

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 MATERIAL PARTICULADO Y OBTENIDAS POR EL MÉTODO DE COMPRESIÓN

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

JORGE ANDRÉS MUÑOZ CHAPACA

jorge.munoz@epn.edu.ec

DIRECTORA: ING. PATRICIA ARACELLY RODRÍGUEZ SALAZAR PHD

patricia.rodriquez@epn.edu.ec

Quito, agosto 2023

CERTIFICACIONES

Yo, Jorge Andrés Muñoz Chapaca 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.

JORGE ANDRÉS MUÑOZ CHAPACA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Jorge Andrés Muñoz Chapaca, bajo mi supervisión.

ING. PATRICIA ARACELLY RODRÍGUEZ SALAZAR PHD
DIRECTORA

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.

JORGE ANDRÉS MUÑOZ CHAPACA

ING. PATRICIA ARACELLY RODRÍGUEZ SALAZAR PHD

DEDICATORIA

Esta tesis, fruto de un trabajo arduo durante mi paso por mi querida Escuela Politécnica Nacional dedico a mi madre, quien ha sido mi pilar para culminar mi sueño, pues sin ella no lo hubiese logrado, su ejemplo y valentía ha formado en mi un hombre con carácter y soñador.

A mis abuelitos que con su ejemplo de superación me motivaron a ser el hombre que hoy sigo construyendo.

A mi familia Chapaca Gavilanes, me siento tan afortunado de pertenecer a una familia donde los valores han sido parte fundamental de nuestra educación.

AGRADECIMIENTO

Hoy culmino una etapa muy importante en vida, fueron muchos años de compromiso y resistencia, hoy quiero agradecer a los pilares importantes que hicieron de mí un hombre con principios y valores.

Agradezco a Dios por nunca soltarme de su mano quien me ha guiado y me ha dado la fortaleza para seguir cada día y nunca rendirme, por haberme otorgado una familia unida, orgullosos de su apellido con ejemplo de superación, lo que ha contribuido a la consecución de este logro.

A mi papito Pancho que está en el cielo orgulloso de su hijo y mi mamita Olga, una mujer valiente y aguerrida; ellos mis abuelitos, quienes siempre estuvieron conmigo, alentándome a ser un excelente profesional y sobre todo un ser humano empático.

Un agradecimiento a mi madre Marcita, quien con su ejemplo me motivó a nunca rendirme, a ser perseverante en cada etapa de mi carrera, muchos de mis logros se los debo a ella, madre sus palabras fueron semillas que hoy está dando frutos.

Mi hermana Lore, su apoyo incondicional durante mi vida universitaria, ha sido un aliciente en cada año de carrera, donde me ha permitido formar mi carácter.

Mi cuñado Byron y sobrinos Mateo, Mathías y Martín, quienes con cada ocurrencia me han apoyado y motivado a cumplir este sueño.

A mis queridos maestros, gracias por sus enseñanzas y experiencias profesionales y de vida, gracias por impartir su conocimiento, a mi tutora Patricia Rodríguez que me ha dado la oportunidad de recurrir a su conocimiento y expertiz, con paciencia durante el desarrollo de este trabajo de integración curricular.

Para finalizar, un agradecimiento especial a mis amigos y compañeros de clase durante todos los semestres de carrera de mi querida EPN, el acolite y compañerismo fueron aportes importantes para culminar mi sueño.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	X
1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1. Objetivo general.....	2
1.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Alcance.....	2
1.4. Marco teórico.....	3
1.4.1 Materiales compuestos.....	3
1.4.2 La matriz.....	4
1.4.3 Material de refuerzo.....	4
1.4.4 La interfase.....	4
1.4.5 Propiedades de los materiales compuestos.....	5
1.4.6 Materiales compuestos reforzados con partículas.....	6
1.4.7 Moldeo por compresión.....	7
1.4.8 Propelas.....	8
1.4.9 Túnel de viento.....	8
2. METODOLOGÍA.....	10
2.1. Fabricación de la propela.....	11
2.1.1 Diseño de la propela y molde.....	11
2.1.2 Fabricación del material compuesto.....	13
2.1.3 Fabricación del molde.....	16
2.1.4 Fabricación de la propela.....	18
2.2. Simulación en el túnel de viento.....	20
2.2.1 Especificaciones técnicas del banco de prueba y el túnel de viento.....	22
3. PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	23
3.1. Resultados.....	23
3.1.1 Cálculos de proporcionalidad del refuerzo.....	23
3.1.2 Cálculo de la cantidad de resina a utilizarse en la fabricación de la propela.....	23

3.1.3	Cálculo de la cantidad de polvo de cascara de huevo a utilizarse en la fabricación de la propela	23
3.1.4	Cálculo de eficiencia de la propela.....	24
3.1.5	Análisis de resultados	25
3.2.	Conclusiones.....	32
3.3.	Recomendaciones	33
4.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
5.	ANEXOS	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Tipos de compuestos	3
Figura 1.2 Microfotografía obtenida por microscopía electrónica de barrido de la superficie de fractura de una aleación plata-cobre, reforzada con fibras de carbono.	5
Figura 1.3 Esquema del proceso de moldeo por compresión	7
Figura 1.4 Esquema de las partes de un túnel de viento	9
Figura 2.1 Propela diseñada para la creación de molde	12
Figura 2.2 Molde macho.....	12
Figura 2.3 Molde hembra.....	12
Figura 2.4 a.) Molde para maquinar macho b.) hembra.	17
Figura 2.5 Proceso de maquinado por CNC del molde.	17
Figura 2.6 Moldes hechos de madera.....	18
Figura 2.7 Proceso de pulverización de la cáscara de huevo. a.) Cáscara de huevo, b.) Polvo de cáscara de huevo	18
Figura 2.8 Colocación de cera desmoldante sobre el molde.....	19
Figura 2.9 Preparación de la mezcla.....	19
Figura 2.10 Proceso de compresión del molde con adoquines de 10 [kg].....	19
Figura 2.11 Proceso de desmoldeo y obtención de las propelas.	20
Figura 2.12 Perforación en el centro del tambor de las propelas.	20
Figura 2.13 Nivelación de propelas.	21
Figura 2.14 Recubrimientos de seguridad dentro del túnel de viento.	21
Figura 2.15 Resultados de las pruebas realizadas	22
Figura 3.1 Resultados de las pruebas realizadas Velocidad vs Empuje, $V_{aire} = 0$ [m/s] ..	26
Figura 3.2 Resultados de las pruebas realizadas Velocidad vs Empuje, $V_{aire} = 5$ [m/s] ..	27
Figura 3.3 Resultados de las pruebas realizadas Velocidad vs Eficiencia, $V_{aire} = 0$ [m/s]	27
Figura 3.4 Resultados de las pruebas realizadas Velocidad vs Eficiencia, $V_{aire} = 5$ [m/s]	28
Figura 3.5 Comparación de la propela a base de cáscara de huevo vs hoja de piña. Empuje vs Throttle, $V_{aire} = 0$ [m/s]	28
Figura 3.6 Comparación de la propela a base de cáscara de huevo vs hoja de piña. Empuje vs Throttle, $V_{aire} = 5$ [m/s]	29
Figura 3.7 Comparación de la propela a base de cáscara de huevo vs hoja de piña. Eficiencia vs Throttle, $V_{aire} = 0$ [m/s]	29
Figura 3.8 Comparación de la propela a base de cáscara de huevo vs hoja de piña. Eficiencia vs Throttle, $V_{aire} = 5$ [m/s]	30
Figura 3.9 Molde de aluminio parte superior y Molde de madera parte inferior.....	31
Figura 5.1 Bloque de madera de eucalipto. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 5.2 Comparación de la propela real con nuestra propela. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 5.3 Fallo en la propela. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 5.4 a) Molde dividido en tres, b) Propela después del desmoldeo. ... ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 5.5 Resultado de varios intentos..... ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 5.6 Sujeción del banco de pruebas al túnel de viento. . ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 5.7 Fallo de la propela a un Throttle de 50 %. ¡Error! Marcador no definido.	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas propelas APC	11
Tabla 2.2 Propiedades geométricas propela 12x8 EP APC	11
Tabla 2.3 Comparación de propiedades mecánicas, costos y facilidad de obtención.	14
Tabla 2.4 Evaluación de cada criterio.....	15
Tabla 2.5 Evaluación de las alternativas respecto a la resistencia a la tracción.....	15
Tabla 2.6 Evaluación de las alternativas respecto a la resistencia a la flexión.	15
Tabla 2.7 Evaluación de las alternativas respecto al costo.	16
Tabla 2.8 Evaluación de las alternativas respecto a la obtención.	16
Tabla 2.9 Tabla de conclusiones	16
Tabla 3.1 Datos obtenidos de la propela a una velocidad de viento igual a 0 [m/s]	25
Tabla 3.2 Datos obtenidos de la propela a una velocidad de viento igual a 5 [m/s].	25
Tabla 5.1 Datos obtenidos de la propela APC 12x8 EP a una velocidad de viento igual a 0 [m/s].	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 5.2 Datos obtenidos de la propela APC 12x8 EP a una velocidad de viento igual a 5 [m/s].	¡Error! Marcador no definido.

RESUMEN

El proceso de investigación de materiales compuestos con polvo de cáscara de huevo es una técnica innovadora que tiene como objetivo mejorar la sostenibilidad en la fabricación de materiales. Existen varios ámbitos donde se ha utilizado este polvo como refuerzo en la pintura. El proceso de fabricación de estas propelas se ha llevado a cabo mediante moldeo a compresión utilizando moldes de madera. Este tipo de técnicas pueden ser aplicadas en diferentes áreas de la industria para lograr una producción más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

El primer paso del proceso fue la recolección de información de las alternativas para la creación de las propelas, hecho eso se diseñó la propela para el diseño del molde y posterior proceso de maquinado en este caso, se utilizó una máquina CNC para el mecanizado de los moldes (macho y hembra).

Luego se recolectó las cáscaras de huevo para molerlas, convertirlas en polvo y mezclarlo con resina epoxi en proporciones de acuerdo a bibliografía. Esta mezcla fue sometida a un proceso de agitación y posteriormente se vertió en los moldes de madera previamente preparados. A continuación, se aplicó una presión constante de 20 [kg] durante dos días para lograr la compactación del material y su posterior curado.

Una vez obtenidas las propelas se sometió a cargas estáticas para ver el comportamiento de estas, para luego colocarlas en un túnel de viento simulando la propela en un ambiente real. Después se procedió a la obtención de datos y posterior comparación con la propela real.

PALABRAS CLAVE: Propela, cáscara de huevo, resina epóxica, túnel de viento, material particulado, molde de madera.

ABSTRACT

The eggshell powder composite research process is an innovative technique that aims to improve sustainability in material manufacturing. There are several areas where this powder has been used as reinforcement in paint. The manufacturing process of these propellers has been carried out by compression molding using wooden molds. These types of techniques can be applied in different areas of the industry to achieve a more sustainable and environmentally friendly production.

The first step of the process was the collection of information on the alternatives for the creation of the propellers, after which the propeller was designed for the design of the mold and the subsequent machining process. In this case, a CNC machine was used for the machining of the molds (male and female).

Then the eggshells were collected to grind them, turn them into powder and mix it with epoxy resin in proportions according to bibliography. This mixture was subjected to a stirring process and later poured into previously prepared wooden molds. Next, a constant pressure of 20 [kg] was applied for two days to achieve compaction of the material and its subsequent curing.

Once the propellers were obtained, they were subjected to static loads to see their behavior, and then placed in a wind tunnel simulating the propeller in a real environment. Then we proceeded to obtain data and subsequent comparison with the real propeller.

KEYWORDS: Propeller, eggshell, epoxy resin, wind tunnel, particulate matter, wooden mold.

1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Los drones han ganado una gran popularidad en América Latina en los últimos años, ya que ofrecen una solución rentable y versátil para una variedad de industrias. Desde la agricultura y la vigilancia hasta los servicios de entrega, los drones han demostrado ser una herramienta eficaz para el seguimiento y la recopilación de datos. En países como Brasil y México, los drones se han utilizado para combatir la deforestación ilegal y el narcotráfico, mientras que en Chile y Argentina se han utilizado para inspeccionar líneas eléctricas y plataformas petroleras. Además, los drones se han utilizado para misiones de búsqueda y rescate en áreas afectadas por desastres, como las secuelas del terremoto de 2010 en Haití.

En Ecuador, los drones también han ganado fuerza en varios sectores. En la agricultura, los drones se han utilizado para monitorear y fumigar cultivos, lo que permite a los agricultores ahorrar tiempo y recursos. De manera similar, en la industria del petróleo y el gas, los drones se han utilizado para inspecciones de tuberías y monitoreo de plataformas marinas. Además, los drones se han utilizado con fines cartográficos y topográficos en las industrias de la construcción y la minería. Sin embargo, el uso de drones en Ecuador está sujeto a estrictas regulaciones por parte de la Autoridad Nacional de Aviación Civil, que exige a los operadores obtener permisos y cumplir con las normas de seguridad.

El trabajo realizado se basa en la investigación, diseño y construcción, de una hélice de drone con características mecánicas semejantes a una hélice Skywaker APC 12x8 EP con material compuesto de matriz polimérica reforzado con material natural particulado de cascara de huevo, esto con el fin de frenar con la adquisición del plástico junto con la madera y el metal, y así tener una hélice que sea amigable con el medio ambiente.

Se tomó como referencia el trabajo de investigación curricular de Gabriel Peralta (Peralta, 2022), y otros estudios para la fabricación con material particulado de cascara de huevo para la recopilación de información de las proporciones adecuadas del material compuesto.

Por último, se diseñó con la ayuda del software INVENTOR el modelo de la propela y el molde, hecho eso se fabricó un molde de madera por el método de maquinado CNC, con el fin de obtener las propelas semejantes a APC 12x8EP, después se procedió a simular en un túnel de viento el comportamiento de la propela bajo condiciones de vuelo.

1.1. Objetivo general

Diseñar y fabricar una propela para dron APC 12x8EP con material compuesto de matriz polimérica reforzado con material particulado natural de cascara de huevo.

1.2. Objetivos específicos

Realizar el estado de arte sobre el material natural particulado con las mejores propiedades mecánicas y determinar la matriz.

Diseñar en un software CAD la propela de dron a fabricar.

Diseñar en base a la propela un molde para el proceso de fabricación por molde a compresión.

Mecanizar el molde de la propela diseñada por el proceso de mecanizado en la maquina CNC.

Fabricar de propelas con material compuesto de matriz polimérica reforzado con material particulado natural obtenidas por el método de compresión.

Analizar el comportamiento de las propelas obtenidas por el proceso de molde a compresión en un túnel de viento.

Validar y comparar los datos obtenidos de las propelas fabricadas con fibra natural y material particulado.

1.3. Alcance

La producción de hélices de drones con materiales plásticos ha generado preocupaciones ambientales debido al impacto negativo de los desechos plásticos en el ecosistema. Se sabe que los desechos plásticos contaminan el medio ambiente y dañan la vida silvestre, en particular la vida marina, que puede ingerir o enredarse en dichos desechos. Además, la producción de materiales plásticos requiere el uso de recursos no renovables y genera emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo al cambio climático. Por lo tanto, el desarrollo de alternativas sostenibles, como los compuestos de polímeros reforzados con fibras naturales, podría contribuir a reducir el impacto ambiental de la fabricación de hélices para drones.

El objetivo de este proyecto es fabricar una propela APC 12x8 EP utilizando un material compuesto polimérico reforzado con material particulado natural. La selección del particulado natural disponible en el país se hizo en base a sus características mecánicas, relación y disponibilidad, que la hacían la más adecuada para su uso en la fabricación de

la hélice. El mencionado trabajo concluye con la simulación de la hélice APC 12x6 EP utilizando el material compuesto. Por tanto, este proyecto establece el proceso de fabricación y proporciones de los componentes para replicar el material, así como el diseño y fabricación del molde para su obtención y las características que debe reunir para su uso en la hélice.

Una vez obtenido el material compuesto, se mecanizó el molde mediante CNC para la obtención de la propela con una geometría similar a la propela comercial y se procedió a las pruebas en túnel de viento utilizando el banco de pruebas para el sistema de propulsión de un dron de ala fija. Los parámetros de prueba incluyeron la velocidad de funcionamiento del motor, la velocidad aerodinámica, la potencia, el empuje y la eficiencia para comparar estos resultados con los obtenidos en la simulación de la fabricación de propelas con refuerzo de fibra.

1.4. Marco teórico

1.4.1 Materiales compuestos

Los materiales compuestos son un tipo de material que resulta de la combinación de dos o más componentes diferentes, que permanecen distintos y separados a nivel microscópico (Figura 1.1). Estos componentes suelen ser de diversa naturaleza, como polímeros, cerámicas, metales o fibras, y se unen para aprovechar las propiedades individuales de cada uno y crear un material con características únicas. Los materiales compuestos son ampliamente utilizados en diversas industrias debido a sus propiedades excepcionales y su capacidad para superar las limitaciones de los materiales tradicionales. Por ejemplo, se pueden diseñar materiales compuestos livianos y fuertes que ofrezcan una alta relación resistencia-peso, lo que los convierte en la opción ideal para aplicaciones aeroespaciales y de transporte. Además, los materiales pueden presentar una mayor resistencia a la corrosión, fatiga y desgaste en comparación con materiales convencionales. (Mott, 2009)

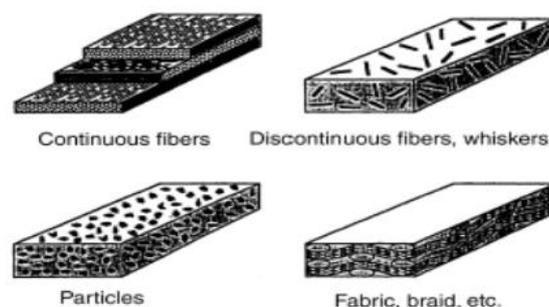


Figura 1.1 Tipos de compuestos

Fuente: (Schafer, 2018)

La fabricación de materiales compuestos implica tener una matriz, que actúa como una especie de "pegamento" que une los componentes, y un refuerzo, que proporciona resistencia y rigidez adicionales al material. La combinación de estos componentes permite una adaptación precisa de las propiedades del material compuesto a las necesidades específicas de una aplicación dada. En resumen, los materiales compuestos son una opción cada vez más popular en la industria debido a su capacidad para ofrecer propiedades excepcionales y soluciones innovadoras para una amplia gama de desafíos de ingeniería.

1.4.2 La matriz

La matriz es un elemento clave en la creación de materiales compuestos ya que se encarga de transferir las cargas al refuerzo, además de definir las características físicas, químicas, ofrecer cohesión y protección, y determinar la conformabilidad y el acabado superficial del material compuesto.

1.4.3 Material de refuerzo

El material de refuerzo se utiliza para aumentar la resistencia y la rigidez del compuesto, así como para mejorar su resistencia a altas temperaturas y a la abrasión. (Mott, 2009)

Los materiales de refuerzo pueden presentarse en forma de pequeñas partículas o como fibras, siendo estas últimas más efectivas cuanto menor tamaño tienen las partículas y mayor es la relación entre la longitud y el diámetro de estas. En el caso de fibras, es importante que tengan una temperatura de fusión alta y presenten un módulo específico y resistencias adecuados para la aplicación específica del material compuesto. (Guerrero, Dávila, Galeas, Pontón, & Rosas, 2011)

En conjunto, estos elementos permiten la creación de materiales compuestos con propiedades únicas y adaptadas a necesidades específicas de diferentes aplicaciones.

1.4.4 La interfase

La interfase es un elemento fundamental en la creación de materiales compuestos. Si la interfase es débil, la transferencia de carga de la matriz a la fibra será poco efectiva, lo que puede provocar la falla de la matriz y regiones sin unión entre la matriz y las fibras, lo que resultará en la rotura de la unión (Figura 1.2). Sin embargo, crear una adhesión confiable entre la fibra y la matriz es complicado, ya que estos materiales pertenecen a distintas familias y la adhesión requiere un contacto íntimo entre los átomos de la superficie de ambos componentes. Para mejorar la compatibilidad entre la fibra y la matriz, se

desarrollan diferentes aditivos que cubren las fibras y aumentan los enlaces entre sus partes). (Guerrero, Dávila , Galeas, Pontón, & Rosas, 2011)

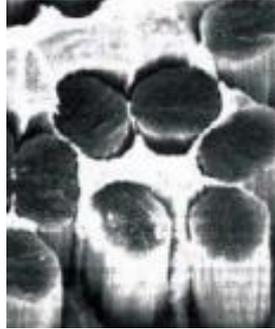


Figura 1.2 Microfotografía obtenida por microscopía electrónica de barrido de la superficie de fractura de una aleación plata-cobre, reforzada con fibras de carbono.

Fuente: (Stupenengo, 2011)

Los defectos de la interfase también influyen en la adherencia entre los diferentes tipos de materiales, reduciendo significativamente la transferencia y adherencia si hay superficies irregulares y estructuras desiguales a lo largo de ella.

La administración de sales se utiliza para mejorar la adherencia y garantizar una buena transferencia de cargas a través de la interfase, lo que permite un mejor nivel de rendimiento. Un adecuado diseño y manipulación de la interfase puede mejorar el rendimiento óptico, mecánico, eléctrico, químico y térmico de un material compuesto. Además, puede ser utilizado para ampliar el potencial de un material compuesto, aumentando el rango de temperatura de trabajo, aumentando la resistencia a la tensión, mejorando la resistencia al impacto y oxidación, así como proporcionando resistencia mejorada a los agentes químicos.

Por último, la interfase en un material compuesto desempeña un efecto significativo en su estabilidad a largo plazo y durabilidad y debe ser considerada cuando se diseñan materiales compuestos avanzados. (Guerrero, Dávila , Galeas, Pontón, & Rosas, 2011)

1.4.5 Propiedades de los materiales compuestos

Los materiales compuestos tienen propiedades únicas que combinan las propiedades de la fibra y la matriz, así como la relación entre la cantidad de fibra y resina en el material y la geometría y orientación de las fibras en el compuesto. (Stupenengo, 2011)

Las propiedades de un material compuesto están influenciadas por varias características,

- Propiedades de la fibra y la matriz.

- La relación entre la cantidad de fibra y resina en el material (también conocida como fracción en volumen de fibra).
- La geometría y orientación de las fibras en el compuesto.

Estos factores son importantes porque afectan directamente a las propiedades mecánicas y físicas del material compuesto, como su resistencia, rigidez y durabilidad. Por lo tanto, es esencial tener en cuenta cada uno de estos al diseñar y crear materiales compuestos para asegurarse de que cumplan con los requisitos específicos de cada aplicación.

La mayoría de los materiales compuestos tienen una alta resistencia mecánica y una baja densidad, lo que permite la creación de estructuras y dispositivos resistentes y livianos. Esta relación entre la resistencia mecánica y la densidad se conoce como resistencia específica. Aunque los cerámicos y los metales tienen una mayor resistencia en general, los materiales compuestos son la opción más conveniente debido a su baja densidad y alta resistencia mecánica. (Mott, 2009)

Esto se debe a que la matriz polimérica proporciona una baja densidad, mientras que las fibras aportan la resistencia mecánica sin agregar demasiado peso al material debido a que son la fase minoritaria. En conjunto, estos elementos permiten la creación de materiales compuestos con propiedades únicas y adaptadas a necesidades específicas de diferentes aplicaciones.

1.4.6 Materiales compuestos reforzados con partículas

Los materiales compuestos reforzados con partículas son una clasificación de partículas que pueden tener diferentes geometrías y tamaños. Estas partículas se utilizan para obstaculizar o impedir el movimiento de las dislocaciones, lo que restringe la deformación plástica y mejora el límite elástico, la resistencia a la tracción y la dureza del material.

Las partículas grandes son capaces de mejorar las propiedades mecánicas del material, pero es importante que sean equiaxiales en todas las direcciones. Por otro lado, las partículas pequeñas tienen un tamaño atómico molecular entre 10 y 100 nm y, por lo tanto, son más efectivas en el refuerzo. Para lograr mejores propiedades mecánicas del material, es necesario que estas partículas estén distribuidas uniformemente en la matriz.

Es importante destacar que cuanto mayor sea la cantidad de partículas, mejores serán las propiedades mecánicas del material resultante. En general, el refuerzo particulado es una técnica efectiva para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos y puede ser utilizado en una amplia variedad de aplicaciones. (Guerrero, Dávila, Galeas, Pontón, & Rosas, 2011)

1.4.7 Moldeo por compresión

El moldeo por compresión es un método de procesamiento que se deriva del estampado de placas metálicas y que se ha perfeccionado a lo largo de los años. Este método se utiliza tanto para materiales termoplásticos como para termoestables y consiste en intercalar láminas de matriz y refuerzo en forma de preimpregnados en un molde que es posteriormente prensado (Figura 1.3).

Durante el proceso de moldeo por compresión, es importante tomar en cuenta las tres fases principales: precalentamiento, moldeo y enfriamiento. Durante estas fases, se controlan los parámetros de temperatura, presión y tiempo para lograr una buena consolidación del material. (Beltrán & Marcillo, 2019)

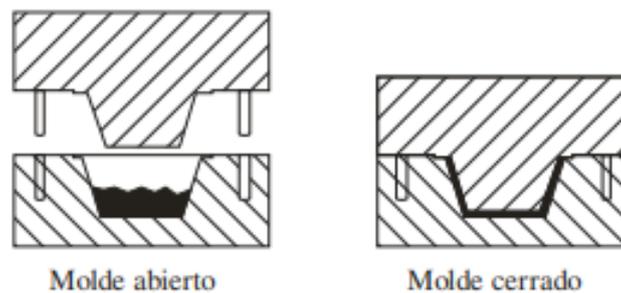


Figura 1.3 Esquema del proceso de moldeo por compresión

Fuente: (Beltrán & Marcillo, 2019)

Los moldes están hechos de acero inoxidable o aluminio y su diseño es simple, lo que facilita la aplicación de calor y el prensado para la buena consolidación. Este método se utiliza para la producción a gran escala de componentes con superficies lisas, como en la industria automotriz, donde se están produciendo piezas de polipropileno reforzado con fibra natural. Además, esta técnica permite la fabricación de compuestos híbridos tipo sánduche, lo que da como resultado piezas de bajo peso y de gran resistencia a la flexión.

Una ventaja adicional del moldeo por compresión es que puede utilizarse para la investigación y desarrollo de materiales compuestos, incluso a pequeña escala. Las piezas obtenidas son reciclables, dado que las matrices son termoplásticas. Sin embargo, la principal limitación de este procedimiento es que únicamente se pueden elaborar piezas simples como placas planas de espesor constante y no es posible producir estructuras de espesores muy grandes ni diseños complejos. Además, las piezas obtenidas suelen necesitar de operaciones secundarias como el desbaste. (Beltrán & Marcillo, 2019)

Para una buena consolidación de la pieza es necesario el íntimo contacto entre las capas de matriz y refuerzo, lo que se logra evitando la presencia de aire atrapado mediante un diseño adecuado del molde y suministrando el suficiente calor y tiempo para la autoadhesión en la interfaz. El tiempo adecuado para la consolidación del compuesto es de 5 a 30 minutos, incluido el tiempo que tarda el molde en alcanzar el equilibrio térmico. En resumen, el moldeo por compresión es un método útil para la producción en masa de componentes con superficies lisas y para la investigación y desarrollo de materiales compuestos a pequeña escala.

1.4.8 Propelas

Los propulsores o propelas son cuchillas rotativas que producen una diferencia de presión y empujan el aire de un lado a otro creando una fuerza de empuje. El lado de succión del rotor tiene un sobre de baja presión que inicia el empuje en la misma dirección. La generación de elevación depende de la posición y paso del rotor. En el caso de los UAV de ala fija, el rotor se posiciona en la sección delantera del UAV como una configuración de motor único. De esta manera, se produce el empuje requerido y el ala produce la elevación de manera similar a los aviones convencionales impulsados por hélices, mientras que en el modelo de helicóptero, las hélices se posicionan en el eje vertical, por lo que la elevación se produce directamente sin un ala fija. El número de hélices en un helicóptero se decide según su aplicación y peso para cumplir con los requisitos de elevación. A menudo, las hélices son rotores de dos palas hechos de plástico o fibras de carbono o vidrio. (Nandan, 2023)

1.4.9 Túnel de viento

Los túneles de viento son conductos que contienen uno o varios ventiladores accionados por un motor para hacer que el aire fluya uniformemente. La cámara de ensayos es la parte del túnel de viento que se utiliza para la experimentación, y debe ser transparente para permitir la observación y la filmación. Se instala el modelo y diferentes aparatos que miden las fuerzas que experimenta el modelo y las condiciones del aire que atraviesa esa sección. (Ramírez, 2005)

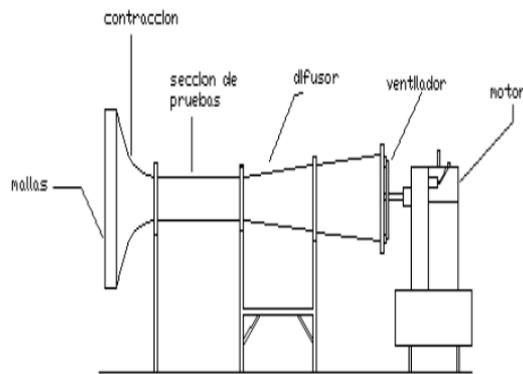


Figura 1.4 Esquema de las partes de un túnel de viento

Fuente: (Ramírez, 2005)

La cámara de ensayos debe tener un área menor que el resto del túnel para generar una velocidad mayor cerca del modelo, lo que ahorra energía en el ventilador y reduce las pérdidas por fricción en las paredes y codos del túnel. Para evitar desprendimientos y turbulencias, se coloca una tobera convergente en la entrada de la cámara de ensayos que reduce gradualmente el área, llamada contracción (Figura 1.4). Al final de la cámara de ensayos hay un tramo llamado difusor, que aumenta el área y disminuye la velocidad del aire. (Chávez, 2012)

Las velocidades en los túneles de viento varían dentro de un amplio rango, pero solo se consideran las menores a 100m/s, denominadas subsónicas, donde la compresibilidad del aire es despreciable. Para conocer las fuerzas que se aplican al caso real, se utiliza un modelo que guarde semejanza aerodinámica. La semejanza requiere que el número de Reynolds sea igual para el prototipo y el modelo, además de una similitud geométrica. El tamaño del modelo define en muchos casos el tamaño de la sección.

2. METODOLOGÍA

La creación de una propela a base de material compuesto de matriz polimétrica con refuerzo de material particulado consta de una etapa preliminar que es la selección del refuerzo a utilizarse, para este caso la mejor opción fue la cáscara de huevo.

Entonces la obtención de una propela de dron con resina epoxi y refuerzo de cáscara de huevo por molde a compresión es un proceso que implica varias etapas.

La primera etapa fue el diseño y modelado de la propela y el molde, la cual se realizó con el software Autodesk Inventor Professional, para continuar con la materialización del molde con el proceso de manufactura por mecanizado CNC. El material utilizado para el molde fue la madera de pino por su fácil mecanizado y buen acabado superficial.

Después, se debe recolectar y limpiar la cáscara de huevo para su uso como refuerzo en la resina epoxi. La cáscara de huevo se muele en un molino hasta obtener un polvo fino que se mezcla con la resina epoxi. Es importante asegurarse de que la cáscara de huevo esté completamente seca antes de molerla para evitar que se produzcan grumos en la mezcla.

Una vez que se ha preparado la mezcla de resina epoxi y cáscara de huevo, se debe preparar el molde a compresión, se coloca cera desmoldante para evitar que la resina se adhiera al molde. Es importante que el molde esté limpio y libre de cualquier residuo antes de su uso.

La mezcla de resina epoxi y cáscara de huevo se vierte en el molde y se coloca en una prensa para su compresión (en este caso, se colocaron dos pesos de 10 kilogramos). El tiempo de compresión dependerán del tipo de resina epoxi y del tamaño del molde.

Una vez que se ha completado el proceso de compresión, se retira la propela del molde y se retira las rebabas para darle la forma final. Es importante tener cuidado al cortar la hélice para evitar dañarla.

Finalmente, se procede a simular el comportamiento de la propela en un banco de pruebas y posterior al túnel de viento, esto con el fin de analizar la funcionalidad y obtener resultados para comparar con una propela comercial.

2.1. Fabricación de la propela

2.1.1 Diseño de la propela y molde

Es interesante ver cómo el material utilizado puede afectar las propiedades mecánicas de la hélice. Las hélices APC se fabrican con compuestos de fibra de vidrio o fibra de carbono. Las hélices de fibra de carbono se utilizan en aplicaciones especiales y se identifican con la letra C en el número de pieza. Las hélices más pequeñas para cuadricópteros se fabrican con policarbonato y se identifican con las letras BD al principio del número de pieza.

Los compuestos largos de vidrio y fibra de carbono se fabrican mediante pultrusión, lo que permite una mayor densidad de fibra a resina que los compuestos de fibra corta o cortada. Durante el moldeo por inyección, las fibras largas permanecen orientadas axialmente en el eje longitudinal de la hélice debido a los efectos viscosos. Esto proporciona una resistencia y rigidez sustancialmente mayores que los procesos convencionales. El material molido nunca se usa para hélices APC.

Aunque los compuestos de fibras largas son más costosos y difíciles de fabricar, ofrecen ventajas significativas en términos de rendimiento, como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas propelas APC

Propiedades mecánicas	Resistencia a la tracción [MPa]	Resistencia a la flexión [MPa]
Propela APC	227.527	379.212

Fuente: (APC PROPELLERS, 2023)

Por lo tanto, para este trabajo se tomó las características geométricas de la propela APC 12X8 EP descritas en la Tabla 2.2

Tabla 2.2 Propiedades geométricas propela 12x8 EP APC

Propiedades geométricas		
Características	Sistema de unidades	
	Sistema internacional	Sistema ingles
Diámetro del cubo	2,032 [cm]	0,800 [in]
Grosor del cubo	1,067 [cm]	0,420 [in]
Diámetro del eje	0,635 [cm]	1/4 [in]
Peso	26,082 [gr]	0,920 [oz]
Diámetro	30,480 [cm]	12,000 [in]
Paso	20,320 [cm]	8,000 [in]
Color	Gris	Grey

Fuente: (APC PROPELLERS, 2023)

Acorde a los datos de la Tabla 2.2 se diseñó la propela en el software Autodesk Inventor Professional como se muestra en la Figura 2.1 con modificaciones de espesor por dos

razones, la primera debido a las mezclas de particulado-resina y fibra-resina pues que no iba a llenar por completo el molde, y la segunda por el desmolde de la propela.

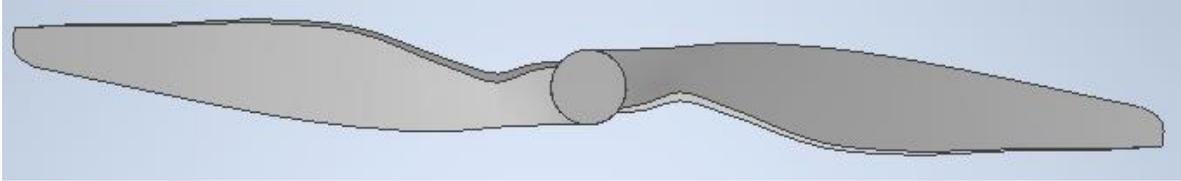


Figura 2.1 Propela diseñada para la creación de molde

Fuente: (Propia)

El diseño del molde se realizó en base a la propela diseñada en el software como se puede observar en la Figura 2.2 y Figura 2.3, para este proyecto se optó por el diseño de la propela por molde a compresión por lo que el molde fue diseñado en dos partes (macho y hembra).

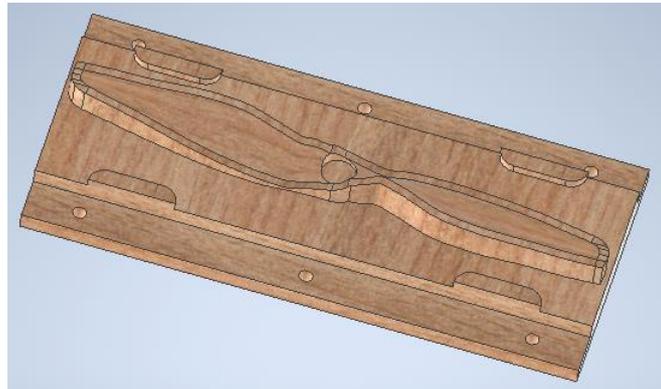


Figura 2.2 Molde macho

Fuente: (Propia)

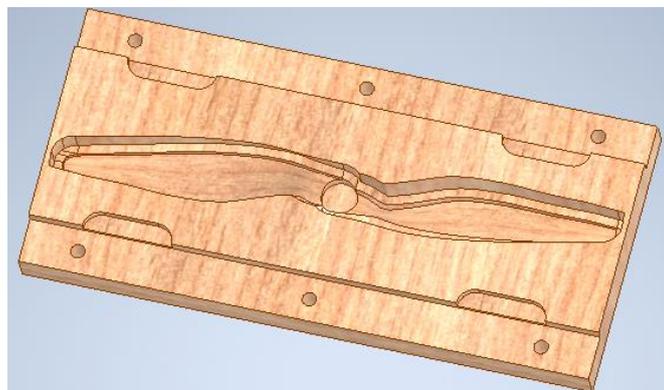


Figura 2.3 Molde hembra

Fuente: (Propia)

2.1.2 Fabricación del material compuesto

2.1.2.1. Selección de alternativas

Para el proceso de selección del material adecuado para la fabricación de la propela se ha tomado tres alternativas, las cuales se describen a continuación:

Elaboración del material compuestos de partículas de poliéster/cáscara de huevo

De acuerdo con la investigación se ha demostrado que la adición de cáscara de huevo a los materiales compuestos de partículas de poliéster mejora significativamente sus propiedades mecánicas. Los resultados indican que la resistencia a la tracción, la compresión, la flexión y la energía de impacto aumentaron en proporción a la cantidad de cáscara de huevo añadida. Específicamente, se encontró que la resistencia a la tracción aumentó de 15,182 N/mm² a un máximo de 23,400 N/mm² con 40% en peso de adición de cáscara de huevo para cáscara de huevo no carbonizada; mientras que con cáscara de huevo carbonizada aumentó a un máximo de 28,378 N/mm² con un 20% en peso de adición. La resistencia a la compresión aumentó constantemente desde 90,300 N/mm² con 0 % en peso de cáscara de huevo hasta un máximo de 103,600 con 50% en peso de cáscara de huevo sin carbonizar y 116,500 N/mm² con 50% de cáscara de huevo carbonizada. Además, el valor de dureza y la energía de impacto también mejoraron significativamente con la adición de cáscara de huevo. Estas mejoras en las propiedades mecánicas hacen que el material compuesto sea relevante para diversas industrias, como la electrónica, la automotriz y la de construcción, ya que es ligero y resistente. (Shashir, 2017)

En conclusión, el estudio demuestra que el desarrollo del material compuesto de partículas de poliéster/cáscara de huevo con buenas propiedades mecánicas y peso ligero es relevante para diversas aplicaciones industriales.

Elaboración del material compuesto con matriz de resina de poliéster reforzado con partícula de totora

De acuerdo con la tesis "Caracterización de un material compuesto con matriz de resina de poliéster reforzado con partícula de totora" de Erika Rafaela Gaibor Chacha de la Universidad Internacional SEK, se concluye que el material compuesto con un 20% de fibra particulada de totora en una matriz de resina de poliéster presenta la mayor resistencia a la tracción con un valor de 23,600 (MPa). Además, este mismo material compuesto tiene las mejores características mecánicas a la tracción y flexión en comparación con otras muestras. Es importante tener en cuenta que existe un porcentaje adecuado de fibra

natural que se debe agregar para obtener las mejores características mecánicas, ya que un exceso de fibra puede disminuir la resistencia mecánica. Estos hallazgos pueden ser útiles en la industria para crear materiales más resistentes y sostenibles. (Chacha, 2019)

Elaboración del material compuestos de matriz de resina de poliéster reforzado con partículas de bagazo de caña de azúcar y hoja de piña

Para este estudio se desarrollaron y caracterizaron compuestos de resina de poliéster reforzados con partículas de bagazo de caña de azúcar y hoja de piña, y se examinaron su morfología y características mecánicas. Los resultados mostraron que la muestra compuesta mezclada con bagazo de caña de azúcar demostró la mayor resistencia a la tracción de 84,940 MPa con una adición del 20% en peso de partículas, lo que es un 70% más alto que la muestra de resina de poliéster virgen/sin mezclar. También demostró la mayor resistencia a la flexión de 121,160 MPa con una adición del 20% en peso de partículas, lo que es un 90% mayor que la muestra de resina de poliéster virgen/sin mezclar. Además, demostró la mayor energía de impacto de 7,370 J con una adición del 20% en peso de partículas, lo que es un 58% más alto que la muestra de resina de poliéster virgen/sin mezclar. Las características mecánicas de los compuestos se vieron afectadas por la aglomeración/agrupación de partículas en la resina de poliéster. En conclusión, los resultados indican que las partículas de bagazo de caña de azúcar y hoja de piña son rellenos buenos o adecuados para la matriz de resina de poliéster insaturada y los compuestos de matriz polimérica tienen potencial para aplicaciones de ingeniería de baja resistencia. (Bolasodun, 2021)

2.1.2.2. Comparación de propiedades mecánicas, costos y facilidad de obtención de los materiales compuestos.

En base a los datos obtenidos en la investigación de las tres alternativas se optó por detallar en base a las propiedades mecánicas resistencia a la tracción y flexión, el costo, el proceso de fabricación y la facilidad de obtención, para determinar una alternativa viable. Todo esto se detalla en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Comparación de propiedades mecánicas, costos y facilidad de obtención.

Factor Particulado	% en peso [g]	Resistencia a la tracción (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Costo	Proceso	Obtención
Cáscara de huevo	20	365	100	3.50\$/cubeta	Manual	Fácil
Totora	20	23.6	5	2 \$/kg	Manual	Media
Caña de Azúcar y Hoja de Piña	20	84.94	121.16	2.85\$/kg	Manual	Media

Fuente: (Propia)

2.1.2.3. Evaluación de alternativas

Para realizar la selección de la mejor alternativa de material particulado se usa el criterio ponderado (Tabla 2.5), donde la alternativa 1 es cáscara de huevo alternativa 2 es la totora y alternativa 3 la caña de azúcar y hoja de pina.

Lista de criterios a tomar en cuenta

- Resistencia a la tracción
- Resistencia a la flexión
- Costos
- Obtención (Tabla 2.4)

Tabla 2.4 Evaluación de cada criterio

	Resistencia a la tracción	Resistencia a la flexión	Costo	Obtención	$\Sigma + 1$	Ponderación
Resistencia a la tracción	X	0,5	1	1	3,5	0,39
Resistencia a la flexión	0,5	X	1	1	3,5	0,39
Costo	0	0	X	0	1	0,11
Obtención	0	0	1	X	1	0,11
				Suma	9	1

Fuente: (Propia)

Tabla 2.5 Evaluación de las alternativas respecto a la resistencia a la tracción.

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

Fuente: (Propia)

Tabla 2.6 Evaluación de las alternativas respecto a la resistencia a la flexión.

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

Fuente: (Propia)

Tabla 2.7 Evaluación de las alternativas respecto al costo.

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Alternativa 1	X	1	1	3	0,43
Alternativa 2	0	X	1	2	0,29
Alternativa 3	0	1	X	2	0,29
			Suma	7	1

Fuente: (Propia)

Tabla 2.8 Evaluación de las alternativas respecto a la obtención.

Obtención	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Alternativa 1	X	1	1	3	0,50
Alternativa 2	0	X	0,5	1,5	0,25
Alternativa 3	0	0,5	X	1,5	0,25
			Suma	6	1

Fuente: (Propia)

Tabla 2.9 Tabla de conclusiones

Conclusiones	Resistencia a la tracción	Resistencia a la flexión	Costo	Obtención	$\Sigma + 1$	Prioridad
Alternativa 1	0,194	0,130	0,048	0,056	1,427	1
Alternativa 2	0,065	0,065	0,032	0,028	1,189	3
Alternativa 3	0,130	0,194	0,032	0,028	1,384	2

Fuente: (Propia)

De acuerdo con los resultados obtenidos de la ponderación (Tabla 2.9) y los criterios analizados, se concluyó que la mejor alternativa para el proceso de fabricación de esta propela es con cáscara de huevo.

2.1.3 Fabricación del molde

La fabricación del molde por mecanizado CNC es un proceso que implica la utilización de una máquina de control numérico por computadora para cortar y dar forma a un bloque sólido de madera. El proceso comenzó con la creación de un modelo 3D en un software Autodesk Inventor Professional, como se puede observar en la Figura 2.4.

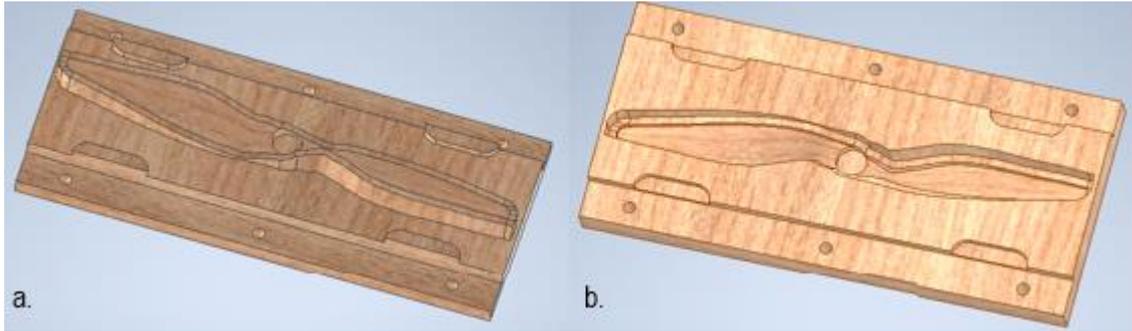


Figura 2.4 a.) Molde para maquinado macho b.) hembra.

Fuente: (Propia)

Este modelo se utilizó para generar un programa de mecanizado que se cargó en la máquina CNC, después el bloque de madera se sujetó en la mesa de trabajo de la máquina y se comenzó con el proceso de mecanizado para cortar y dar forma al material según las especificaciones del modelo 3D (Figura 2.5). La máquina puede cortar el material en tres dimensiones y crear formas muy precisas y detalladas.



Figura 2.5 Proceso de maquinado por CNC del molde.

Fuente: (Propia)

Una vez que se completa el proceso de mecanizado, se retira el molde del bloque de material y se realiza un proceso de acabado para suavizar cualquier imperfección en la superficie del molde (Figura 2.6).



Figura 2.6 Moldes hechos de madera

Fuente: (Propia)

2.1.4 Fabricación de la propela

Para la fabricación de la propela se recolectó y limpió la cáscara de huevo después se molió en un molidor hasta obtener un polvo fino como se observa en la Figura 2.7. Es importante asegurarse de que la cáscara de huevo esté completamente seca antes de molerla para evitar que se produzcan grumos en la mezcla.



Figura 2.7 Proceso de pulverización de la cáscara de huevo. a.) Cáscara de huevo, b.) Polvo de cáscara de huevo

Fuente: (Propia)

Luego, con una franela se coloca será desmoldante en la superficie del molde donde se encuentra la forma de la propela (Figura 2.8).



Figura 2.8 Colocación de cera desmoldante sobre el molde

Fuente: (Propia)

Hecho lo anterior se colocó en una balanza los materiales a mezclar (Figura 2.9), para pesar en las proporciones determinadas de acuerdo a los cálculos realizados.



Figura 2.9 Preparación de la mezcla

Fuente: (Propia)

Se vertió el material dentro del molde y luego se colocó dos bloques de adoquín de 10 [kg] para generar presión sobre el molde (Figura 2.10), dado que la resina epóxica tiene una reacción exotérmica y tiende a expandirse.



Figura 2.10 Proceso de compresión del molde con adoquines de 10 [kg]

Fuente: (Propia)

En la Figura 2.11 se observa el proceso de desmolde el cual se realizó después de dos días de haber vertido el material en el molde.



Figura 2.11 Proceso de desmoldeo y obtención de las propelas.

Fuente: (Propia)

2.2. Simulación en el túnel de viento

Para colocar la propela en el banco de pruebas se realizó un orificio en cada propela (Figura 2.12), primero se marcó el centro del tambor y después se realizó la perforación.



Figura 2.12 Perforación en el centro del tambor de las propelas.

Fuente: (Propia)

Se realizó un proceso de balanceo de las propelas ya que al ser un material compuesto no se garantiza que el particulado se esparza de forma homogénea por todo el molde, además debido a que el desbalanceo provoca vibraciones se colocó cinta masking en el aspa con menos peso para generar el balance adecuado de la propela (Figura 2.13).



Figura 2.13 Nivelación de propelas.

Fuente: (Propia)

De acuerdo con la “Diseño y construcción de una propela APC 12x6 EP para drone skywaker con materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra natural” escrita por Gabriel Peralta (Peralta, 2022) la cual comenta sobre un fallo de la propela en medio de las pruebas y con el fin de precautelar la seguridad física y evitar que la propela se rompa y cause daños al túnel de viento, se adecuó un protector, como se observa en la Figura 2.14, dentro de túnel para evitar que el túnel sufra algún daño si la propela se rompe en medio de la prueba.



Figura 2.14 Recubrimientos de seguridad dentro del túnel de viento.

Fuente: (Propia)

Para la obtención de datos, la velocidad en el túnel de viento se realizó a 5 [m/s] y la velocidad de Throttle se varió entre 10 % y 45 % de manera manual en intervalos de 5, tomando 4 datos por porcentaje hasta llegar a 45 %, debido a que el velocímetro que estaba instalado en el banco de pruebas no funciona se procedió a obtener los datos de velocidad con un velocímetro manual que tiene un láser para medir la velocidad.

Por otro lado, se llegó a velocidades no mayores al 45% del banco de pruebas puesto que en el proceso de prueba de las propelas una de ellas falló al 50% de la velocidad (ANEXO I ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

2.2.1 Especificaciones técnicas del banco de prueba y el túnel de viento

De acuerdo con el proyecto de (Peralta, 2022) los datos técnicos del banco de prueba y túnel de viento se detalla en la Figura 2.15.

	Nombre	Modelo
Banco de pruebas	Motor	T-motor KV720
	Batería	Turnigy 8000mAh 4s
	App designer	App de operación del banco de pruebas
Túnel de viento	Sistema de flujo de aire con las siguientes características:	
	Velocidad del túnel	0 – 10 [m/s]
	Diametro del túnel	500 [mm]
	Longitud de túnel por cabina	800 [mm]

Figura 2.15 Resultados de las pruebas realizadas

Fuente: (Peralta, 2022)

3. PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1. Resultados

Se presenta los resultados obtenidos en las diferentes etapas de la fabricación de la propela empezando con el cálculo de la proporcionalidad del refuerzo hasta la comparación con los datos de empuje y eficiencia de la propela fabricada con fibra de hoja de pino, para este capítulo se utilizaron fórmulas de aerodinamismo presentados en la página web (Brandt & Selig, 2011)

3.1.1 Cálculos de proporcionalidad del refuerzo

De acuerdo con el software Autodesk Inventor Professional el volumen de la propela diseñada es de 22.0587 [ml], por lo tanto, se partió de un volumen de 50 [ml] para definir las cantidades adecuadas en peso para la mezcla.

$$Volumen = 50 [ml]$$

$$Densidad\ de\ la\ resina = 1.13 \left[\frac{g}{ml} \right]$$

$$Densidad\ de\ la\ cascara\ de\ huevo = 1.085 \left[\frac{g}{ml} \right]$$

Utilizando la fórmula de la densidad se procedió a determinar la masa de cada componente

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{g}{ml} \right]$$

Ecuación 1. Fórmula de la densidad

3.1.2 Cálculo de la cantidad de resina a utilizarse en la fabricación de la propela

$$m_{resina} = \rho_{resina} * V_{resina}$$

$$m_{resina} = 1.13 \left[\frac{g}{ml} \right] * 50 [ml]$$

$$m_{resina} = 59.5 [g]$$

Entonces el 80 % en peso sería:

$$m_{resina}@80\% = 47.6 [g]$$

3.1.3 Cálculo de la cantidad de polvo de cascara de huevo a utilizarse en la fabricación de la propela

$$m_{cascara\ de\ huevo} = \rho_{cascara\ de\ huevo} * V_{cascara\ de\ huevo}$$

$$m_{\text{cascara de huevo}} = 1.085 \left[\frac{g}{ml} \right] * 50 [ml]$$

$$m_{\text{cascara de huevo}} = 54.25 [g]$$

Entonces el 20% en peso sería:

$$m_{\text{cascara de huevo}@20\%} = 10.85 [g]$$

3.1.4 Cálculo de eficiencia de la propela

Para determinar la eficiencia de la propela se tomó como referencia a las diferentes fórmulas de aereodinamismo de (Brandt & Selig, 2011), además de los datos proporcionados por la página de APC de potencia, torque de la propela comercial. A continuación, se presenta las fórmulas empleadas:

$$C_T = \frac{T}{\rho_{\text{aire}} * n^2 * D^4}$$

Ecuación 2. Coeficiente de empuje

$$C_Q = \frac{Q}{\rho_{\text{aire}} * n^2 * D^5}$$

Ecuación 3. Coeficiente de torque

$$C_P = 2 * \pi * C_Q$$

Ecuación 4. Coeficiente de potencia

$$J = \frac{V}{n * D}$$

Ecuación 5. Relación de avance

$$f_{\text{Propela}} = \frac{C_T}{C_P} * J$$

Ecuación 6. Eficiencia

Los resultados obtenidos de la simulación en el túnel de viento y de los cálculos realizados de eficiencia de la propela hecha de particulado de cáscara de huevo a una velocidad de viento de 0 [m/s] se detallan en la Tabla 3.1, y para la velocidad de 5 [m/s] en la Tabla 3.2.

Tabla 3.1 Datos obtenidos de la propela a una velocidad de viento igual a 0 [m/s]

Throttle %	Velocidad [rpm]	Velocidad [rps]	Empuje [g]	Empuje [N]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Torque [N-m]	CT	CQ	CP	J	fpropela
10	3198,06	53,30	196,98	1,93	16,15	1,23	20,81	0,39	0,06	0,04	0,27	0,31	0,07
15	3936,54	65,61	276,97	2,72	15,66	1,48	24,53	0,37	0,06	0,03	0,17	0,25	0,09
20	4536,85	75,61	308,62	3,03	15,85	1,77	29,61	0,39	0,05	0,02	0,13	0,22	0,08
25	5077,22	84,62	384,77	3,77	16,38	2,07	34,21	0,40	0,05	0,02	0,11	0,19	0,09
30	5623,04	93,72	437,12	4,29	16,38	2,50	37,22	0,40	0,05	0,01	0,09	0,18	0,09
35	6056,04	100,93	461,56	4,53	15,89	3,40	52,84	0,52	0,04	0,02	0,10	0,16	0,07
40	6450,08	107,50	529,90	5,20	16,14	4,16	56,94	0,53	0,04	0,01	0,09	0,15	0,07
45	6769,58	112,83	542,64	5,32	16,58	4,48	68,42	0,61	0,04	0,01	0,09	0,15	0,06

Fuente: (Propia)

Tabla 3.2 Datos obtenidos de la propela a una velocidad de viento igual a 5 [m/s].

Throttle %	Velocidad [rpm]	Velocidad [rps]	Empuje [g]	Empuje [N]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Torque [N-m]	CT	CQ	CP	J	fpropela
10	2572,25	42,87	142,72	1,40	15,13	1,14	16,60	0,39	0,07	0,07	0,41	0,38	0,07
15	3305,75	55,10	211,58	2,07	14,78	1,34	19,29	0,35	0,06	0,04	0,22	0,30	0,09
20	3935,00	65,58	268,96	2,64	14,53	1,72	23,89	0,36	0,06	0,03	0,17	0,25	0,09
25	4381,00	73,02	302,14	2,96	14,85	1,91	26,59	0,36	0,05	0,02	0,13	0,22	0,09
30	4967,00	82,78	371,76	3,65	14,58	2,16	26,64	0,32	0,05	0,01	0,09	0,20	0,11
35	5310,25	88,50	389,00	3,81	14,59	3,03	43,99	0,50	0,05	0,02	0,12	0,19	0,07
40	5807,25	96,79	435,50	4,27	14,68	3,63	52,61	0,54	0,04	0,02	0,11	0,17	0,06
45	6121,00	102,02	486,65	4,77	14,61	3,98	58,20	0,57	0,04	0,02	0,11	0,16	0,07

Fuente: (Propia)

3.1.5 Análisis de resultados

Durante el proceso de obtención de datos en el túnel de viento, se realizó un paso previo que consistía en una prueba de comportamiento de las propelas con el banco de pruebas en un régimen estático donde una de las propelas falló a un Throttle de 50% por lo que para el resto de las propelas se obtuvieron datos hasta un Throttle de 45%. Además, se observó que las propelas generaban vibraciones a causa de la desproporción del peso en

las aspas, entonces se procedió a nivelar el peso colocando cinta masking en el aspa con menos peso. Por otro lado, el velocímetro que se encontraba colocado en el banco de pruebas estaba roto, por lo que se procedió a tomar datos de velocidad en rpm con un velocímetro apuntando el láser hacia motor. Dicho lo anterior para el proceso de toma de datos en el túnel de viento, se fabricó una mesa para colocar el banco de pruebas dentro del túnel (Anexo I, **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

En base a los datos obtenidos de empuje, velocidad y potencia se realizaron curvas de empuje y eficiencia en función de la velocidad angular y el Throttle, y se comparó con los datos de la propela comercial APC 12X8 EP, para ello se hicieron dos ensayos el primero a una velocidad de viento igual a cero y el otro ensayo se realizó a una velocidad de viento de 5 [m/s], como se muestran en la Figura 3.1 y Figura 3.2, acabe recalcar que los datos de la propela APC 12x8 EP de la página web de la empresa. (APC PROPELLERS, 2023)

3.1.5.1. Comparación de la propela de cáscara de huevo con la propela APC 12x8 EP

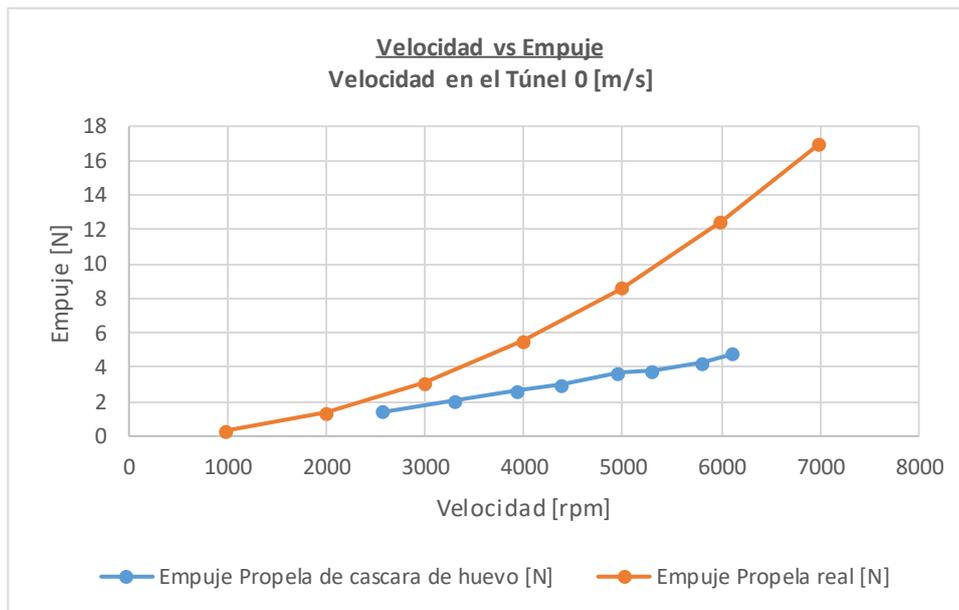


Figura 3.1 Resultados de las pruebas realizadas Velocidad vs Empuje, Vaire = 0 [m/s]

Fuente: (Propia)

En la Figura 3.1 se observa la diferencia de empuje que hay entre la propela comercial y la propela artesanal, a medida que se aumenta la velocidad en la propela de material compuesto la diferencia de empuje es notable, para una velocidad de 6000 [rpm] en la propela de cáscara de huevo el empuje es de 4,77 [N], es decir aproximadamente 3 veces menos que en una propela comercial.

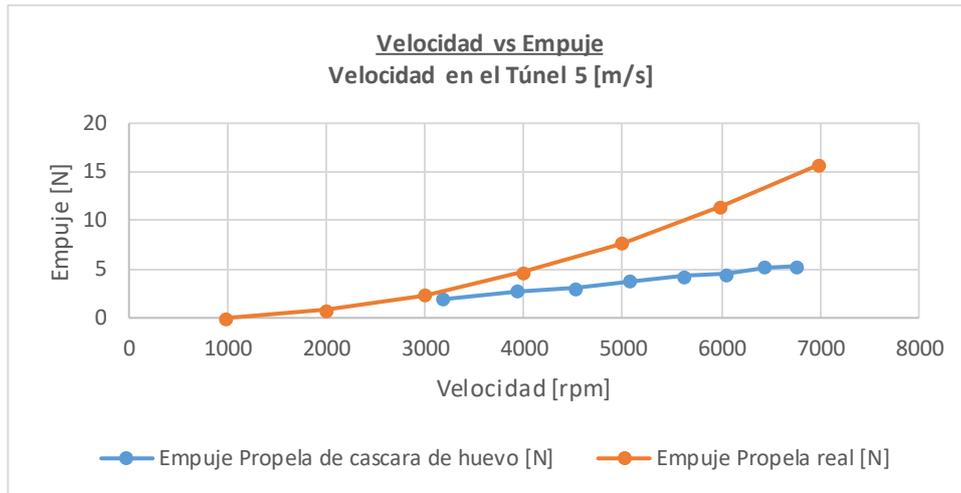


Figura 3.2 Resultados de las pruebas realizadas Velocidad vs Empuje, Vaire = 5 [m/s]

Fuente: (Propia)

Cuando se sometió la propela artesanal a una velocidad de viento de 5 [m/s] el comportamiento fue parecido, En la Figura 3.2 se puede observar que para una velocidad aproximada de 6000 [rpm] el empuje para la propela de material compuesto es de 4,53 [N] y para la comercial es de 11,43 [N], por lo que se puede decir que la propela en estudio genera un empuje 40% menos que la comercial.

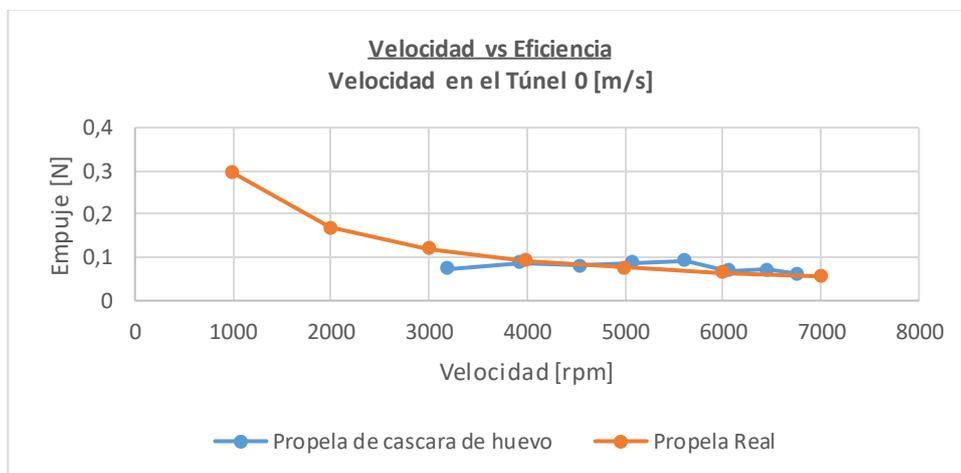


Figura 3.3 Resultados de las pruebas realizadas Velocidad vs Eficiencia, Vaire = 0 [m/s]

Fuente: (Propia)

De acuerdo con la Figura 3.3 se puede observar, a una velocidad del viento igual a cero, que la propela de material compuesto tiene un comportamiento semejante al de la propela APC 12x8 EP cuando la velocidad en rpm aumenta, la eficiencia es igual de 0,09 en ambos casos cuando la velocidad es de 4000 [rpm].

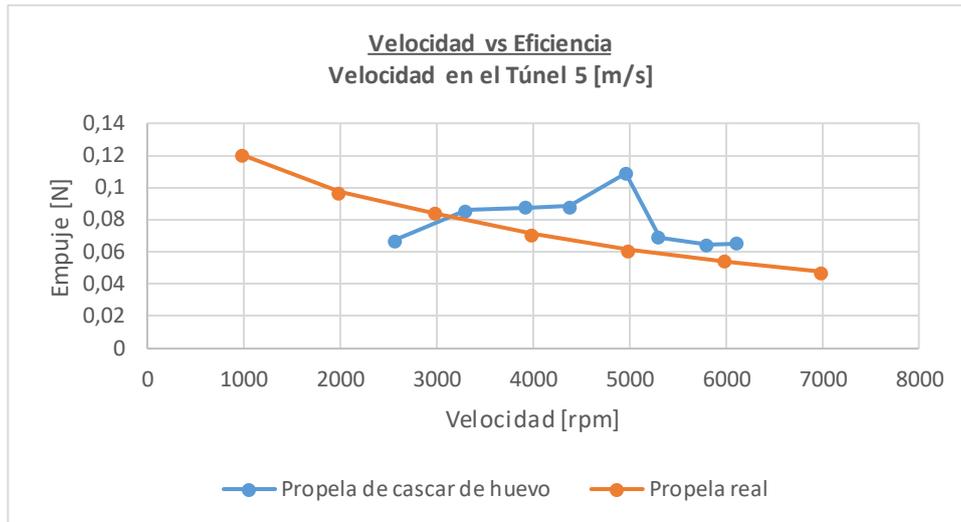


Figura 3.4 Resultados de las pruebas realizadas Velocidad vs Eficiencia, Vaire = 5 [m/s]

Fuente: (Propia)

Por otro parte, cuando la velocidad del viento es de 5 [m/s] la curva de eficiencia de nuestra propela tiene un comportamiento atípico como se aprecia en la Figura 3.4, es decir que la eficiencia es de 0,11 para la propela hecha de material compuesto mientras que para la comercial es de 0,60 cuando la velocidad es de 5000 [rpm].

3.1.5.2. Comparación de la propela de cáscara de huevo con la propela a base de fibra de hoja de pina.

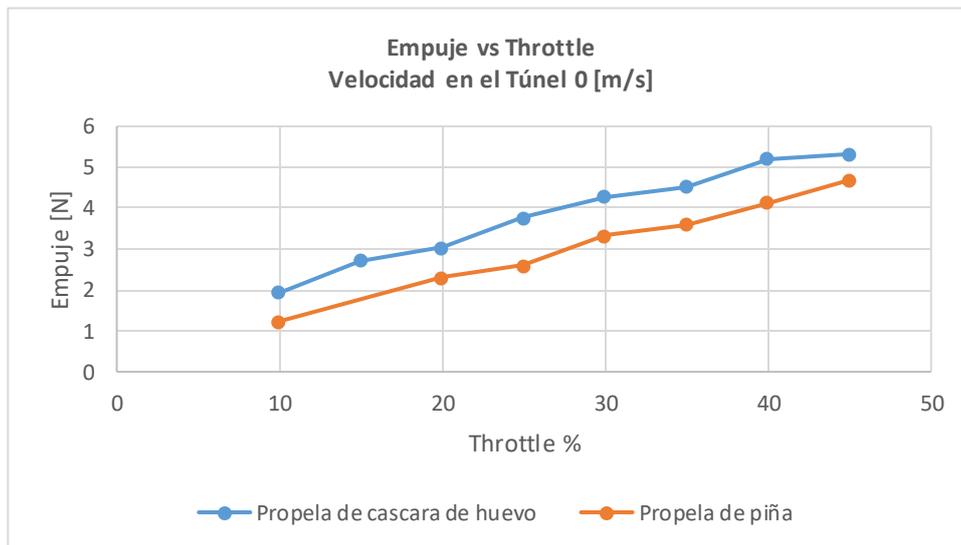


Figura 3.5 Comparación de la propela a base de cáscara de huevo vs hoja de piña. Empuje vs Throttle, V aire = 0 [m/s]

Fuente: (Propia)

En el desarrollo de la práctica, se comparó las dos propelas que se crearon a partir de particulado y fibra. En la Figura 3.5 se observa el comportamiento de la curva de empuje cuando se aumenta el Throttle, a una velocidad del viento igual a cero, además se puede observar la propela a base de cáscara de huevo genera más empuje en comparación de la propela a base de fibra de hoja de piña.

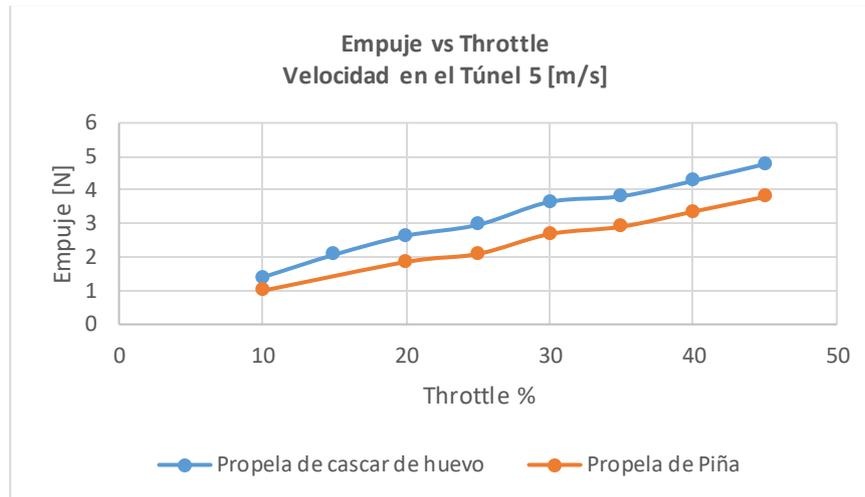


Figura 3.6 Comparación de la propela a base de cáscara de huevo vs hoja de piña. Empuje vs Throttle, $V_{\text{aire}} = 5$ [m/s]

Fuente: (Propia)

En la Figura 3.6 se observa que a una velocidad del viento igual a 5 [m/s], la propela con refuerzo particulado genera más empuje en comparación de la otra propela, sucede un comportamiento igual que el caso cuando la velocidad de viento es igual a cero.

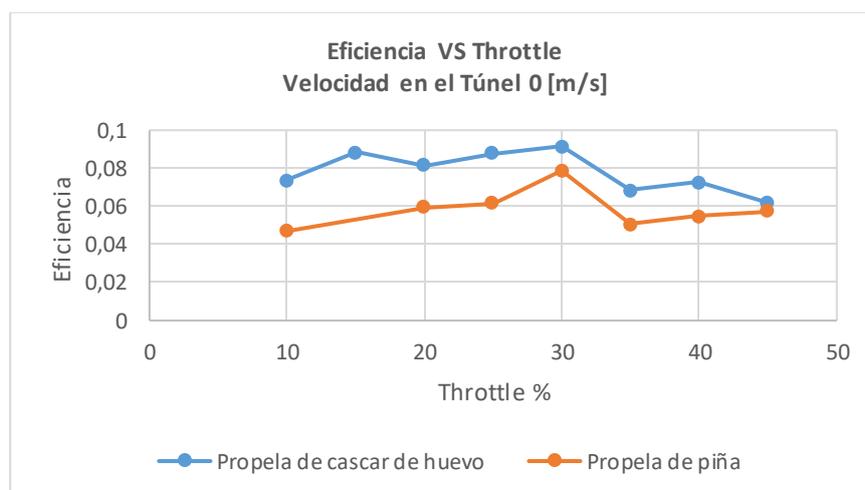


Figura 3.7 Comparación de la propela a base de cáscara de huevo vs hoja de piña. Eficiencia vs Throttle, $V_{\text{aire}} = 0$ [m/s]

Fuente: (Propia)

Para la Figura 3.7 se muestra la comparativa de la eficiencia de ambas propelas cuando la velocidad de viento es igual a cero, se puede observar que la propela con refuerzo de cáscara de huevo es más eficiente en comparación de la otra propela, y únicamente cuando el Throttle es del 45% las propelas tienen un valor igual de 0,06.

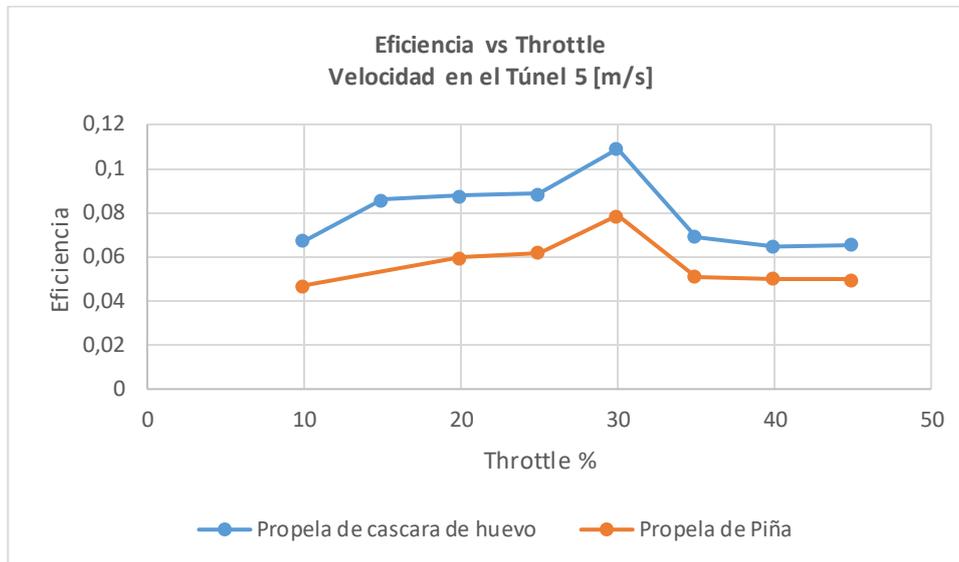


Figura 3.8 Comparación de la propela a base de cáscara de huevo vs hoja de piña. Eficiencia vs Throttle, $V_{\text{aire}} = 5$ [m/s]

Fuente: (Propia)

Cuando se tiene una velocidad del viento igual a 5 [m/s] el comportamiento es semejante a cuando la velocidad de viento es 0 [m/s], como se puede observar en la Figura 3.8 la propela con refuerzo particulado es más eficiente, es decir es aproximadamente 30% más eficiente que la propela a base de hoja de piña.

Por último, la fabricación de moldes en madera y metal tienen sus ventajas y desventajas. La madera es un material más barato y fácil de trabajar que el metal, lo que hizo que la fabricación de los moldes sea más accesible para este proyecto, adicionalmente la madera también es más fácil de tallar y dar forma, lo que permite la creación de moldes con detalles más intrincados, por ese lado nuestro molde resultó más conveniente en comparación al molde que se realizó en el diseño de la propela APC 12x6 de Gabriel Peralta. (Peralta, 2022) (Figura 3.9).



Figura 3.9 Molde de aluminio parte superior y Molde de madera parte inferior

Fuente: (Peralta, 2022)

Por otro lado, la fabricación del molde en metal tuvo una mayor durabilidad y resistencia a la deformación y al desgaste. Además, este molde tiene una mayor precisión y consistencia lo que es importante en la producción en masa. Sin embargo, la fabricación del molde de metal fue más costosa y requirió de la compra de herramientas para el corte en la máquina CNC.

3.2. Conclusiones

El uso de cáscara de huevo como refuerzo en la resina epoxi tiene varias ventajas. En primer lugar, la cáscara de huevo es un material natural y renovable, lo que lo hace más sostenible que otros materiales sintéticos. Además, la cáscara de huevo es rica en calcio, lo que puede mejorar las propiedades mecánicas de la resina epoxi.

Sin embargo, también hay algunas limitaciones en el uso de cáscara de huevo como refuerzo. Por ejemplo, es importante asegurarse de que la cáscara de huevo esté completamente seca antes de molerla para evitar que se produzcan grumos en la mezcla. Además, es posible que se necesite una mayor cantidad de refuerzo para obtener las mismas propiedades mecánicas que otros materiales sintéticos.

En general, la obtención de una hélice de dron con resina epoxi y refuerzo de cáscara de huevo por molde a compresión es un proceso interesante y sostenible que puede proporcionar propiedades mecánicas mejoradas a un material compuesto. Sin embargo, es importante tener en cuenta las limitaciones y considerar cuidadosamente el diseño y los materiales utilizados para garantizar un producto final seguro y efectivo.

La creación de una propela de dron con un molde de madera tiene varias ventajas. En primer lugar, la madera proporciona una base sólida y resistente para la creación del molde, lo que asegura la precisión y la calidad del resultado final. Además, realizar el molde de madera resultó barato en comparación de un molde de metal, y al momento de maquinar la madera es más manejable en la máquina CNC, y el tiempo de maquinado es menor en comparación al del maquinado en metal. Sin embargo, también existen algunas desventajas a considerar. La precisión del molde puede verse afectada por la calidad de la madera utilizada y el proceso de curado de la resina epóxica. Otra desventaja, a causa de la humedad la madera se deformó por lo que, si se requiere crear otra propela, se debe crear otro molde.

Debido al volumen de la fibra y para garantizar el llenado del molde, se realizó cambios en el diseño de la propela con un espesor de 3 [mm] de las aspas, estos cambios se vieron reflejados en los datos de empuje y eficiencia de las propelas, es decir los cambios afectaron al aerodinamismo de las propelas. Por lo que se puede afirmar que el material compuesto puede sustituir al plástico con el que se fabrican las propelas.

De acuerdo con los resultados obtenidos de las propelas con refuerzo particulado de cáscara de huevo resultaron más eficientes en comparación a las propelas creadas con fibra de hoja de piña, por lo que se puede concluir que la propela hecha con particulado de cáscara de huevo es una buena opción para la creación de propelas.

En resumen, el proceso de mecanizado en madera para la creación de un molde puede ser una opción viable y efectiva, aunque también presenta algunos desafíos. Sin embargo, el proceso de mecanizado en madera sigue siendo una opción popular para la creación de moldes debido a su flexibilidad, durabilidad y sostenibilidad. Con las herramientas y habilidades adecuadas, es posible crear moldes de madera precisos y efectivos para una variedad de aplicaciones.

La elección entre la fabricación de moldes en madera o metal dependerá de las necesidades específicas del proyecto, el presupuesto y la capacidad técnica disponible. Ambos materiales tienen sus ventajas y desventajas, por lo que es importante evaluar cuidadosamente las opciones antes de tomar una decisión.

3.3. Recomendaciones

Es importante asegurarse de que el polvo de cáscara de huevo esté completamente seco y molido antes de mezclarlo con la resina epoxi. Esto puede requerir un proceso de secado y molienda previo, dependiendo del tipo de cáscara de huevo utilizada. Además, es recomendable utilizar una proporción adecuada de polvo de cáscara de huevo y resina epoxi para garantizar una mezcla homogénea y una propela resistente y duradera. Es posible que se necesite experimentar con diferentes proporciones para encontrar la mezcla ideal para cada aplicación. Por último, es importante tener en cuenta que las propelas creadas con polvo de cáscara de huevo y resina epoxi pueden requerir un proceso de curado más largo que las propelas creadas con otros materiales.

Por otro lado, se debe realizar pruebas y experimentos previos antes de utilizar las propelas creadas con polvo de cáscara de huevo y resina epoxi en aplicaciones reales. Esto puede incluir pruebas de resistencia, pruebas de vibración y pruebas de rendimiento en diferentes condiciones ambientales. Es posible que sea necesario ajustar la mezcla o el diseño de la propela en función de los resultados obtenidos en estas pruebas. Además, es importante tener en cuenta que las propelas creadas con polvo de cáscara de huevo y resina epoxi pueden requerir un mantenimiento y cuidado especiales para garantizar su durabilidad y rendimiento a largo plazo. Esto puede incluir la limpieza regular y la inspección visual para detectar cualquier daño o desgaste. En general, la creación de propelas con polvo de cáscara de huevo y resina epoxi puede ser una opción efectiva y sostenible, siempre y cuando se sigan las recomendaciones adecuadas y se realicen pruebas previas exhaustivas.

En primer lugar, es importante seleccionar la madera adecuada para el molde. La madera debe ser resistente, duradera y sin nudos o imperfecciones que puedan afectar la calidad

del molde. La madera dura como el roble o el arce puede ser una buena opción para la creación de moldes, ya que es resistente y fácil de trabajar. Además, se recomienda utilizar herramientas de alta calidad y precisión para garantizar la precisión del molde. Es posible que sea necesario realizar varias pruebas y ajustes en el proceso de creación del molde para lograr la forma y el tamaño deseados. Por último, es importante tener en cuenta que el proceso de creación del molde puede ser lento y requerir mucha habilidad y paciencia.

Es importante tener en cuenta las condiciones ambientales en el proceso de creación del molde. La madera es susceptible a la humedad y otros factores ambientales, por lo que es importante mantenerla seca y protegida durante todo el proceso de creación. Además, se recomienda utilizar un sellador o un acabado para proteger la superficie del molde y prolongar su vida útil. Es posible que se necesite realizar mantenimiento regular en el molde para garantizar su durabilidad a largo plazo. Por último, es importante tener en cuenta que la precisión del molde puede afectar significativamente la calidad y el rendimiento de la propela final. Por lo tanto, se recomienda dedicar tiempo y esfuerzo a la creación del molde para garantizar un resultado final preciso y efectivo.

Es recomendable tener en cuenta las condiciones ambientales en el proceso de creación del molde. La madera es susceptible a la humedad y otros factores ambientales, por lo que es importante mantenerla seca y protegida durante todo el proceso de creación. Además, se recomienda utilizar un sellador o un acabado para proteger la superficie del molde y prolongar su vida útil. Es posible que se necesite realizar mantenimiento regular en el molde para garantizar su durabilidad a largo plazo. Por último, es importante tener en cuenta que la precisión del molde puede afectar significativamente la calidad y el rendimiento de la propela final. Por lo tanto, se recomienda dedicar tiempo y esfuerzo a la creación del molde para garantizar un resultado final preciso y efectivo.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APC PROPELLERS. (2023). *APC PROPELLERS*. Retrieved from <https://www.apcprop.com/technical-information/manufacturing/>
- Beltrán, M., & Marcillo, A. (2019). Moldeo por compresión. In *Tecnología de Polímeros* (pp. 170-181).
- Bolasodun, B. (2021). Synthesis and Characterisation of Sugarcane Bagasse and Pineapple Leaf . *Gazi University Journal of Science*, 1091-1100.
- Brandt, J., & Selig, M. (2011). Propeller Performance Data at Low Reynolds Numbers. *AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 1-18. Retrieved from <https://uav.jreyn.net/>
- Carvajal, L. (2006). *Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado* (28 ed.). Santiago de Cali: U.S.C.
- Chacha, E. R. (2019). *CARACTERIZACION DE UN MATERIAL COMPUESTO CON MATRIZ DE RESINA* . Quito.
- Chávez, S. G. (2012, Agosto 19). Lima: Guzlop. Retrieved from file:///C:/Users/Andr%C3%A9s/Downloads/TUNEL_DE_VIENTO_PARA_ESTUDIOS_EXPERIMENT.pdf
- Guerrero, V., Dávila, J., Galeas, S., Pontón, P., & Rosas, N. (2011). Materiales Compuestos. In *Nuevos Materiales Aplicaciones Industriales* (pp. 45-72). Quito: imprefepp.
- Mott, R. L. (2009). Propiedades de diseño de materiales. In R. L. Mott, *Resistencia de Materiales* (pp. 88-99). México: Pearson.
- Nandan, S. (2023). How Drones Work and Their Anatomy. In *Drone Technology* (pp. 25-28). New Jersey: Scrivener Publishing.
- Peralta, G. (2022). *Diseño y construcción de una propela APC 12x6 EP para drone skywaker con materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra natural*". Quito.
- Ramírez, E. G. (2005, Septiembre). *Biblus*. Retrieved from <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4030/fichero/Elena+Garc%C3%ADa+Ram%C3%ADrez%252F3.-+CAP%C3%8DTULO+1.pdf>
- Schafer, J. A. (2018, Abril). *Red de bibliotecas Landivarianas*. Retrieved from <http://recursosbiblio.url.edu.gt/Libros/2013/cml/16-Compuestos.pdf>
- Shashir, S. (2017). Experimental investigation of mechanical properties of egg shell powder reinforced with epoxy. *JETIR*, 157-160.
- Stupenengo, F. (2011). Materiales compuestos. In *Materiales y materias primas* (pp. 7-20). Buenos Aires: Coleccion Encuentro Inet.

5. ANEXOS