

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA PROPELA PARA DRON DE MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADO CON MATERIAL NATURAL

COMPONENTE: DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROPELAS CON MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADO CON FIBRA NATURAL Y OBTENIDAS POR EL MÉTODO DE COMPRESIÓN

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

RICARDO JAVIER SÁNCHEZ PROAÑO

ricardo.sanchez01@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. PATRICIA ARACELLY RODRIGUEZ SALAZAR PHD

patricia.rodriguez@epn.edu.ec

DMQ, agosto 2023

CERTIFICACIONES

Yo, Ricardo Javier Sánchez Proaño declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Ricardo Javier Sánchez Proaño

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Ricardo Javier Sánchez Proaño, bajo mi supervisión.

ING. PATRICIA ARACELLY RODRIGUEZ SALAZAR PHD.
DIRECTORA

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

NOMBRE_REVISOR1
REVISOR1 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

NOMBRE_REVISOR2
REVISOR2 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

RICARDO JAVIER SÁNCHEZ PROAÑO

ING. PATRICIA ARACELLY RODRIGUEZ SALAZAR PHD

DEDICATORIA

Dedico este logro a mi propia persona, a mi constancia y a mi familia que ha brindado su apoyo incondicional a lo largo de mi etapa académica. A mis amigos, quienes han sido un apoyo con su compañía, risas y comprensión en los momentos de estudio y celebración.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi agradecimiento a Dios, cuya guía y fortaleza han sido una fuente constante de inspiración, su sabiduría y amor me han brindado la fuerza para perseverar en los momentos más difíciles.

A mi familia, por su apoyo incondicional. Su aliento constante y creencia en mí han sido fuente de motivación en cada etapa de mi vida universitaria

A mi tutor de tesis, agradezco profundamente su orientación experta y su dedicación incansable. Sus consejos y conocimientos han enriquecido mi investigación y me han ayudado a crecer como estudiante y como individuo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	IX
ABSTRACT.....	X
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del componente desarrollado.....	1
1.2 Objetivo general.....	2
1.3 Objetivos específicos	2
1.4 Alcance.....	3
1.5 Marco teórico	3
1.6 Principio del formulario.....	9
2 METODOLOGÍA.....	16
2.1 Revisión exhaustiva del estado del arte	16
2.2 Selección del material compuesto adecuado	16
2.3 Selección para el material del molde de la propela	19
2.4 Diseño y fabricación del molde de la propela APC 12x8 EP.....	20
2.5 Fabricación de la propela	21
2.6 Evaluación del rendimiento	25
3 PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	28
3.1 Pruebas	28
3.2 Resultados.....	28

3.3	Conclusiones	31
3.4	Recomendaciones	33
4	Referencias	35
5	ANEXOS	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Fibras longitudinales. [7].....	7
Figura 2.	Fibras longitudinales. [7].....	8
Figura 3.	Material compuesto con fibra de piña de 10mm. [12].....	13
Figura 4.	Fibras de coco de 1-10 mm. [16]	15
Figura 5.	Moldes fabricados en CNC.....	21
Figura 6.	Trapiche	21
Figura 7.	Hojas de piña luego de ser pasadas por el trapiche.	22
Figura 8.	Moldes después de ser lacados	22
Figura 9.	Mezclado de la resina.....	23
Figura 10.	Aplicación de la cera desmoldante.	23
Figura 11.	Compactado del material en el molde.....	24
Figura 12.	Propela lista para desmoldar.	24
Figura 13.	Propelas balanceadas	25
Figura 14.	Banco de pruebas modificado	25
Figura 15.	Soporte de madera colocado en el banco de pruebas y asegurado con prensas	26
Figura 16.	Propela fracturada al 50% de aceleración.	26
Figura 17.	Recubrimiento del túnel de viento en área crítica.....	27
Figura 18.	Grafica Empuje vs RPM	28
Figura 19.	Throttle vs RPM.....	29
Figura 20.	Eficiencia vs RPM.....	30
Figura 21.	Consumo vs Empuje.....	30

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Propiedades físicas de distintas fibras naturales.....	12
Tabla 2.	Propiedades mecánicas de distintas fibras naturales.....	13
Tabla 3.	Resultados de las propiedades del refuerzo de fibra de abacá.	15
Tabla 4.	Evaluación de cada criterio	18
Tabla 5.	Evaluación de las soluciones respecto a la resistencia a la tracción	18
Tabla 6.	Evaluación de las soluciones respecto a la resistencia a la flexión.	18
Tabla 7.	Evaluación de las soluciones respecto al costo	19
Tabla 8.	Evaluación de las soluciones respecto a la facilidad de obtención.....	19
Tabla 9.	Tabla de conclusiones para la selección de la fibra.	19
Tabla 10.	Evaluación de cada criterio.....	19
Tabla 11.	Evaluación de las soluciones respecto a la facilidad de maquinarse	20
Tabla 12.	Evaluación de las soluciones respecto a la facilidad de desmoldeo..	20
Tabla 13.	Evaluación de las soluciones respecto al costo	20
Tabla 14.	Evaluación de las soluciones respecto al acabado superficial	20
Tabla 15.	Conclusiones para la selección de la fibra.	20

RESUMEN

El siguiente texto presenta el proceso de concepción y manufactura de una propela APC 12X8 EP elaborada a partir de materiales compuestos, diseñada específicamente para su integración en sistemas de aeronaves no tripuladas (UAVs). La etapa primordial involucra un análisis en la selección del material compuesto óptimo, un compuesto híbrido constituido por fibras de piña combinadas con una matriz de resina epoxi. Esta elección resulta de una evaluación de propiedades mecánicas adecuadas para el área aeroespacial.

Luego se tiene la manufactura de moldes, donde la elección de madera como material para su construcción se sustenta en consideraciones de desmoldeo eficiente y costos de producción, frente a los materiales clásicos del acero o aluminio.

Finalmente, el proceso de prueba y validación de la propela se ejecuta en dos etapas. Inicialmente, se somete la propela a condiciones de ausencia de velocidad del viento (0 m/s) para determinar su capacidad operativa antes de alcanzar el punto de fractura, lo que proporciona información vital para asegurar la seguridad en futuros escenarios de vuelo. Posteriormente, utilizando un túnel de viento, se procede a evaluar la propela a una velocidad de flujo de 5 m/s, lo que simula condiciones realistas de vuelo. Las métricas tabuladas abarcan empuje, eficiencia, revoluciones por minuto, consumo de energía en amperios y aceleración. Dichos datos se extraen de un banco de pruebas especialmente configurado para sistemas de propulsión de UAVs de ala fija, con el enfoque particular en evaluar y analizar el consumo energético.

PALABRAS CLAVE: propela, manufactura, material compuesto, resina, piña, madera.

ABSTRACT

The following text presents the conception and manufacturing process of an APC 12X8 EP propeller made from composite materials, specifically designed for its integration into unmanned aircraft systems (UAVs). The primary stage involves an analysis in the selection of the optimal composite material, a hybrid composite made up of pineapple fibers combined with an epoxy resin matrix. This choice results from an evaluation of adequate mechanical properties for the aerospace area.

Then there is the manufacture of molds, where the choice of wood as a material for its construction is based on considerations of efficient demolding and production costs, compared to the classic materials of steel or aluminum.

Finally, the propeller testing and validation process is carried out in two stages. Initially, the propeller is subjected to conditions of no wind speed (0 m/s) to determine its operational capacity before reaching the fracture point, which provides vital information to ensure safety in future flight scenarios. Subsequently, using a wind tunnel, the propeller is evaluated at a flow velocity of 5 m/s, which simulates realistic flight conditions. Tabulated metrics include thrust, efficiency, revolutions per minute, power draw in amps, and acceleration. Said data is extracted from a test bench specially configured for fixed-wing UAV propulsion systems, with a particular focus on evaluating and analyzing energy consumption.

KEYWORDS: propellers, manufacturing, composite material, resin, pineapple, wood

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del componente desarrollado

El presente estudio se enfoca en el desarrollo integral de una propela de tipo APC 12X8 EP, en material compuesto constituido de matriz de resina epoxi y refuerzo de fibras naturales provenientes de la piña (Ananas comosus). La intención principal de este enfoque es la exploración de nuevos materiales ambientalmente sostenibles que puedan reemplazar plásticos convencionales en la fabricación de propelas, contribuyendo así a la mitigación del impacto ambiental y al fomento de prácticas más responsables, esta idea puede ser el inicio de la economía circular dentro del mercado de propelas para drones, ya que estas son el mayor consumo de plásticos que tiene esta área, dado que siempre deben ser reemplazadas por otras, después de un cierto número de horas de uso.

La elección de la resina epoxi como matriz polimérica se basa en su notable capacidad de adherencia y su capacidad para resistir fuerzas de corte y deformaciones, lo que la hace adecuada para aplicaciones aeroespaciales. La incorporación de fibras de piña en el compuesto no solo se alinea con los objetivos de sostenibilidad, sino que también se busca aprovechar las características inherentes de esta fibra natural, como su rigidez, resistencia y peso relativamente ligero.

Para garantizar un diseño eficaz y robusto, se llevaron a cabo análisis de materiales previamente establecidos en la industria, con el fin de entender y replicar las propiedades mecánicas deseadas. Esto permitió optimizar el proceso de selección de materiales y la configuración del compuesto para lograr una combinación óptima de resistencia y ligereza.

En la fase subsiguiente, se abordó la etapa de diseño, donde se definieron las características geométricas y estructurales de la propela. Se emplearon herramientas de modelado asistido por computadora (CAD) para lograr una representación precisa de la geometría y asegurar que se cumplan los requisitos aerodinámicos y de rendimiento específicos del dron. Se proporcionó especial cuidado al diseño de las palas de la propela para garantizar una distribución uniforme de fuerzas y minimizar cualquier potencial desequilibrio que lleve a su fractura.

La fabricación de las propelas se llevó a cabo mediante la técnica de moldeo, utilizando moldes diseñados previamente. La meticulosa elaboración de los moldes aseguró la reproducción fiel de la forma geométrica deseada y permitió la producción coherente de propelas con buen acabado superficial. La adecuada compactación del material compuesto

durante el proceso de moldeo fue esencial para mantener una estructura homogénea y lograr las propiedades mecánicas previstas.

1.2 Objetivo general

Desarrollar una metodología de diseño y fabricación de una propela APC 12x8 EP para dron, utilizando materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra natural. El enfoque se centró en la creación de una propela altamente eficiente y resistente, optimizada para optimizar el rendimiento y la estabilidad del dron, al tiempo que se redujo el impacto ambiental mediante el uso de materiales ecológicos y sostenibles. A través de una investigación exhaustiva, análisis y pruebas rigurosas, se buscó obtener un diseño final que eleve significativamente su desempeño y eficiencia, abriendo el camino hacia una nueva generación de tecnologías aéreas más amigables con el medio ambiente.

1.3 Objetivos específicos

1. Efectuar una revisión exhaustiva del estado del arte en el ámbito de los materiales compuestos con matriz polimérica reforzada con fibras naturales. Esta investigación permitió obtener una comprensión detallada de los avances, investigaciones previas y aplicaciones actuales de estos materiales en diversas industrias.
2. Seleccionar cuidadosamente el material compuesto que presente las propiedades mecánicas más adecuadas para la fabricación de la propela. Una vez identificado, se procedió a replicar este material compuesto con precisión, asegurando la coherencia y reproducibilidad de los resultados.
3. Diseñar la propela APC12x8 EP utilizando el material compuesto seleccionado y teniendo en cuenta aspectos fundamentales de la aerodinámica, estructurales y de rendimiento específico. Este diseño se llevó a cabo utilizando herramientas de ingeniería asistida por computadora para optimizar la forma y la función de la propela.
4. Mecanizar la propela diseñada utilizando el proceso de fabricación por maquinado CNC. Este método de producción aseguró una fabricación precisa y uniforme de la propela, permitiendo mantener altos estándares de acabado y rendimiento aerodinámico.
5. Evaluar el funcionamiento de la propela fabricada, pasando por un balanceo de masa para luego someterla a pruebas en un túnel de viento con flujo de viento controlado. Esta simulación de condiciones reales de vuelo permitió medir y analizar

aspectos clave del rendimiento de la propela, incluyendo la eficiencia de propulsión y la resistencia al viento.

1.4 Alcance

El objetivo de este estudio es la fabricación de una propela APC 12x8 EP utilizando un material compuesto con matriz de resina epoxi reforzado con fibra natural, como continuación del trabajo de integración curricular realizado por G. Peralta en 2022. En dicho trabajo, se seleccionó una fibra natural disponible en el país que mostró las características mecánicas, proporciones y disponibilidad más adecuadas para ser utilizada en la fabricación de la propela mencionada. El presente estudio tiene como objetivo probar un nuevo proceso de fabricación para propelas de material compuesto y comparar el rendimiento entre fibras naturales y materiales particulados, con el fin de determinar la mejor opción.

Una vez seleccionado el material de la fibra adecuada, se procedió a su elaboración mediante maquinado CNC para obtener la geometría de la propela. Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas en el túnel de viento utilizando el "Banco de pruebas para el sistema de propulsión de un UAV de ala fija enfocado a la realización de ensayos de consumo de energía" desarrollado por Hernández y Nandar en 2021. Los parámetros de prueba incluyeron la velocidad de operación del motor, velocidad del aire, potencia, empuje y eficiencia. Estas pruebas permitieron obtener gráficas que facilitaron la comparación del rendimiento de las propelas bajo diversas condiciones.

1.5 Marco teórico

Material compuesto

Se define un material compuesto como un sistema o combinación de materiales que resulta de la unión de dos o más componentes sin una reacción química entre ellos, lo que los hace insolubles entre sí. Esta combinación da lugar a un nuevo material con propiedades características específicas que no se encuentran en ninguno de los componentes originales. Es importante destacar que este nuevo material se compone de dos fases distintas: una fase continua, llamada matriz, y otra fase discontinua conocida como refuerzo.

Es crucial que los componentes del material compuesto no se disuelvan ni se fusionen completamente entre sí. Por lo tanto, se debe poder distinguir la identidad de los materiales y su interfase mediante métodos físicos. Las propiedades del nuevo material están

estrechamente vinculadas al tipo de interfase presente y a las características particulares de los componentes que lo conforman. [1]

Tipos de materiales compuestos

Entre las diversas clasificaciones de los materiales compuestos, una de las más significativas se centra en su matriz, y en esta categoría se pueden identificar tres grupos principales:

- a) Materiales compuestos de matriz metálica
- b) Materiales compuestos de matriz cerámica
- c) Materiales compuestos de matriz polimérica

Los materiales compuestos de matriz metálica han sido especialmente desarrollados para aplicaciones en componentes aeroespaciales y motores de automóviles debido a su alta resistencia y bajo peso. Se clasifican en tres categorías según el tipo de refuerzo incorporado: reforzados con fibras continuas, reforzados con fibras discontinuas y reforzados con partículas. Ejemplos de estos materiales incluyen aleaciones de aluminio con refuerzos de fibras de boro, aleaciones de aluminio reforzadas con partículas de alúmina y carburo de silicio, entre otros.

Los materiales compuestos de matriz cerámica son más recientes y mejoran las propiedades mecánicas, como la resistencia y tenacidad, de los materiales cerámicos tradicionales, especialmente a bajas temperaturas. También se clasifican según el tipo de refuerzo incorporado: fibras continuas, fibras discontinuas y partículas. Los principales materiales de refuerzo utilizados con matrices cerámicas son el carburo de silicio y el óxido de aluminio, mientras que las agujas cerámicas de carburo de silicio se emplean como refuerzo en el caso de fibras discontinuas y partículas.

En cuanto a los materiales compuestos de matriz polimérica, se definen como materiales con buenas propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y agentes químicos, y destacan por su capacidad de ser moldeados con gran libertad de formas. Estos materiales tienen una matriz constituida por un polímero y un refuerzo de fibra, que puede ser sintética o inorgánica. Los materiales compuestos termoestables son especialmente notables en esta categoría, y entre sus principales grupos de matrices se encuentran las resinas poliéster, vinil éster, epoxi y fenólicas. En cuanto al refuerzo, se utilizan fibras de vidrio, cerámicas (como el kevlar) y de carbono, presentándose en diferentes tipos de estructuras textiles simples o combinadas. [2]

Matrices de materiales compuestos

Para materiales usados como base de una combinación podemos encontrar varias opciones, sin embargo, nos centraremos en el caso de bases poliméricas que son el grupo más común utilizado en la industria en general. La matriz en gran parte es la parte que define las propiedades físicas y químicas del nuevo material, brindando la cohesión entre estos.

Clasificación de los polímeros

Existe una diversa clasificación de polímeros, en base a distintos criterios, ya sea por su origen, o por su comportamiento térmico el cual los divide en:

a) Termoplásticos

Son aquellos que, a temperaturas relativamente elevadas, exhiben propiedades de deformabilidad o flexibilidad, pudiendo fundirse al calentarse y endurecerse en un estado de transición vítrea al enfriarse lo suficiente. Estos materiales mayormente consisten en polímeros de alto peso molecular, en los cuales las cadenas están unidas mediante fuerzas de Van der Waals débiles (como en el caso del polietileno), fuertes interacciones dipolo-dipolo y enlace de hidrógeno, o incluso apilamiento de anillos aromáticos (como se observa en el poliestireno). Es relevante señalar que los polímeros termoplásticos difieren de los polímeros termoestables o termofijos en que, tras su calentamiento y moldeo, tienen la capacidad de ser recalentados y conformarse en otras formas u objetos. **[3]**

b) Elastómeros

Los elastómeros, que generalmente pertenecen a la categoría de polímeros termoestables, aunque también pueden ser termoplásticos, presentan la característica de tener largas cadenas poliméricas que se entrelazan durante el proceso de curado. La estructura molecular de estos materiales puede concebirse como una especie de "espagueti con albóndigas", donde las albóndigas representan los enlaces químicos. La elasticidad inherente a los elastómeros surge de la capacidad de sus cadenas para cambiar de posición entre sí, lo que les permite distribuir y absorber un esfuerzo aplicado. La presencia de enlaces covalentes asegura que el elastómero recupere su forma original una vez que el esfuerzo se detenga. **[4]**

Esta extrema flexibilidad de los elastómeros permite que puedan alargarse significativamente, en un rango que va desde un 5% hasta un impresionante 700%, según las propiedades específicas del material en cuestión. No obstante, si la cantidad de enlaces

es insuficiente o prácticamente nula, la aplicación del esfuerzo puede resultar en una deformación permanente del material.

c) Termoestables

Estos materiales, conocidos por su capacidad de mantener su forma y propiedades a temperaturas elevadas, desempeñan un papel crucial en la creación de estructuras duraderas y livianas. El término "termoestable" se refiere a su propiedad intrínseca de endurecer irreversiblemente después de someterse a un proceso de curado, lo que resulta en una estructura molecular tridimensional. Esta propiedad es consecuencia de su reticulación química, donde las moléculas se entrelazan en una red tridimensional durante el proceso de curado. Esta red confiere al material su resistencia térmica y mecánica, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en las que se enfrenta una exposición prolongada a condiciones extremas. Algunos ejemplos notables de materiales termoestables incluyen las resinas epoxi, las resinas fenólicas y las resinas de poliimida. Estas resinas, una vez curadas, exhiben propiedades mecánicas superiores y una alta resistencia química y térmica, lo que los convierte en candidatos ideales para aplicaciones en la industria aeroespacial, automotriz y de construcción [5]

Sistema Matriz – Refuerzo

Es el refuerzo el responsable de conferir las propiedades mecánicas primarias al nuevo material. Específicamente, las fibras de refuerzo son el elemento resistente fundamental del material. No obstante, de forma aislada, su eficiencia no alcanza el nivel óptimo. Por tanto, es necesario combinarlas con una matriz que las proteja de factores externos y que las someta a un esfuerzo específico.

La orientación de las fibras de refuerzo juega un papel crucial. Si se analiza una probeta compuesta por refuerzos unidireccionales y sometida a tracción en la dirección de las fibras (Fig.1), se observa que la resistencia a la tracción de la matriz en el material compuesto es mayor que cuando se encuentra de manera individual. Sin embargo, es importante notar que la resistencia de las fibras de refuerzo se ve ligeramente disminuida en este caso. [6]

Solicitud longitudinal de las fibras

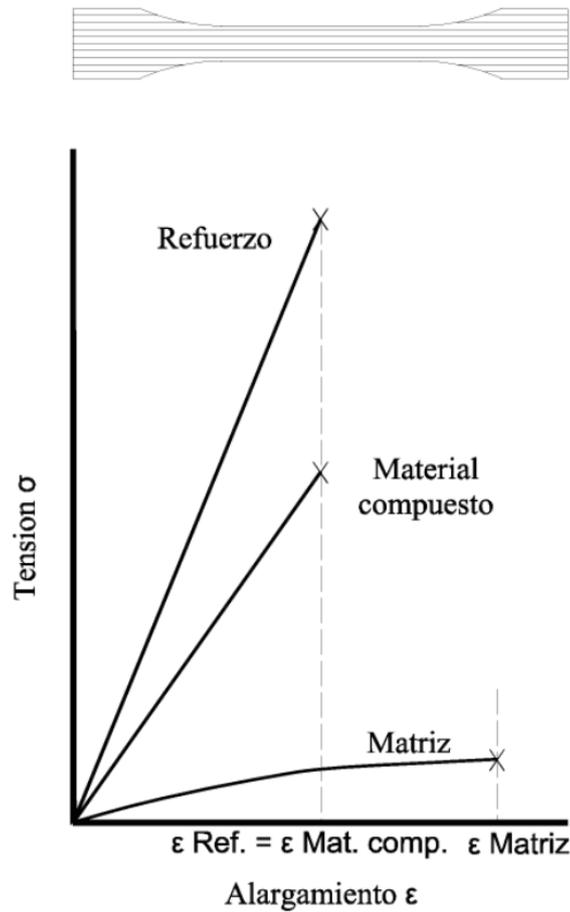


Figura 1. Fibras longitudinales. [7]

Se analiza otra probeta con la misma matriz y materiales de refuerzo, pero esta vez se ha cambiado la orientación de las fibras de refuerzo, de manera que trabajen transversalmente al esfuerzo original de tracción (Fig. 2). En este caso, se observa claramente que los valores de resistencia del nuevo material son inferiores a los de sus componentes predecesores analizados individualmente. Este comportamiento mecánico notablemente diferente en comparación con los materiales isotrópicos lleva a la conclusión de que los materiales compuestos pueden mejorar las propiedades de sus materiales constituyentes originales, siempre y cuando se utilicen de manera adecuada, es decir, teniendo un conocimiento previo de los esfuerzos a los que estarán sometidos.

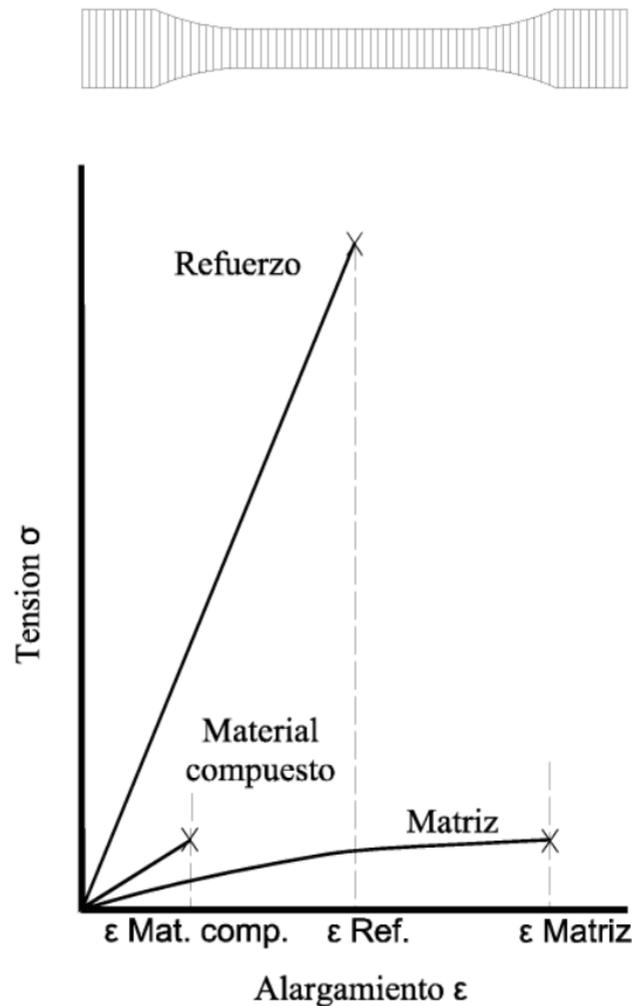


Figura 2. *Fibras longitudinales.* [7]

En contraste con los materiales isotrópicos como por ejemplo el acero o el aluminio, ofrecen la posibilidad de diseñar un nuevo material anisotrópico con características específicas, lo que permite una verdadera "personalización" de las propiedades finales del material. Esto implica un cambio en el enfoque de la concepción de estructuras, brindando una perspectiva completamente innovadora que permite una mayor libertad durante el proceso de diseño que es una fase sumamente creativa donde se puede experimentar mucho.

Resina Epoxi

Las resinas epoxi representan una clase destacada de materiales compuestos de alta calidad, siendo ampliamente preferidas debido a sus superiores propiedades físicas y mecánicas en comparación con resinas de poliéster y vinil éster. Además, exhiben una excelente capacidad de adherencia a una amplia gama de materiales de refuerzo, lo que conduce a la obtención de laminados con una alta carga de fibras. Estas resinas están compuestas principalmente de epóxidos, con bisfenol A como uno de los componentes

habituales, que polimerizan mediante reacciones de poliadición al interactuar con agentes de curado polifuncionales, tales como fenoles, aminas o poliácidos. La velocidad y control del proceso de curado se regulan mediante el empleo de catalizadores y aceleradores.

Las composiciones de sistemas de resinas epoxi comprenden una amalgama intrincada de componentes que abarcan resinas, agentes de curado, catalizadores, aceleradores, modificadores termoplásticos y otros aditivos. La influencia colectiva de estos elementos en el perfil de propiedades definitivas de la resina es notable. El carácter intrínseco tanto del epóxido como del agente de reticulación incide en atributos de importancia crítica, tales como la estabilidad térmica, el mecanismo de polimerización y la maleabilidad del compuesto. El proceso de endurecimiento guarda similitudes con el que acontece en resinas de poliéster y vinil éster; sin embargo, la incorporación precisa del agente endurecedor adquiere una significación de primera magnitud con miras a garantizar una reacción integral. Un déficit o exceso de endurecedor podría dar lugar a reacciones incompletas o no deseadas, alterando el peso molecular de la resina y, en consecuencia, resultando en propiedades finales inferiores.

Con el fin de lograr una polimerización óptima en la mayoría de las matrices de resinas epoxi, se hace imprescindible la implementación de un proceso de aplicación de calor externo, ya sea a través de un régimen de curado inicial o mediante un proceso de postcurado subsiguiente. Cuando el propósito es la consecución de atributos sobresalientes en condiciones de temperatura ambiente, deviene necesario el empleo de agentes catalizadores específicos orientados hacia tal fin. Las matrices de resinas epoxi se caracterizan por la manifestación de notables propiedades mecánicas, una marcada resistencia térmica, una destacable capacidad de resistencia ante procesos abrasivos, así como una contracción reducida durante la fase de polimerización, situada en el intervalo del 0 al 1%. Estas matrices exhiben, adicionalmente, atributos deseables en términos de su conductividad eléctrica y térmica, juntamente con una apreciable resiliencia en presencia de agentes químicos corrosivos.

1.6 Principio del formulario

Para ajustar las propiedades mecánicas, es posible incorporar sustancias inertes, mientras que la contracción puede mitigarse mediante el uso de aditivos o una adecuada combinación con la fibra de refuerzo. Además, se puede lograr una elongación superior a la de las resinas de poliéster mediante la incorporación de aditivos.

Dentro del panorama de aplicaciones prominentes atribuibles a las resinas epoxi, emergen aquellas que se dirigen a estructuras caracterizadas por la necesidad imperante de

conciliar una resistencia sobresaliente con una carga estructural reducida. Ejemplificaciones concretas de tal contexto comprenden embarcaciones de índole competitiva enfocadas en regatas y velocidades elevadas. Asimismo, estas resinas ostentan una presencia destacada en ámbitos tan diversos como el sector defensivo, las aplicaciones aeroespaciales, las plataformas electromagnéticas, los dominios de la electrónica, la manufactura de herramientas, los equipos químicos, la fabricación de contenedores y depósitos de almacenamiento, la categoría de adhesivos industriales y, por último, las redes de conducción tubular.

Aunque las resinas epoxi ofrecen ventajas notables, su alto coste y viscosidad significativa son consideraciones importantes que pueden dificultar su aplicación y procesamiento. Se pueden emplear diluyentes para reducir la viscosidad, pero siempre se debe seguir las recomendaciones del fabricante. La amplia gama de resinas epoxi disponibles en el mercado se distingue por diferentes combinaciones de endurecedores, lo que resulta en tiempos de gel y propiedades finales específicas. La elección adecuada de una resina epoxi se basa en las propiedades finales deseadas, el método de procesamiento y el tipo de aplicación específica. [8]

Refuerzos con fibras

En general, los materiales compuestos exhiben mayor resistencia a la fatiga, mayor rigidez y una favorable relación resistencia-peso al incorporar fibras resistentes y rígidas, aunque frágiles, en una matriz más blanda y dúctil. La matriz del material transmite la fuerza a las fibras, que a su vez soportan la mayor carga aplicada. Estos materiales compuestos pueden ofrecer alta resistencia tanto a temperatura ambiente como a elevadas temperaturas. Al igual que en los materiales compuestos particulados, las propiedades de estos materiales siguen la regla general de mezclas.

Desde una óptica tecnológica, los materiales compuestos de mayor relevancia son aquellos en los cuales la fase dispersa se configura en forma de fibras que actúan como refuerzo. La mayoría de estos compuestos logran mejorar su capacidad de resistencia a la fatiga, rigidez y la relación entre resistencia y peso mediante la incorporación de fibras de naturaleza rígida y con alta resistencia en una matriz de carácter más blando y dúctil. La matriz del compuesto desempeña la función de transferir las cargas generadas hacia las fibras, que, a su vez, asumen la mayor proporción de la fuerza aplicada. Estas fibras pueden ser categorizadas en tres grupos de acuerdo a su diámetro y atributos distintivos, denominados como whiskers, fibras y alambres.

En particular, los whiskers se constituyen como monocristales de escaso grosor, caracterizados por poseer una relación longitud/diámetro sustancial. La dimensión reducida de estas estructuras contribuye a la manifestación de una perfección cristalina considerable, lo que se traduce en una resistencia excepcionalmente elevada. Sin embargo, la producción de estos whiskers se ve restringida por su elevado costo asociado, en virtud de su naturaleza y dimensión.

En el contexto de las fibras, estas se manifiestan como materiales policristalinos o amorfos, exhibiendo diámetros menores y longitudes considerables. Los constituyentes de estas fibras abarcan materiales poliméricos y cerámicos, englobando aramidas, vidrio, carbono, boro, óxido de aluminio y carburo de silicio. Además, fibras de origen natural, tales como abacá, cabuya y coco, son utilizadas como refuerzo en matrices poliméricas. La adopción de estas formulaciones compuestas conlleva beneficios múltiples, como una reducción en los costos de fabricación y un impacto ambiental atenuado.

Desde otra perspectiva, es pertinente destacar la categoría de refuerzos de configuración alámbrica, caracterizados por presentar diámetros de dimensiones sustanciales y por lo general confeccionados a partir de materiales como el acero, molibdeno y tungsteno. Estos elementos se destinan de manera particular como agentes de fortalecimiento en una disposición radial, siendo utilizados de manera destacada en la contextura de los neumáticos automovilísticos. En este contexto, las propiedades que se manifiestan en los compuestos materiales fortalecidos con estructuras fibrosas adquieren una dependencia predominante respecto a variables como la longitud, la orientación, el diámetro, la cantidad y las propiedades mecánicas inherentes a las fibras. Adicionalmente, dichas propiedades también se ven influenciadas por las características atribuibles a la matriz material y a la interacción presente en la interfaz entre la fibra y dicha matriz. [9]

Fibras vegetales.

Las fibras de origen vegetal, que se identifican bajo el término de fibras lignocelulósicas debido a su constitución principal compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina, también incorporan otros componentes de carácter minoritario como proteínas, resinas, ceras y compuestos inorgánicos. La conformación química de estas fibras exhibe variabilidad en función de la especie vegetal, la etapa de desarrollo de la planta y las condiciones ambientales prevalentes. No obstante, en una consideración general, se ha documentado que la relación entre los contenidos de celulosa, hemicelulosas y lignina se estabiliza en una proporción aproximada de 4:3:3.

El contenido de estos componentes en las fibras vegetales influye significativamente en su comportamiento bajo diferentes aplicaciones industriales. Al comprender la composición química de estas fibras, es posible inferir cómo se desempeñarán en diversos procesos y aplicaciones en la industria. [10]

La implementación de fibras naturales en materiales compuestos presenta varias ventajas como es su baja densidad, son materiales biodegradables, no son tóxicos ni perjudiciales a la salud, suelen tener bajo consumo de energía durante su proceso, y ayudan a reducir el consumo de plásticos. En este documento se busca replicar la mejor combinación de material compuesto entre una matriz polimérica y un refuerzo natural para la fabricación de una propela APC de 12x8 para un dron no tripulado, de modo que las propiedades mecánicas del nuevo material no se vean tan afectadas en comparación con las propiedades mecánicas del material convencional usado.

Fibra de Piña

El sector de la agricultura constituye una fuente considerable en lo que respecta a la generación de materiales de naturaleza fibrosa, englobando estructuras tales como raíces, hojas, tallos y otras partes anatómicas de las plantas. Estos componentes, en su mayoría, representan subproductos derivados de los procedimientos agrícolas. En esencia, estas entidades de origen vegetal se caracterizan por estar conformadas primordialmente por fibras lignocelulósicas, hecho que les otorga un potencial de notoriedad en términos de su idoneidad para servir como fuente valiosa destinada a la extracción de celulosa o para su aplicación en la manufactura de materiales compuestos. [11]

A continuación, se muestra propiedades físicas de la piña comparada con algunas otras fibras:

Tabla 1. *Propiedades físicas de distintas fibras naturales*

Fibra	Densidad (g/cm)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Humedad (%)
Cáñamo	1,48	88,00-90,00	7,00 – 10,00	1,50-2,00	3,50-8,00
Sisal	1,45	65,00	12,00	9,90	10,00
Platano	1,35	63,00-64,00	19,00	5,00	10,00-11,00
Piña	1,53	81,00	-	12,70	13,50

(fuente: Salvador, 2008, sin p.)

Por otro lado, las propiedades mecánicas de las fibras son dependientes de las condiciones físicas de las mismas en especial de su grado de humedad.

Tabla 2. *Propiedades mecánicas de distintas fibras naturales*

Fibra	Densidad (g/cm)	Módulo elasticidad (MPa)	Resistencia traccion (MPa)	Alargamiento a rotura (%)
Algodón	-	4,98	264,00	3,00-7,00
Lino	-	24,00	900,00	3,20
Cañamo	1,48	-	285,00	1,30
Sisal	1,45	10,00	552,00	2,50
Platano	1,35	20,00	500,00	6,00
Piña	1,53	4,20	413,00	4,00

(fuente: Salvador, 2008, sin p.)

Del primer caso a analizar de fibra de piña inicialmente se consideró usar porcentajes de 25% y 30 % de refuerzo, obteniendo mejores resultados con el 30% de refuerzo. Otro parámetro importante fue la configuración de su disposición donde se determinó que una disposición al azar de fibras de 4 mm a 10 mm de largo es mejor que una distribución longitudinal o transversal, el autor sugiere una compactación por presión para mejor adherencia entre matriz y refuerzo, el material de refuerzo debe estar seco y libre de impurezas, este no requiere ningún aditivo adicional. De los ensayos de tracción para este material se tuvo un esfuerzo máximo de 102.8 MPa.



Figura 3. Material compuesto con fibra de piña de 10mm. [12]

Fibra de coco

El cocotero (*Cocos nucifera*) se inscribe como una especie de palmera perteneciente a la familia *Arecaceae*. Su origen se atribuye predominantemente a la India, aunque se ha registrado su presencia también en la región caribeña. En el momento actual, la producción a escala considerable de esta especie se encuentra concentrada en naciones como la India, Sri Lanka y Tailandia. [13]

La fibra de coco, una valiosa fuente, es extraída de la capa externa del fruto del cocotero, cuyo cultivo se enfoca principalmente en su contenido de agua y su parte comestible, la pulpa. A pesar de su utilidad, la fibra a menudo es considerada un subproducto y, en la mayoría de los casos, se dispone como desecho.

A nivel nacional, la producción de frutos de coco en Ecuador se estima alrededor de 50,886 toneladas. La provincia de Esmeraldas sobresale como el principal productor con 37,415 toneladas, seguida por Manabí con 11,569 toneladas, de acuerdo a datos proporcionados por una indagación llevada a cabo por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGAP) [14].

Desafortunadamente, en Ecuador no se ha aprovechado el potencial de los residuos sólidos generados por la industria del coco, lo que conduce a que estos se conviertan en desechos destinados a vertederos de basura.

La estructura del coco exhibe una organización que se extiende desde su capa externa hasta su núcleo, iniciando con una envoltura fibrosa conocida como mesocarpio, seguida por el endocarpio y, en última instancia, el endosperma. El endocarpio, un componente excepcionalmente rígido con un grosor aproximado de cinco milímetros, recubre la pulpa comestible o endosperma del coco. [15]

El proceso de obtención de la fibra de coco se origina a partir del mesocarpio del coco. Posteriormente, este es sometido a un proceso de secado al aire libre, expuesto directamente al sol, hasta que la tonalidad verde se pierda y adquiera un matiz completamente café. Este procedimiento, que puede extenderse por un mes, lleva consigo un contenido de humedad del 27,1%. Con el propósito de mejorar la afinidad entre la fibra y la resina, se ejecuta un proceso químico en un medio acuoso utilizando hidróxido de sodio en una concentración del 2%. Esta etapa se extiende por dos horas, tras lo cual se realiza un cambio de recipiente y se coloca la fibra en agua destilada durante toda la noche para eliminar la concentración química. Al día siguiente, se lleva a cabo un lavado exhaustivo de la fibra para eliminar cualquier traza química, proceso que se repite seis veces empleando distintas fuentes de agua. Estos pasos garantizan una disminución en la cantidad de lignina, ceras y otras impurezas indeseables presentes en la fibra de coco.

De los resultados del autor la mejor combinación es utilizar una fracción volumétrica del 30% de refuerzo de fibras cortas de coco (1-10 mm) y 70% de matriz, teniendo un esfuerzo máximo promedio de 21,88 MPa a la tracción.



Figura 4. Fibras de coco de 1-10 mm. [16]

Fibra de abacá

Conocida también como cáñamo de manila, es extraído de la vaina de las hojas del tronco de abacá, una especie nativa de Filipinas y ampliamente presente en los trópicos húmedos, las células de sus hojas son largas y delgadas que forman parte de una estructura lignina por encima del 15%, es una planta de gran resistencia mecánica, flotabilidad, tiene una gran relación longitud- diámetro, esta es una especie con valores diferentes de humedad, composición dependiendo de donde crezca, dentro del Ecuador es común encontrarla en cultivos de la provincia de Santo Domingo. [17]

Finalmente se analizó la posibilidad de utilizar una matriz de PLA y un refuerzo natural de abacá en un 20% de volumen, que son principalmente fibras cortas de 10 mm, que presentaron las siguientes características mecánicas:

Tabla 3. Resultados de las propiedades del refuerzo de fibra de abacá. [18]

Material	Fracción volumétrica de fibra	Resistencia a tracción (Mpa)	Modulo elasticidad (Mpa)	Resistencia flexión ((Mpa)	Modulo Flexión (Mpa)	Resistencia impacto (J/m)	Porcentaje de elongación
PLA	0,00	50,00	4030,00	69,00	2755,00	196,94	1,62
Material con fibra de 10 mm	20,00	35,00	3366,00	43,00	2359,00	500,00	1,18

2 METODOLOGÍA

2.1 Revisión exhaustiva del estado del arte

Se realizó una búsqueda sistemática de literatura científica y técnica en bases de datos académicas, revistas especializadas, conferencias y patentes relacionadas con materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales, definiendo los conceptos básicos que nos permitan profundizar en el tema, de forma que se logre un coherente acercamiento a casos de estudios reales para poder replicar dichas composiciones, también fue importante relacionar los materiales compuestos de fibras naturales con la aplicación en la industria aeronáutica y en la fabricación de propelas.

Se recopilaron datos sobre las propiedades mecánicas y físicas de diferentes tipos de materiales compuestos naturales y sus comparaciones con materiales compuestos sintéticos.

Se analizaron estudios previos sobre el rendimiento y la durabilidad de propelas fabricadas con materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales en condiciones reales de vuelo.

2.2 Selección del material compuesto adecuado

Se localizaron fuentes bibliográficas que contenían a detalle distintas fases de la caracterización del material compuesto donde se contenían ensayos de laboratorio para evaluar las propiedades mecánicas de diferentes tipos de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales, como resistencia a la tracción, rigidez y resistencia al impacto.

Se compararon los resultados de los ensayos para seleccionar el material compuesto más adecuado. Para esto se realizó una comparación ponderada extrayendo los datos de las alternativas antes estudiadas, el proceso del método se detalla a continuación:

Identificación de criterios de evaluación

En primer lugar, fue necesario identificar los criterios que se utilizarían para evaluar las alternativas. Estos criterios debían estar relacionados con los objetivos generales y específicos de la investigación, así como con los requisitos técnicos y funcionales de la propela. A continuación, se presentan los criterios más relevantes para la selección.

- Costos
- Facilidad de obtención

- Resistencia a la tracción
- Resistencia a la flexión

Asignación de pesos a los criterios

Una vez identificados los criterios, se debe asignar un peso a cada uno de ellos para reflejar su importancia relativa en el logro de los objetivos generales de la investigación.

Los pesos pueden asignarse de manera subjetiva, a través de la opinión de expertos o mediante técnicas de toma de decisiones multicriterio como el método de los pesos lineales o el análisis jerárquico.

Evaluación de alternativas respecto a los criterios

Se procedió a evaluar cada alternativa en función de los criterios establecidos. Esto implicó recolectar datos y realizar mediciones relevantes para cada criterio.

Es importante utilizar datos cuantitativos siempre que sea posible, pero también se pueden considerar evaluaciones cualitativas o juicios de expertos en caso de datos limitados.

Normalización de los datos

Los datos recopilados para cada criterio pueden tener diferentes escalas y unidades. Para asegurar una comparación justa entre las alternativas, es necesario normalizar los datos para que estén en la misma escala.

Se pueden aplicar técnicas de normalización, como la normalización min-max, para transformar los datos a un rango común (por ejemplo, de 0 a 1).

Ponderación de las alternativas

Una vez normalizados los datos, se procedió a multiplicar cada valor por el peso correspondiente del criterio para obtener un valor ponderado para cada alternativa y cada criterio.

Luego, se sumaron los valores ponderados para cada alternativa para obtener una puntuación total que refleje la calidad general de cada opción.

Análisis de sensibilidad

Para garantizar la robustez del proceso de ponderación, se puede realizar un análisis de sensibilidad. Esto implica variar los pesos de los criterios para observar cómo cambia la clasificación de las alternativas.

Se pueden explorar diferentes escenarios y considerar cómo los resultados podrían cambiar bajo diferentes condiciones o suposiciones.

Selección de la mejor alternativa

Finalmente, con base en las puntuaciones totales obtenidas, se seleccionó la alternativa con la puntuación más alta como la mejor solución para el material utilizado de la propela APC 12x8 EP.

Se debe tener en cuenta que este proceso de ponderación es una herramienta de apoyo a la toma de decisiones y puede estar sujeto a revisión y ajustes según se obtengan nuevos datos o se reconsideren los objetivos y requisitos del proyecto.

Es fundamental realizar este proceso con rigurosidad y objetividad para tomar una decisión informada que conduzca al mejor diseño de la propela.

Tabla 4. Evaluación de cada criterio.

	Resistencia a tracción	Resistencia a flexión	Costo	Obtención	$\Sigma+1$	Ponderación
Resistencia a tracción	X	0,50	1,00	1,00	3,50	0,35
Resistencia a flexión	0,50	X	1,00	1,00	3,50	0,35
Costo	0,00	0,00	X	0,00	1,00	0,10
Obtención	0,00	0,00	1,00	X	2,00	0,20
				Suma	10,00	1,00

Tabla 5. Evaluación de las soluciones respecto a la resistencia a la tracción.

Resistencia a tracción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1	X	1,00	1,00	3,00	0,50
Alternativa 2	0,00	X	0,00	1,00	0,17
Alternativa 3	0,00	1,00	X	2,00	0,33
				6,00	1,00

Tabla 6. Evaluación de las soluciones respecto a la resistencia a la flexión.

Resistencia a flexión	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1	X	1,00	1,00	3,00	0,50
Alternativa 2	0,00	X	0,00	1,00	0,17
Alternativa 3	0,00	1,00	X	2,00	0,33
				6,00	1,00

Tabla 7. Evaluación de las soluciones respecto al costo

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1	X	0,00	0,00	1,00	0,17
Alternativa 2	1,00	X	0,00	2,00	0,33
Alternativa 3	1,00	1,00	X	3,00	0,50
				6,00	1,00

Tabla 8. Evaluación de las soluciones respecto a la facilidad de obtención

Obtención	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1	X	0,00	0,50	1,50	0,25
Alternativa 2	1,00	X	1,00	3,00	0,50
Alternativa 3	0,50	0,00	X	1,50	0,25
				6,00	1,00

Tabla 9. Tabla de conclusiones para la selección de la fibra

Conclusiones	Resistencia a tracción	Resistencia a flexión	Costo	Obtención	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1	0,17	0,17	0,01	0,05	4,41	1,00
Alternativa 2	0,05	0,06	0,03	0,10	4,25	3,00
Alternativa 3	0,11	0,11	0,05	0,05	4,33	2,00

Para la elección entre alternativas la solución que mejor se ajusta a los criterios de evaluación es la alternativa 1, que es la fibra de piña.

2.3 Selección para el material del molde de la propela

Se siguió el mismo procedimiento de ponderaciones utilizado en la selección de la fibra, donde la alternativa 1 es acero, la alternativa 2 es madera y la alternativa 3 es acrílico. A continuación, se muestran las tablas de ponderación:

Tabla 10. Evaluación de cada criterio

	Facilidad de maquinar	Facilidad de desmoldar	Costo	Acabado superficial	$\Sigma+1$	Ponderación
Facilidad de maquinar	X	1,00	1,00	1,00	4,00	0,36
Facilidad de desmoldar	0,50	X	0,50	0,50	2,50	0,23
Costo	0,00	1,00	X	0,50	2,50	0,23
Acabado superficial	0,00	0,50	0,50	X	2,00	0,18
				suma	11,00	1,00

Tabla 11. Evaluación de las soluciones respecto a la facilidad de maquinar

Facilidad de maquinar	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1	X	0,00	0,50	1,50	0,23
Alternativa 2	1,00	X	1,00	3,00	0,46
Alternativa 3	1,00	0,00	X	2,00	0,31
				6,50	1,00

Tabla 12. Evaluación de las soluciones respecto a la facilidad de desmoldeo

Facilidad de desmoldar	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1	X	0,00	0,50	1,50	0,25
Alternativa 2	1,00	X	0,50	2,50	0,42
Alternativa 3	1,00	0,00	X	2,00	0,33
				6,00	1,00

Tabla 13. Evaluación de las soluciones respecto al costo

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1	X	0,00	0,50	1,50	0,27
Alternativa 2	1,00	X	0,50	2,50	0,45
Alternativa 3	0,50	0,00	X	1,50	0,27
				5,50	1,00

Tabla 14. Evaluación de las soluciones respecto al acabado superficial

Acabado superficial	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1	X	1,00	0,50	2,50	0,38
Alternativa 2	0,00	X	0,50	1,50	0,23
Alternativa 3	0,50	1,00	X	2,50	0,38
				6,50	1,00

Tabla 15. Conclusiones para la selección de la fibra

Conclusiones	Facilidad de maquinar	Facilidad de desmoldar	Costo	Acabado superficial	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1	0,08	0,06	0,06	0,07	4,27	1
Alternativa 2	0,17	0,09	0,10	0,04	4,41	3
Alternativa 3	0,11	0,08	0,06	0,07	4,32	2

Para la elección entre alternativas la solución que mejor se ajusta a los criterios de evaluación es la alternativa 2, que es el molde de madera.

2.4 Diseño y fabricación del molde de la propela APC 12x8 EP

Se empleó un software de ingeniería asistida por computadora (CAD) para realizar el diseño detallado de la propela, teniendo en cuenta los perfiles aerodinámicos y las características específicas del dron.

Una vez diseñada la propela se fabricó el molde con un espesor mayor a la propela original, con el fin de garantizar la compactación adecuada, quedando así de un espesor total de 4,4 mm, para un molde macho y hembra que fue la solicitud requerida.



Figura 5. Moldes fabricados en CNC.

2.5 Fabricación de la propela

Para la fabricación de las propelas primero se preparó las fibras de piña pasando las hojas por un trapiche o máquina para jugos de caña, como se muestra a continuación:



Figura 6. Trapiche
(Fuente: propia)

De este modo las hojas quedan un poco más sueltas facilitando la extracción de sus fibras, para luego ser separadas a mano de forma que queden en forma de hilos muy finos



Figura 7. Hojas de piña luego de ser pasadas por el trapiche.
(Fuente: propia)

Luego se procede a dejar que sequen durante el periodo de dos meses, una vez secos se los corta en longitudes de 4 a 10 mm.

Por otro lado, se prepara los moldes para cubrirlos con una capa de sellador, para esto se lija los moldes unas 3 veces antes, proceso que ayudó a dar un mejor acabado superficial a las propelas.



Figura 8. Moldes después de ser lacados
(Fuente: propia)

Una vez listo el material para la matriz que es una resina epoxi de proporción 1:1 y las fibras de piña ya secas y cortadas, se mezcla la resina con el catalizador de forma suave que no produzca burbujas hasta lograr una mezcla homogénea.



Figura 9. Mezclado de la resina.
(Fuente: propia)

En el caso de tener burbujas durante la mezcla se aplica calor durante unos cinco minutos hasta que estas disminuyan, para la aplicación de calor se utilizó una secadora de cabello en la superficie de mezclado.

Poco a poco se fue añadiendo las fibras de piña hasta que se logró una mezcla homogénea.

Simultáneamente se colocó cera desmoldante en ambos lados del molde para facilitar el desmolde, este proceso se realiza de 3 a 5 veces cada vez que termine de secar cada capa.



Figura 10. Aplicación de la cera desmoldante.
(Fuente: propia)

Se riega de forma uniforme la mezcla sobre el molde, y se compacta poco a poco, llenando cada parte del molde para cerrarlo.



Figura 11. Compactado del material en el molde.
(Fuente: propia)

Una vez que se unió el molde, se colocó un peso de 24 Kg sobre su centro para mantenerlo cerrado durante 30 horas antes de ser abierto.

Se abre el molde con cuidado y se separan las partes macho - hembra, se saca la propela, se corta la rebaba sobrante, y se deja la pieza durante 15 días para que su curado se complete.

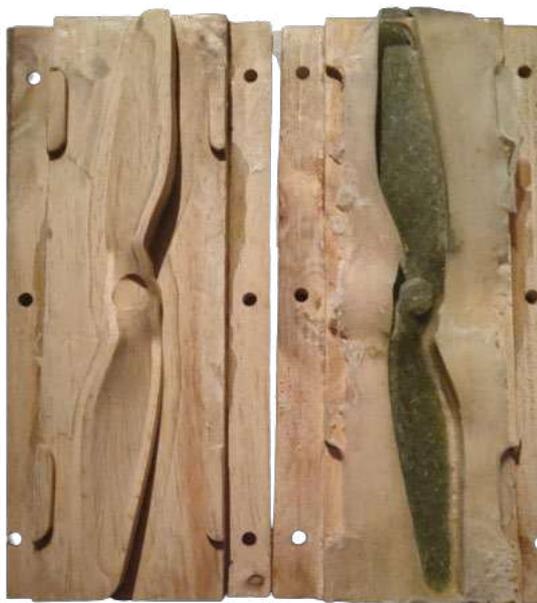


Figura 12. Propela lista para desmoldar.
Figura 13. (Fuente: propia)

2.6 Evaluación del rendimiento

El proceso de balanceo de masa se realizó utilizando una lija cuando la desproporción es muy pequeña y cinta adhesiva para cuando se requiere más masa de un lado, esto con el fin de asegurar que la propela esté correctamente equilibrada y reducir la vibración durante el vuelo.



Figura 13. Propelas balanceadas
(Fuente: propia)

Luego se comprobó el funcionamiento adecuado del banco de pruebas, que proporcionará la información sobre aceleración, voltaje, corriente y empuje. El sistema de banco de pruebas fue modificado con una estructura más sólida que le brinda un mejor soporte al empuje.



Figura 14. Banco de pruebas modificado
(Fuente: propia)

Se empleó un túnel de viento con sistema de medición de velocidad y altura a nivel del mar, para someter la propela a pruebas de rendimiento bajo diferentes velocidades y condiciones de vuelo simuladas. Para esto se realizó la prueba a 5m/s. a una altura de 4000 pies sobre el nivel del mar. Se fabrico una base en madera para soportar estáticamente al banco de pruebas en el túnel de viento.



Figura 15. Soporte de madera colocado en el banco de pruebas y asegurado con prensas
(Fuente: propia)

Adicionalmente como en la fase pruebas sin viento se tuvo la fractura de la propela con una aceleración del 50% se decide probar las propelas a una aceleración del 45% para evitar accidentes.



Figura 16. Propela fracturada al 50% de aceleración.
(Fuente: propia)

Se protegió el interior del túnel de viento, para que en caso de fractura de la propela no afecte la estructura del mismo.



*Figura 17. Recubrimiento del túnel de viento en área crítica.
(Fuente: propia)*

Del banco de pruebas se toma datos de la potencia necesaria para mover el dron, la eficiencia de la propulsión y el empuje generado.

3 PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Pruebas

La etapa inicial de evaluaciones consiste en pruebas en un entorno controlado en ausencia de velocidad del viento (0 m/s), con el propósito de establecer un punto de referencia para la aceleración (Throttle) que se puede aplicar a las propelas con un grado seguro de confiabilidad, minimizando la probabilidad de fracturas u otros fallos estructurales. En esta fase inicial, se busca establecer límites operacionales al poner a prueba las propelas bajo condiciones estáticas.

Concluida esta fase se avanza a la etapa de evaluación en el túnel de viento, en el cual se generan velocidades de flujo constante equivalentes a 5 m/s. Esta fase de pruebas dinámicas tiene como finalidad principal comparar y analizar el comportamiento aerodinámico de las propelas bajo condiciones cercanas a las experimentadas durante operaciones reales de vuelo. A través de esta comparación, se obtendrán datos para evaluar la eficiencia propulsora, el rendimiento en términos de empuje y la respuesta dinámica de las propelas, permitiendo identificar posibles áreas de mejora y optimización en el diseño.

3.2 Resultados

Análisis de resultados de gráficas

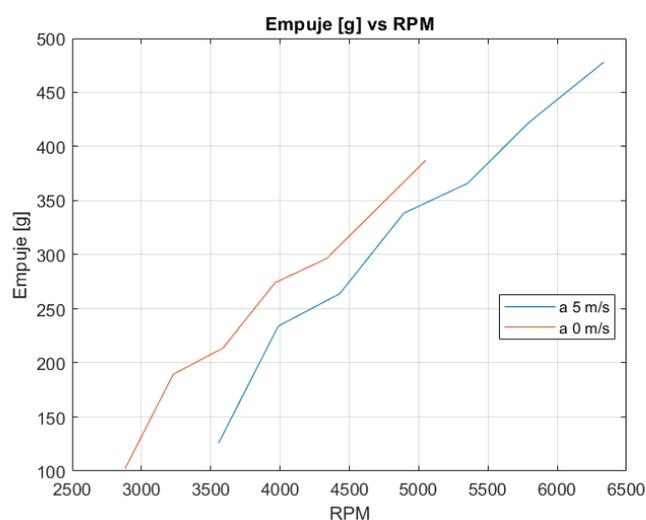


Figura 18. Gráfica Empuje vs RPM
(Fuente: propia)

La gráfica muestra una curva que representa la variación del empuje en función de las RPM, inicialmente a bajas RPM el empuje es bajo debido a la menor velocidad de flujo de aire que atraviesa la propela, a medida que las RPM aumentan el empuje aumento esto debido a que la propela mueve más aire y genera mayor fuerza de sustentación. Se tiene el punto máximo de empuje a 478 [g] para la velocidad de viento de 5 m/s, mientras que a una velocidad del viento de 0 m/s el empuje máximo llega a 287.2 [g].

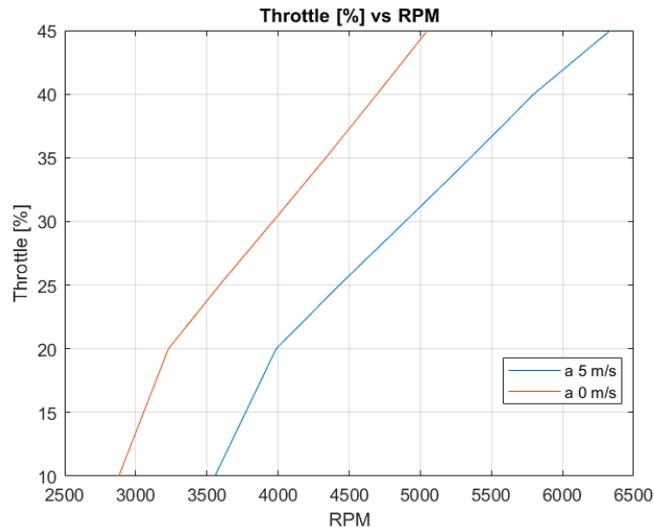


Figura 19. Throttle vs RPM
(Fuente: propia)

Se observa como a bajas RPM la aceleración también es relativamente baja, debido a que la velocidad angular de la propela está aumentando gradualmente, debido a condiciones de inercia y fricción dadas por la resistencia del aire. Esta gráfica ayuda a determinar que configuraciones de RPM permiten una aceleración eficiente, la cual puede ser útil en situaciones donde se requiera una respuesta rápida del sistema, como maniobras o en fases críticas como el despegue.

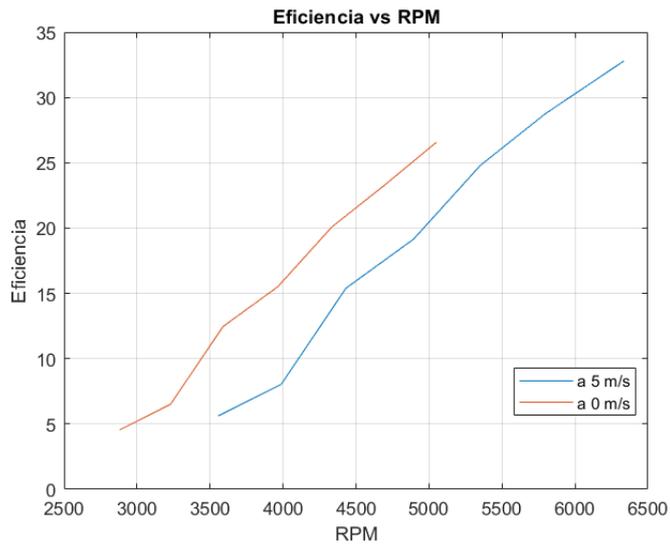


Figura 20. Eficiencia vs RPM
(Fuente: propia)

La curva de eficiencia es el cociente entre el empuje generado y la potencia consumida, mostrando como cambia esta relación en función de la velocidad de rotación, el punto máximo de eficiencia (32.8 para la velocidad de 5 m/s y de 26.57 para la velocidad de 0 m/s) indica la configuración de RPM donde la propela obtiene la relación óptima de empuje y potencia consumida. Otra relación importante que se debe notar es el cambio entre la potencia consumida y el empuje, esto indica como se distribuye la energía que genera en empuje para superar la resistencia al avance.

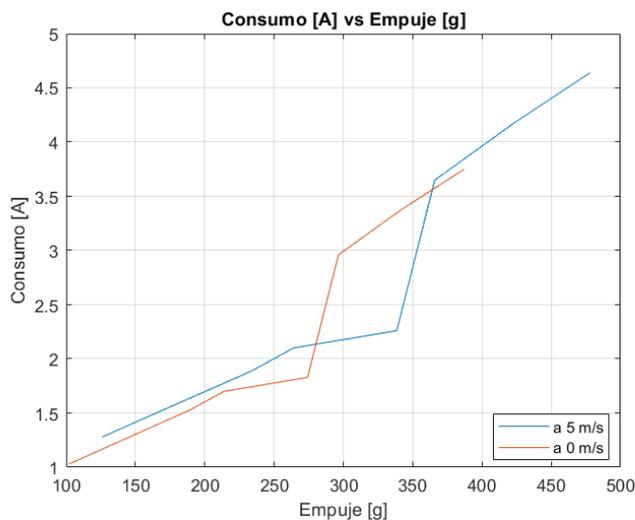


Figura 21. Consumo vs Empuje
(Fuente: propia)

Esta representación permite analizar como fluctúa la eficiencia en términos de la cantidad de empuje producido por unidad de amperio consumido. A diferencia de las gráficas mostradas anteriormente que tenían un comportamiento creciente casi constante durante todo su desempeño aquí se puede ver como el consumo a partir de 338.5 RPM para la

propela que trabaja a 5m/s se eleva drásticamente, así mismo pasa para la propela que funciona a 0 m/s, donde esta toma una elevación de consumo drástico a las 274.2 RPM, indicando que a estas las RPM se tuvo un pequeño desbalanceo en la ganancia de empuje, que luego fue equilibrado y siguió un comportamiento lineal creciente.

3.3 Conclusiones

De entre las 3 opciones de material orgánico, la fibra de hoja de piña cumplió con las características esperadas, dando una buena resistencia mecánica para la aplicación aerodinámica que se requería, así mismo cumple con el objetivo de ser una solución sostenible y amigable con el medio ambiente, ya que gran parte de estas hojas son desechadas en los mercados, sin darles un valor agregado antes de desecharlas.

La selección del material orgánico vegetal de la piña es un comienzo para experimentar con nuevas propiedades y productos, así esta área queda abierta a la exploración de muchas más fibras orgánicas, mostrando que la posibilidad de reutilizar distintos materiales a los que no se les da una segunda vida útil, esto con el fin de reducir el uso de plásticos y aportar a una nueva economía circular dentro del sector de drones no tripulados.

Para el material compuesto de matriz de resina epoxi con fibras de piña, la longitud corta y la distribución aleatoria presentan las mejores propiedades mecánicas para su fabricación ya que de este modo se tiene un material con características isotrópicas.

Existen varios procesos de manufactura posibles para las propelas de material compuesto y es este el proceso que debe seguir investigándose hasta conseguir el óptimo y eficaz posible, para este caso el uso de moldes en madera fue una gran ventaja en el ámbito económico y de maquinabilidad para la CNC, sin tener problemas mayores en el desmoldeo o en el acabado superficial.

De la gráfica de la figura 18 una vez identificado el punto máximo de empuje es importante conocer que operar constantemente en este punto máximo puede resultar en un mayor consumo de energía y desgastar mucho al sistema. Después del punto máximo de empuje su comportamiento comenzará a descender a medida que aumentan las RPM, esto debido a diversos factores como el aumento de la resistencia del aire a medida que la velocidad de rotación aumentada o la disminución aerodinámica de la eficiencia a altas velocidades, dando así un rango óptimo de operación que va desde el punto de máxima eficiencia (es decir empuje óptimo para un consumo dado de energía) hasta los límites operacionales donde la eficiencia y el rendimiento comienzan a decaer.

Una forma de mejorar los resultados en la fase de pruebas es esperando un aproximado de 21 días luego de desmoldar la pieza, esto con el fin de dejar la propela en reposo y que esta solidifique bien su estructura interna, ya que con 14 días posteriores al desmoldeo, al momento de la fractura, se observó partes internas aun sin terminar de curar, lo que puede ser un factor para la disminución de su desempeño en el banco de pruebas.

De la gráfica eficiencia vs RPM se puede destacar la eficiencia a bajas RPM que describe un comportamiento relevante para situaciones de vuelo en las que se requiera un empuje mínimo o un control más preciso de la velocidad, para la eficiencia a altas RPM podemos ver el mejor manejo contra la resistencia de avance y como esto puede reducirse a una fase de eficiencia optima general del sistema.

En la gráfica de consumo de energía vs empuje a medida que se aleja del punto de máxima eficiencia, la curva indica que al aumentar el consumo de energía la ganancia en empuje no es proporcional, lo que involucra una reducción en la eficiencia general del sistema.

Todo el conjunto de graficas mostradas en resultados nos permiten identificar las configuraciones que nos puede ofrecer la propela para el mejor rendimiento en términos tanto d empuje, consumo o RPM, lo que es relevante para maximizar la autonomía y eficiencia del dron, todos estos resultados pueden llevarse a un sistema de automatización que aproveche al máximo estos resultados.

La fabricación en general con moldes de madera comparada con la fabricación en moldes de aluminio realizada por Peralta G.,2022, resulta más económica tanto en cuestión del material base como en las herramientas de trabajo para la máquina CNC.

Con una fabricación en moldes macho – hembra a comparación de una fabricación por maquinado realizada por Peralta G.,2022 se elimina el riesgo a crear esfuerzos adicionales en la superficie de la propela, lo que garantiza más estabilidad en el producto final al momento de las pruebas.

El acabado superficial en los moldes de madera fue mejorado gracias al proceso de lacado aplicado, el cual a comparación de los moldes en aluminio reciclado fue mucho mejor.

En comparativa con el uso de fibras naturales de piña de longitudes de 2 a 5 mm con material particulado de cascarilla de huevo usado en el estudio de Muñoz J., 2023, el proceso de fabricación con cascarilla de huevo experimento un paso extra, que fue rotar el molde durante los primeros minutos de solidificación esto con el fin de que las partículas no se acumulen en un solo lado del molde, ya que esto creaba desbalanceo en su estructura.

En cuanto al proceso de mezclado durante la fase de fabricación de la propela, se obtuvo inicialmente una mejor compactación entre la resina y el material de refuerzo en el sistema que uso la cascarilla de huevo, esto debido a que su tamaño es menor que las fibras de piña, logrando una mejor interfase.

En la misma comparativa ambos materiales llegaron a condiciones mecánicas similares ya que se fracturaron a una aceleración del 50 % en el banco de pruebas, obteniendo resultados de eficiencia similares que se muestran en el anexo VII.

3.4 Recomendaciones

El tamaño de la fibra recomendada para la réplica en la creación de materiales compuestos debe ser el más pequeño posible, ya que mientras más corta sea la fibra esta tendrá mejor adherencia y permitirá una mejor compactación en el proceso de fabricación.

Se recomienda procesos innovadores y automatizados de manufactura que pueden conducir a acabados de mejor precisión, una alternativa altamente probable fue el maquinado en moldes de cera, sin embargo, resultaba más costosa, pero son una precisión de detalle mayor.

En el proceso de fabricación de la propela, luego de mezclar el catalizador con la resina, se recomienda el uso de un secador o cualquier dispositivo que brinde calor, esto con el fin de reducir las burbujas de aire producidas por la agitación, que se crean en la fase de mezclado.

En la fase de manufactura es importante realizar una compactación durante un mínimo de cinco minutos esto con el fin de lograr una distribución uniforme en el molde antes de que este sea sellado, esto ayudara al correcto balanceo de la propela.

Para mejorar el acabado superficial se recomienda cubrir mínimo de 3 capas de sellador a soplete sobre la madera, de esta forma se garantiza una capa lisa que no afecte en el diseño superficial de la propela

Aplicar abundante cera desmoldante de manera uniforme desde la primera tanda de fabricación, esto con el fin de tapar bien los posibles poros de la madera que aun queden, y facilitar la fase de desmoldeo, como también distribuir correctamente la cera desmoldante en las esquinas del molde.

Uso de materiales de protección para manos y ojos durante las pruebas en el banco de pruebas ya que al momento de la fractura de la propela estas se desprenden con gran velocidad a una dirección radial de alrededor 6 metros del banco de pruebas.

Asegurar la estabilidad del banco de pruebas siempre antes de ponerlo en uso.

Para futuros usos del banco de prueba se recomienda reparar el dispositivo medidor de velocidad, ya que, al momento de toma de datos en el túnel de viento, el hacerlo desde un dispositivo aparte resulta en ciertos errores de medida, por cuestiones de acercarse a la propela cuando se encuentra en movimiento

En las pruebas del túnel de viento cubrirlo con elementos resistentes y delgados, ya que de esta forma no se pierde tanto el espacio para que la propela gire sobre el eje del banco de pruebas.

4 REFERENCIAS

- [1] B. D. Alejandro, Materiales compuestos: Procesos de fabricacion de embarcaciones, Catalunya: Universitat politecnica de Catalunya, 2015.
- [2] Ludovic, «Jordanas de materiales compuestos/plasticos reforzados,» *RTM Light*, vol. 16, 2002.
- [3] D. s. Lascano, «Materiales polimericos y compuestos. Efectos de la temperatura en los termoplasticos,» Universidad politecnica de Valencia, Valencia, 2021.
- [4] T. L.R., *The Physics of Rubber Elasticity*, Oxford: Oxford University Press, 2002.
- [5] C. B. Arends, «Polymer toughening,» Marcel Dekker, New york, 2011.
- [6] Calister, *Ciencia e ingenieria de materiales*, reverté, 2016.
- [7] B. Dietrich, *Materiales Compuestos: Procesos de Fabricación de embarcaciones*, Barcelona, 2015.
- [8] C. May, «Epoxy Resins: Chemistry and Technology,» vol. Second Edition, p. 65, 2018.
- [9] A. y. N. M. Moral, *Materiales de última generación y materiales eficientes*, 2007.
- [10] S. Mazumdar, *Composites manufacturing: Materials, product and*, New York: CRC Press, 2013.
- [11] D. Chung, *Composite Material: Science and Applications,,* Nueva York: Springer, 2015.
- [12] J. A., «Estudio de la configuracion de fibras de material compuesto de atriz epoxi con fibra de piña,» Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2015.
- [13] J. L. D. S. G. P. P. N. R. V. S. y. C. V. H. Guerrero, «Nuevos Materiales, Aplicaciones estructurales e industriales,» Imprefepp, Quito, 2011.
- [14] S. G. y. V. G. F. Delgado, «Obtencion de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzada con fibra de coco y vidrio para la elaboración de tableros,» Escuela Politécnica Nacional, vol. 33, nº 2, p. 9, 2014, Quito, 2014.

- [15] J. D. Trejos Taborda, «Propiedades mecánicas de una matriz poliéster reforzada con fibra de coco comparadas con la misma matriz reforzada con fibra de vidrio,» Universidad Tecnológica de Pereira,, Pereira, 2014.
- [16] G. E. M. Ortiz, «Caracterización mecánica de materiales compuestos con matriz poliéster y fibra de coco,» Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2017.
- [17] M. J., «Obtencion de compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá,» Quito, 2007.
- [18] P. D., «Obtencion de materiales compuestos de matriz polimerica biodegradable,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2011.
- [19] L. Carvajal, Metodología de la Investgación Científica. Curso general y aplicado, 28 ed., Santiago de Cali: U.S.C., 2006, p. 139.
- [20] M. G., «Caracterizacion mecánica de materiales compuestos de matriz poliéster con fibra de coco,» Universidad técnica de a, Ambato, 2017.

5 ANEXOS

ANEXO I



Fibras de la piña secas en el transcurso de dos semanas.

ANEXO II



Primera prueba de fabricación de la propela, aquí se ocupó un menor volumen de fibras recomendado a la investigación previa, lo que efectivamente llevo a un mal producto final, teniendo burbujas en la superficie producida en la fase de agitación que no fueron eliminadas con calor, todos estos aspectos se tomaron en cuenta para luego corregir los demás diseños.

ANEXO III



Motor usado para las pruebas tanto a velocidad de 0 m/s y de 5 m/s se trata de un motor para 4 celdas AT3520 KV850, dicho motor fue proporcionado por el laboratorio de drones de la Escuela Politécnica Nacional.

ANEXO IV



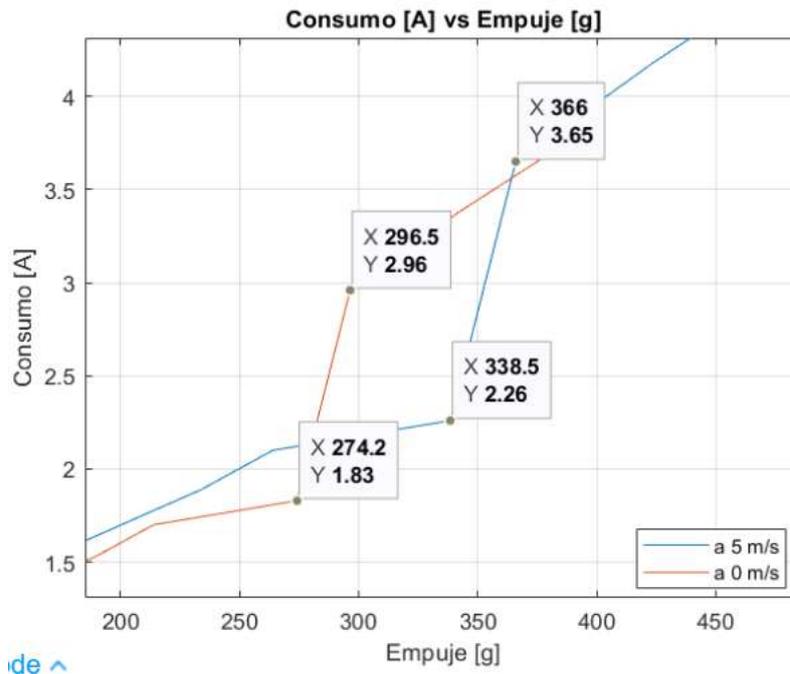
Tuercas para sujetar la propela al motor, es indispensable que exista un buen agarre aquí, dado que al girar a más revoluciones las tuercas tienden a salirse.

ANEXO V



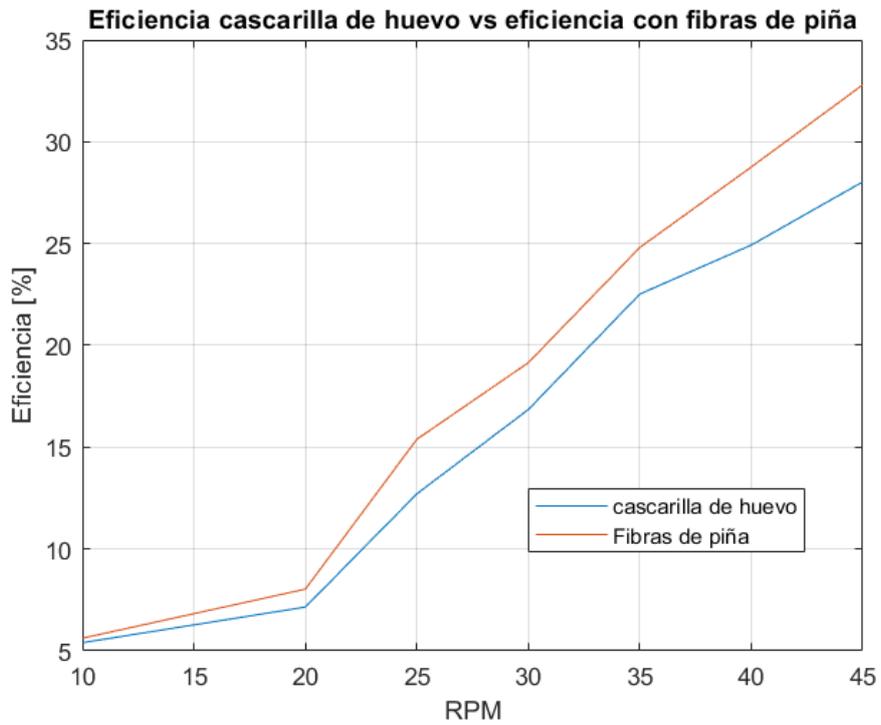
Soporte elaborado en madera para asegurar la estabilidad entre en banco de pruebas y el túnel de viento, esta estructura fue desarmable para poder implementarla varias veces.

ANEXO VI



Puntos críticos de la gráfica consumo vs empuje obtenidos en Matlab.

ANEXO VII



La grafica nos brinda los rangos de RPM para los cuales cada propela opera con mayor eficiencia, teniendo ligeramente mayor eficiencia la propela de resina epoxi con fibras de piña.

ANEXO VIII

Datos propela de material compuesto resina- fibras de piña								
# de medición	Aceleración	Corriente	Voltaje	Potencia	Velocidad del motor	Empuje [g]	Eficiencia	Velocidad del aire
1	10%	1,143	14,733	18,693	3194,1	119,7	4,995	0
2		1,134	0	18,738	3201,3	110,7	5,067	0
3		1,161	0	18,927	3203,1	110,7	5,085	0
4		1,152	0	18,981	3204,9	112,5	5,085	0
	Promedio	1,03	14,73	16,95	2880,77	102,06	4,55	0
1	20%	1,674	14,634	27,261	3593,7	218,7	7,236	0
2		1,71	0	27,729	3595,5	184,5	7,236	0
3		1,71	0	27,693	3578,4	220,5	7,209	0
4		1,71	0	27,711	3585,6	218,7	7,236	0
	Promedio	1,53	14,63	24,84	3229,47	189,54	6,51	0
1	25%	1,89	14,139	28,467	3991,5	268,2	13,878	0
2		1,935	0	29,763	3987	146,7	13,815	0
3		1,989	0	30,402	3981,6	267,3	13,878	0
4		1,746	0	31,302	3989,7	268,2	13,815	0
	Promedio	1,701	14,14	26,99	3588,71	213,84	12,46	0
1	30%	1,62	0	26,163	4403,7	303,3	17,199	0
2		2,178	0	26,415	4404,6	296,1	17,226	0
3		2,169	0	34,065	4404,6	309,6	17,199	0
4		2,178	0	34,065	4405,5	309,6	17,316	0
	Promedio	1,83	14,14	27,16	3964,14	274,185	15,51	0
1	35%	3,384	13,896	50,742	4821,3	312,3	22,347	0
2		3,204	0	49,383	4817,7	303,3	22,311	0
3		3,267	0	50,283	4814,1	344,7	22,347	0
4		3,294	0	52,047	4815,9	357,3	22,311	0
	Promedio	2,96	13,90	45,55	4335,53	296,46	20,10	0
1	40%	3,762	14,58	58,932	5213,7	384,3	25,965	0
2		3,744	0	59,202	5222,7	382,5	25,875	0
3		3,762	0	59,652	5220,9	375,3	25,857	0
4		3,744	0	58,95	5213,7	378,9	25,821	0
	Promedio	3,38	14,58	53,27	4695,98	342,23	23,29	0
1	45%	4,158	14,418	67,509	5607	434,7	29,565	0
2		4,185	0	67,419	5615,1	425,7	29,475	0
3		4,158	0	67,437	5607,9	427,5	29,502	0
4		4,185	0	67,473	5616,9	432,9	29,529	0
	Promedio	3,75	14,42	60,71	5050,55	387,18	26,57	0

Tabla con todos los valores medidos para propela a 0 m/s, de donde se sacó el promedio de datos para luego realizar las gráficas de resultados.

ANEXO IX

Datos propela de material compuesto resina- fibras de piña								
# de medición	Aceleración	Corriente	Voltaje	Potencia	Velocidad del motor	Empuje [g]	Eficiencia	Velocidad del aire
1	10%	1,27	16,37	20,77	3549	133	5,55	5
2		1,26		20,82	3557	123	5,63	5
3		1,29		21,03	3559	123	5,65	5
4		1,28		21,09	3561	125	5,65	5
	Promedio	1,28	16,37	20,93	3556,50	126	5,62	5
1	20%	1,86	16,26	30,29	3993	243	8,04	5
2		1,9		30,81	3995	205	8,04	5
3		1,9		30,77	3976	245	8,01	5
4		1,9		30,79	3984	243	8,04	5
	Promedio	1,89	16,26	30,67	3987	234	8,03	5
1	25%	2,1	15,71	31,63	4435	298	15,42	5
2		2,15		33,07	4430	163	15,35	5
3		2,21		33,78	4424	297	15,42	5
4		1,94		34,78	4433	298	15,35	5
	Promedio	2,1	15,71	33,32	4430,50	264	15,39	5
1	30%	1,8		29,07	4893	337	19,11	5
2		2,42		29,35	4894	329	19,14	5
3		2,41		37,85	4894	344	19,11	5
4		2,42		37,85	4895	344	19,24	5
	Promedio	2,26	15,71	33,53	4894	338,5	19,15	5
1	35%	3,76	15,44	56,38	5357	347	24,83	5
2		3,56		54,87	5353	337	24,79	5
3		3,63		55,87	5349	383	24,83	5
4		3,66		57,83	5351	397	24,79	5
	Promedio	3,65	15,44	56,24	5352,50	366	24,81	5
1	40%	4,18	16,2	65,48	5793	427	28,85	5
2		4,16		65,78	5803	425	28,75	5
3		4,18		66,28	5801	417	28,73	5
4		4,16		65,5	5793	421	28,69	5
	Promedio	4,17	16,20	65,76	5797,50	422,50	28,76	5
1	45%	4,62	16,02	75,01	6230	483	32,85	5
2		4,65		74,91	6239	473	32,75	5
3		4,62		74,93	6231	475	32,78	5
4		4,65		74,97	6241	481	32,81	5
	Promedio	4,64	16,02	74,96	6235,25	478	32,80	5

Tabla con todos los valores medidos para propela a 5 m/s, de donde se sacó el promedio de datos para luego realizar las gráficas de resultados.