natural fiber reinforced polymer composite materials for wind turbine blades,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 1, pp. 2588–2596, 2018.
- [73] T. Batu, H. G. Lemu, and B. Sirhabizuh, “Study of the performance of natural fiber reinforced composites for wind turbine blade applications,” *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, vol. 14, no. 2, 2020.
- [74] G. H. D. Tonoli, S. F. Santos, H. Savastano, S. Delvasto, R. Mejía De Gutiérrez, and M. D. M. Lopez De Murphy, “Effects of natural weathering on microstructure and mineral composition of cementitious roofing tiles reinforced with fique fibre,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 2, pp. 225–232, 2011, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.10.013.
- [75] W. J. (Universidad de P. Mora Espinosa, *Materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales colombianas y matriz bioepoxy para aplicaciones en la industria automotriz*. Pamplona, Colombia, 2017.
- [76] A. Lavoratti, D. Romanzini, S. C. Amico, and A. J. Zattera, “Influence of Fibre Treatment on the Characteristics of Buriti and Ramie Polyester Composites,” vol. 25, no. 4, pp. 247–256, 2017, doi: 10.1177/096739111702500401.
- [77] V. Fiore, T. Scalici, and A. Valenza, “Characterization of a new natural fiber from *Arundo donax* L. as potential reinforcement of polymer composites,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 106, pp. 77–83, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.02.016>.
- [78] G. Siqueira, J. Bras, and A. Dufresne, “Cellulosic Bionanocomposites: A Review of Preparation, Properties and Applications,” *Polymers (Basel)*, vol. 2, no. 4, pp. 728–765, 2010, doi: 10.3390/polym2040728.
- [79] I. M. De Rosa, J. M. Kenny, D. Puglia, C. Santulli, and F. Sarasini, “Morphological, thermal and mechanical characterization of okra (*Abelmoschus esculentus*) fibres as potential reinforcement in polymer composites,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 70, no. 1, pp. 116–122, 2010.
- [80] Y. Li, K. L. Pickering, and R. L. Farrell, “Analysis of green hemp fibre reinforced composites using bag retting and white rot fungal treatments,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 29, no. 2, pp. 420–426, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.08.005>.
- [81] H. Yang, R. Yan, H. Chen, D. H. Lee, and C. Zheng, “Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis,” *Fuel*, vol. 86, no. 12–13, pp. 1781–1788, 2007.

- [82] Y. Seki, M. Sarikanat, K. Sever, and C. Durmu\cshahya, "Extraction and properties of *Ferula communis* (chakshir) fibers as novel reinforcement for composites materials," *Compos. Part B Eng.*, vol. 44, no. 1, pp. 517–523, 2013.
- [83] V. A. Alvarez and A. Vázquez, "Influence of fiber chemical modification procedure on the mechanical properties and water absorption of MaterBi-Y/sisal fiber composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, no. 10, pp. 1672–1680, 2006.
- [84] M. C. Paiva, I. Ammar, A. R. Campos, R. Ben Cheikh, and A. M. Cunha, "Alfa fibres: Mechanical, morphological and interfacial characterization," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 6, pp. 1132–1138, 2007.
- [85] A. Alawar, A. M. Hamed, and K. Al-Kaabi, "Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement," *Compos. Part B Eng.*, vol. 40, no. 7, pp. 601–606, 2009.
- [86] G. M. A. Khan, M. Shaheeruzzaman, M. H. Rahman, S. M. A. Razzaque, M. S. Islam, and M. S. Alam, "Surface modification of okra bast fiber and its physico-chemical characteristics," *Fibers Polym.*, vol. 10, no. 1, pp. 65–70, 2009.
- [87] W. Liu, A. K. Mohanty, L. T. Drzal, P. Askel, and M. Misra, "Effects of alkali treatment on the structure, morphology and thermal properties of native grass fibers as reinforcements for polymer matrix composites," *J. Mater. Sci.*, vol. 39, no. 3, pp. 1051–1054, 2004.
- [88] N. Sgriccia, M. C. Hawley, and M. Misra, "Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 39, no. 10, pp. 1632–1637, 2008.
- [89] D. Liu, G. Han, J. Huang, and Y. Zhang, "Composition and structure study of natural *Nelumbo nucifera* fiber," *Carbohydr. Polym.*, vol. 75, no. 1, pp. 39–43, 2009.
- [90] V. Fiore, T. Scalici, F. Nicoletti, G. Vitale, M. Prestipino, and A. Valenza, "A new eco-friendly chemical treatment of natural fibres: Effect of sodium bicarbonate on properties of sisal fibre and its epoxy composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 85, pp. 150–160, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.028>.
- [91] C. Albano, J. Gonzalez, M. Ichazo, and D. Kaiser, "Thermal stability of blends of polyolefins and sisal fiber," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 66, no. 2, pp. 179–190, 1999.
- [92] A. de P. Barbosa, M. Picanço Oliveira, G. R. Altoé, F. M. Margem, and S. N. Monteiro, "Manufacturing of epoxy composites incorporated with Buriti fibers and evaluation of thermogravimetric behavior," in *Materials Science Forum*, 2015, vol. 805, pp. 460–465.
- [93] K. G. Satyanarayana, K. Sukumaran, P. S. Mukherjee, C. Pavithran, and S. G. K. Pillai, "Natural fibre-polymer composites," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 12, no. 2, pp. 117–136, 1990, doi: [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(90\)90049-4](https://doi.org/10.1016/0958-9465(90)90049-4).
- [94] V. S. Sreenivasan, D. Ravindran, V. Manikandan, and R. Narayanasamy, "Mechanical properties of randomly oriented short *Sansevieria cylindrica* fibre/polyester composites," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 4, pp. 2444–2455, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.11.042>.

- [95] P. Gañán and I. Mondragon, “Effect of fiber treatments on mechanical behavior of short fique fiber-reinforced polyacetal composites,” *J. Compos. Mater.*, vol. 39, no. 7, pp. 633–646, 2005.
- [96] I. O. P. C. Series and M. Science, “Superficial modification by alkalization of cellulose Fibres obtained from Fique leaf Superficial modification by alkalization of cellulose Fibres obtained from Fique leaf,” 2018, doi: 10.1088/1757-899X/437/1/012015.
- [97] P. Gañán and I. Mondragon, “Fique fiber-reinforced polyester composites: Effects of fiber surface treatments on mechanical behavior,” *J. Mater. Sci.*, vol. 39, no. 9, pp. 3121–3128, 2004, doi: 10.1023/B:JMSC.0000025841.67124.c3.
- [98] A. Karakoç, A. Miettinen, J. Virkajärvi, and R. Joffe, “Effective elastic properties of biocomposites using 3D computational homogenization and X-ray microcomputed tomography,” *Compos. Struct.*, vol. 273, p. 114302, 2021.
- [99] B. Zuccarello, C. Militello, and F. Bongiorno, “Influence of the anisotropy of sisal fibers on the mechanical properties of high performance unidirectional biocomposite lamina and micromechanical models,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 143, p. 106320, 2021.
- [100] A. Le Duigou, A. Bourmaud, C. Gourier, and C. Baley, “Vertical axis wind turbine design load cases investigation and comparison with horizontal axis wind turbine,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 85, pp. 123–129, 2016.
- [101] A. C. de I. S. AIS and Ministerio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, “NSR 10 TÍTULO B - Cargas,” *Reglam. Colomb. Construcción Sismo Resist. NSR-10*, pp. 530–827, 2010.
- [102] C. Galinos, T. J. Larsen, H. A. Madsen, and U. S. Paulsen, “Vertical axis wind turbine design load cases investigation and comparison with horizontal axis wind turbine,” *Energy Procedia*, vol. 94, pp. 319–328, 2016.
- [103] Z. Cheng, H. A. Madsen, W. Chai, Z. Gao, and T. Moan, “A comparison of extreme structural responses and fatigue damage of semi-submersible type floating horizontal and vertical axis wind turbines,” *Renew. Energy*, vol. 108, pp. 207–219, 2017.