

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PROPELA APC 12X6 EP PARA DRONE SKYWAKER CON MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADOS CON FIBRA NATURAL

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

GABRIEL ALEXANDER PERALTA GODOY

gabriel.peralta@epn.edu.ec

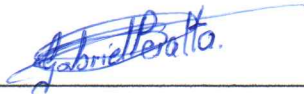
DIRECTORA: ING. PATRICIA ARACELLY RODRIGUEZ SALAZAR PHD.

patricia.rodriguez@epn.edu.ec

DMQ, septiembre 2022

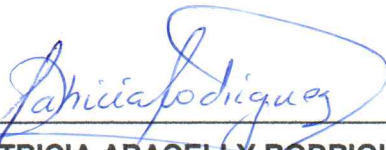
CERTIFICACIONES

Yo, Gabriel Alexander Peralta Godoy 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.



GABRIEL ALEXANDER PERALTA GODOY

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Gabriel Alexander Peralta Godoy, bajo mi supervisión.



ING. PATRICIA ARACELLY RODRIGUEZ 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.

GABRIEL ALEXANDER PERALTA GODOY

ING. PATRICIA ARACELLY RODRIGUEZ SALAZAR PHD.

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación está dedicado a mi madre Mirian, quien ha sido la persona más importante en mi vida. Gracias a su apoyo constante, sacrificio y cuidados supo guiar mi camino. Me enseñó a creer en mis habilidades y que a pesar de que las cosas se ponen difíciles, siempre debo tener presente que son para tener una nueva oportunidad de mejorar.

A mis abuelitos Teresita y Papá Oswaldo, quienes desde el día en que nací me brindaron un hogar y me criaron como a su propio hijo. Gracias a mi abuelita Teresita, por ser mi segunda madre quien siempre estuvo conmigo para corregirme y darme su cariño. Gracias a mi abuelito Oswaldo, quien me mostró que, a pesar de los problemas, uno nunca debe dejar de ser un buen hombre y un buen ser humano.

A mis hermanos Oswaldo y Bryan, quienes siempre me dieron su apoyo incondicional y me ayudaron en mis momentos difíciles. Les doy las gracias por esos momentos de alegría que me supieron dar cuando llegaba cansado de la universidad.

A mis tíos Pablo, Silvia y Fernando, quienes me enseñaron el valor del esfuerzo, el trabajo, la perseverancia y la capacidad para seguir luchando por mis sueños sin rendirme.

A mis primas Tita y Barbarita, quienes siempre me sacaban una sonrisa con sus ocurrencias.

A los dos hermanos que dios me puso en mi camino Marco y Edison, los cuales siempre me apoyaron y aconsejaron. Gracias por enseñarme que, en cuestión de amigos, no necesitaba cantidad sino calidad. Sin su apoyo, esto no sería posible.

GABRIEL ALEXANDER PERALTA GODOY

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la oportunidad de seguir creciendo como persona y como profesional.

Por darme la fortaleza y motivación que necesitaba para culminar mis estudios.

A mi familia, que con su apoyo y cuidado fue posible cumplir una meta más en mi vida.

A mi directora, Patricia Aracelly Rodríguez Salazar, por su comprensión, motivación y guía. Durante todo el desarrollo de este proyecto. Sin su apoyo, este proyecto no hubiera sido posible. Gracias por todo.

Al ingeniero Javier Valverde, quien gracias a su apoyo con los procesos de mecanizado CNC en EPN, hizo posible el desarrollo de este proyecto. Le deseo éxitos en su vida profesional.

A las personas que estuvieron acompañándome durante toda mi carrera universitaria. Sobre todo, a mis amigos Frank Hernán, Greñas, Santiago, Steven y Rossell, gracias por su apoyo.

A Mis panas del ecuavoley con quienes pasaba buenos momentos en las canchas del barrio y de la universidad.

Al grupo de "los Totines", con quienes pasaba horas de desvelo jugando COD Mobile.

A los amigos del grupo Kadir el tigre López, con quienes pasaba momentos divertidos compartiendo memes, conversando y estudiando para los exámenes.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	1
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 MARCO TEÓRICO.....	3
1.4.1 Material compuesto.....	3
1.4.2 Matriz.....	4
1.4.3 Interfaz.....	5
1.4.4 Refuerzo.....	6
1.4.5 Fabricación de un material compuesto.....	9
1.4.6 Tipos de fabricación.....	10
1.4.7 Propela.....	13
1.4.8 Túnel de viento.....	17
2 METODOLOGÍA.....	18
2.1 Fabricación de la propela.....	20
2.1.1 Dimensiones de Propela.....	20
2.1.2 Geometría base.....	20
2.1.3 Diseño de base para molde.....	21
2.2 Proceso de fabricación de molde de material compuesto.....	22
2.2.1 Selección de material compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra de yute orientada al azar.....	22
2.2.2 Análisis de composición del material compuesto a fabricar.....	23
2.2.3 Cálculos de proporciones para el material compuesto.....	24
2.2.4 Fabricación de molde de material compuesto.....	25

2.3	Proceso de fabricación por CNC	28
2.3.1	Diseño y fabricación de molde de la propela.....	29
2.3.2	Prueba de maquinado de propela en placa de madera.....	31
2.3.3	Proceso de maquinado primera cara de propela	32
2.3.4	Proceso de maquinado segunda cara de propela.....	33
2.4	Pruebas de propela en el túnel de viento	34
2.4.1	Calibración del banco de pruebas del sistema de propulsión de un UAV....	34
2.4.2	Balanceo de propela de material compuesto	35
2.4.3	Pruebas de la propela en el túnel de viento	36
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	37
3.1	Resultados	37
3.1.1	Obtención de eficiencia de propela.....	37
3.1.2	Análisis de resultados de graficas de empuje y eficiencia de propela.	39
3.1.3	Análisis y cálculo de error entre datos teóricos y experimentales de las propelas evaluadas.....	41
3.2	Conclusiones.....	46
3.3	Recomendaciones.....	48
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
5	ANEXOS.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Estructura de un material compuesto	3
Figura 1.2 Fibras vegetales	6
Figura 1.3 Fibra de yute: tejido e hilo de una sola hebra	8
Figura 1.4 Orientación de fibras: (a) continuas longitudinales, (b) discontinuas longitudinales, (c) cortas orientadas al azar	9
Figura 1.5 Proceso hand lay up.....	10
Figura 1.6 Proceso de moldeo por aspersión	11
Figura 1.7 Proceso de inyección	12
Figura 1.8 Proceso por compresión	12
Figura 1.9 Proceso de estratificación de preimpregnados	13
Figura 1.10 Propela de dron de dos aspas	14
Figura 1.11 Fabricación de propela de 4 aspas mediante impresión 3D.....	15
Figura 1.12 Maquinado manual de una propela de dos aspas	15
Figura 1.13 Proceso de modelado de propela mediante maquinado CNC	16
Figura 1.14 Molde de inyección de una propela de 3 aspas.....	16
Figura 1.15 Fabricación de propela por compresión.....	17
Figura 1.16 Túnel de viento subsónico	17
Figura 2.1 Metodología.....	19
Figura 2.2 Diseño preliminar de propela APC 12x6 EP	20
Figura 2.3 Diseño para base metálica.....	21
Figura 2.4 Modelado en SolidWorks y obtención final de molde fabricado	21
Figura 2.5 Placa metálica armada.....	25
Figura 2.6 Medición de materiales para elaboración de material compuesto.....	26
Figura 2.7 Mezcla de resina con estireno	26
Figura 2.8 Mezcla de solución con octoato de cobalto	27
Figura 2.9 Mezcla de solución con MEKP.....	27
Figura 2.10 Prensa mecánica.....	28
Figura 2.11 Molde de material compuesto final	28
Figura 2.12 Diseño de base de aluminio de propela en SolidWorks	29

Figura 2.13 Lingote de aluminio	29
Figura 2.14 Proceso de desbastado de lingote de aluminio	30
Figura 2.15 Proceso de acabado en lingote de aluminio	31
Figura 2.16 Molde final de aluminio: base de la propela.....	31
Figura 2.17 Prueba en lingote de madera.....	31
Figura 2.18 Obtención final de prueba de mecanizado de propela en madera	32
Figura 2.19 Proceso de mecanizado de lingote de material compuesto	32
Figura 2.20 Mecanizado de primera cara de propela de material compuesto	32
Figura 2.21 Preparación de molde de aluminio de propela	33
Figura 2.22 Proceso de mecanizado de segunda cara de propela.....	33
Figura 2.23 Obtención de propela de matriz poliéster reforzada con fibra de yute	34
Figura 2.24 Proceso de pruebas: a) instalación sistema de propulsión. b) incorporación de sistema en el túnel de viento	35
Figura 2.25 Balanceo de propela de material compuesto con cinta adhesiva (Taípe).....	36
Figura 2.26 Obtención de datos mediante la aplicación de matlab App designer	36
Figura 3.1 Gráfica de Empuje vs RPM para la propela 1.....	39
Figura 3.2 Gráfica de Empuje vs RPM para la propela 2.....	40
Figura 3.3 Gráfica de Eficiencia vs RPM para la propela 1	40
Figura 3.4 Gráfica de Empuje vs RPM para la propela 2.....	41
Figura 3.5 Gráfica teórica de empuje y eficiencia vs RPM	42
Figura 5.1 Prueba en lingote de madera.....	52
Figura 5.2 Mecanizado de la primera cara de la propela de madera.....	52
Figura 5.3 Mecanizado de segunda cara de propela de madera.....	53
Figura 5.4 Obtención final de prueba de mecanizado de propela en madera	53
Figura 5.5 Propela fallida durante el primer intento de mecanizado.....	54
Figura 5.6 Falla de propela de material compuesto	54
Figura 5.7 Falla de propela 1.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Propiedades de materiales compuestos de acuerdo con su aplicación.....	4
Tabla 1.2 Unión entre constituyentes de un material compuesto.....	6
Tabla 1.3 Fibras de origen vegetal	7
Tabla 1.4 Especificaciones técnicas de propela APC 12x6 EP.....	14
Tabla 2.1 Especificaciones geométricas de propela APC 12x6 EP	20
Tabla 2.2 Resultados de simulación de Propela APC 12x6 EP	22
Tabla 2.3 Comparación de resultados investigados para la elaboración de un material compuesto de fibra de yute de matriz poliéster.	23
Tabla 2.4 Materiales para elaborar el material compuesto.	23
Tabla 2.5 Proporciones finales para molde de material compuesto.....	25
Tabla 2.6 Herramientas de corte para fresadora CNC.....	30
Tabla 2.7 Especificaciones de equipos para pruebas en propela APC 12x6 EP.....	35
Tabla 3.1 Datos obtenidos de la prueba 1 para la propela 1.....	38
Tabla 3.2 Datos obtenidos de la prueba 1 para la propela 2.....	38
Tabla 3.3 Empuje: Porcentaje de error para la propela de material compuesto 1	43
Tabla 3.4 Empuje: Porcentaje de error para la propela de material compuesto 2	43
Tabla 3.5 Eficiencia: Porcentaje de error para la propela de material compuesto 1	44
Tabla 3.6 Eficiencia: Porcentaje de error para la propela de material compuesto 2.....	44
Tabla 5.1 Datos obtenidos de la prueba 2 para la propela 1.....	55
Tabla 5.2 Datos obtenidos de la prueba 3 para la propela 1.....	55
Tabla 5.3 Datos obtenidos de la prueba 2 para la propela 2.....	56
Tabla 5.4 Datos obtenidos de la prueba 3 para la propela 2.....	56

RESUMEN

El uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) ha ido en aumento en los últimos años. Estos se utilizan para trabajo de campo, mensajería, ingeniería, combate e investigación científica. Por lo tanto, la demanda de equipos y repuestos, especialmente en el sistema de propulsión (Motor - propela) es cada vez mayor. En Ecuador no existen fabricantes de estos equipos, por lo que sus costos son bastante elevados. Las propelas de los drones suelen estar hechas de materiales plásticos. Lo que significa que, una vez que dejan de funcionar, se desechan y terminan siendo un problema para el medio ambiente.

El presente trabajo se centró en la fabricación de una propela APC 12x6 EP para un dron Skywaker fabricada en un material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras naturales, con el fin de obtener una alternativa a las propelas de plástico. El proyecto se desarrolló a partir de los estudios realizados por Rivera J., 2022. En primer lugar, se hizo la selección y fabricación del material compuesto que presentaba mejores propiedades mecánicas basándose en los parámetros de una propela estándar.

Una vez fabricado el material compuesto, se diseñó y fabricó la propela mediante el método de mecanizado CNC. Ya que este proceso, permite obtener elementos con geometrías más complejas.

Finalmente, la propela se sometió a pruebas en túnel de viento bajo flujo controlado con la ayuda de un sistema de propulsión para comparar los datos experimentales con los teóricos.

PALABRAS CLAVE: Propela, mecanizado, material compuesto, sistema de propulsión.

ABSTRACT

The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) has been increasing in recent years. These are used for field work, messaging, engineering, combat, and scientific research. Therefore, the demand for equipment and spare parts, especially in the propulsion system (Engine - propeller) is increasing. In Ecuador there are no manufacturers of this equipment, so their costs are quite high. Drone propellers are usually made from plastic materials. which means that, once they stop working, they are discarded and end up being a problem for the environment.

The present work focused on the manufacture of an APC 12x6 EP propeller for a Skywaker drone made of a polymer matrix composite material reinforced with natural fibers, to obtain an alternative to plastic propellers. the project was developed from the studies carried out by Rivera J., 2022. In the first place, the selection and manufacture of the composite material that presented the best mechanical properties based on the parameters of a standard propeller was carried out.

Once the composite material was manufactured, the propeller was designed and manufactured using the CNC machining method. Since this process allows obtaining elements with more complex geometries.

Finally, the propeller was subjected to wind tunnel tests under controlled flow with the help of a propulsion system to compare the experimental data with the theoretical ones.

KEY WORDS: Propeller, machining, composite material, propulsion system.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) han tenido un gran avance en América Latina con aplicaciones en el área industrial, comercial, investigación científica o militar, pues han permitido una mayor cantidad de horas de vuelo y el acceso a lugares que, por lo general, son un riesgo para un piloto normal (G. Sánchez, 2013).

En el Ecuador, los UAV son utilizados para la investigación en zonas andinas, zonas de agricultura y en el sector militar. Existen grupos de investigación como el ATA Research Group de la Escuela Politécnica Nacional que se dedican a la implementación y el desarrollo de este tipo de tecnologías mediante el estudio de mecánica de fluidos, aerodinámica, monitoreo, entre otros.

Debido a la gran demanda de los UAV, la adquisición de repuestos se vuelve una necesidad fundamental. Sobre todo, en propelas conformadas por materiales metálicos, madera y plástico, siendo los últimos los más usados. Estos elementos son importados porque no existe un fabricante disponible en el país, lo cual hace que sus costos sean elevados y produzcan una gran cantidad de desechos que afectan el medio ambiente.

El presente trabajo de investigación se centra en el diseño y construcción de una propela para un dron Skywaker APC 12x6 EP de material compuesto de matriz poliéster reforzada con fibra de yute. Cuyo objetivo es reducir el consumo de plástico, metal y madera; y poder obtener una propela más amigable con el medio ambiente, de alta resistencia mecánica, buena eficiencia y que cumpla sus funciones durante las operaciones de vuelo.

Este proyecto toma como referencia el trabajo de integración curricular de Rivera J., 2022. De tal forma que, a partir de los datos obtenidos del presente documento, se seleccionan las proporciones más adecuadas del material compuesto existente para ser fabricado.

Para el proceso de fabricación se emplea el método por maquinado CNC. Es decir, se obtienen los modelos de la propela y el molde, mediante un software de diseño CAD (SolidWorks) y se obtienen los códigos de programación mediante aplicación del software CAM (solidCAM). Una vez obtenido estos componentes se realiza las operaciones de maquinado con el fin de obtener la propela y proceder a realizar pruebas en el túnel de viento para determinar su funcionalidad.

1.1 Objetivo general

Diseñar y construir una propela APC 12x6 EP para dron Skywaker con materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra natural.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar el estado del arte de los materiales compuestos con matriz polimérica reforzada con fibras naturales.
- Seleccionar y replicar el material compuesto que presenta las mejores propiedades mecánicas en la elaboración de la propela.
- Diseñar y mecanizar la propela APC12x6 EP mediante el proceso de fabricación por maquinado CNC.
- Evaluar el funcionamiento de la propela de material compuesto mediante la utilización de un flujo de viento controlado simulando condiciones reales de vuelo (túnel de viento).
- Validar los resultados obtenidos en la fabricación (componente práctico) con los obtenidos en la simulación por elementos finitos (componente teórico).

1.3 Alcance

El presente trabajo tiene por objetivo la fabricación de una propela APC 12x6 EP con material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibra natural como complemento del trabajo de integración curricular de J. Rivera 2022, donde se realiza la selección de una fibra natural disponible en el país que, por sus características mecánicas, proporciones y disponibilidad sería la más adecuada para ser empleada en la fabricación de dicho elemento. El trabajo mencionado finaliza con la simulación de la propela APC 12x6 EP empleando el material compuesto, por lo que en este trabajo se estableció el proceso de fabricación y las proporciones de los componentes para replicar dicho material, así como el diseño y manufactura del molde para su obtención y las características que debe cumplir para su uso en la propela.

Una vez que el material compuesto es obtenido, se procedió a su elaboración y conformado, mediante maquinado CNC, para así obtener la geometría de la propela y proceder a las pruebas en el túnel de viento mediante la utilización del “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 & Nandar, 2021), considerando parámetros de prueba la velocidad de operación de motor, velocidad del aire, potencia, empuje y eficiencia, con el fin de comparar estos resultados con los resultados obtenidos en la simulación de Rivera J., 2022.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 Material compuesto

Un material compuesto resulta de la combinación de dos o más materiales con el objetivo de modificar sus propiedades y así obtener un nuevo material. Estos se forman por la unión de dos fases: continua o matriz y dispersa o refuerzo (Figura 1.1).

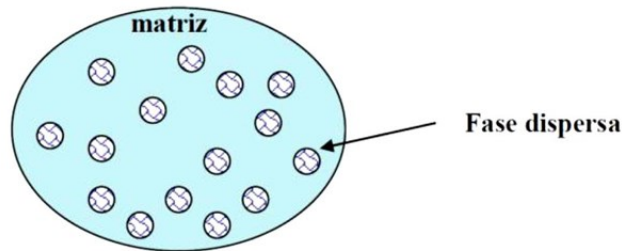


Figura 1.1 Estructura de un material compuesto

(Fuente: C. Figueroa, 2017)

Los materiales compuestos se pueden dividir con respecto al tipo de constituyente disperso en:

Fibrosos: el constituyente disperso pueden ser fibras continuas o discontinuas alineadas o discontinuas orientadas al azar.

Particulados: donde las dimensiones del constituyente disperso suelen ser las mismas en todas las direcciones.

Estructurales: los cuales se forman por la apilación de láminas, es decir, tipo sándwich.

En la actualidad, los materiales compuestos presentan una gran variedad de propiedades que varían dependiendo del campo de aplicación, pues las propiedades resultantes del material compuesto van a depender del tipo de matriz, refuerzo utilizado y configuración. así como la compatibilidad entre refuerzo y matriz, siendo éste última un factor determinante para que el material falle. Ejemplos de aplicación de este tipo de materiales son los procesos en la aeronáutica en donde se desea obtener nuevos materiales que mejoren la eficiencia de vuelo y en el campo industrial en donde se busca mejorar la vida útil, seguridad y diseño de componentes mecánicos. En la Tabla 1.1 se muestran algunas de las propiedades que se desea en los materiales que se utilizan en estos campos de aplicación.

Tabla 1.1 Propiedades de materiales compuestos de acuerdo con su aplicación

Propiedades	Aeronáutica	Industria
Vida útil	Resistencia a la fatiga Resistencia a la corrosión	Resistencia mecánica Impermeabilidad
Seguridad	Resistencia al fuego	Resistencia al fuego Aislante térmico Amortiguamiento y vibraciones
Diseño	Integración de funciones Formas complejas Disminución del peso de las partes o estructura.	

(Fuente: P. Pontón, 2011)

1.4.2 Matriz

La matriz en los materiales compuestos es multifuncional debido a que es la fase continua que abarca y sostiene los elementos del refuerzo. Las funciones más elementales que tiene la matriz son:

- Compensar los refuerzos.
- Transferir la carga que se aplica desde la matriz hasta los refuerzos.
- Proteger la superficie de la abrasión mecánica.
- Proteger de la humedad.
- Si el refuerzo son fibras, brindar un soporte lateral contra el posible pandeo debido a cargas de compresión aplicadas.

Este componente tiene varios efectos en las propiedades químicas, eléctricas y mecánicas de un material como son: resistencia mecánica, resistencia de tracción, ductilidad, resistencia de impacto, rigidez, entre otras.

El tipo de matriz que se utilice influye en las propiedades internas y externas del material por lo que existen tres tipos de matrices: metálicas, poliméricas y cerámicas.

Matrices metálicas

Se forman por elementos metálicos como aluminio, cobre, aleaciones, entre otros, los que son muy utilizados en la industria aeroespacial y automotriz porque permiten trabajar a altas temperaturas. Su producción es bastante costosa debido a la complejidad de su proceso de fabricación, sin embargo, estos compuestos tienen mejoras en el elemento como alta resistencia mecánica y alta rigidez. Los refuerzos que se utilizan con este tipo

de matrices suelen tener baja densidad, compatibilidad mecánica, compatibilidad química, entre otros (P. Pontón, 2011).

Matrices poliméricas

Son utilizadas en varias aplicaciones industriales y en grandes cantidades gracias a su baja densidad, facilidad de fabricación y costo relativamente bajo. Este tipo de matrices utilizan principalmente fibras naturales y sintéticas como refuerzo (P. Pontón, 2011).

Las matrices poliméricas pueden ser:

- **Termoestables:** están formadas por redes tridimensionales entrelazadas que una vez formadas no se puede revertir el proceso por lo que con el paso del tiempo se degradan; algunos ejemplos de este tipo de matriz son las resinas epoxy, fenólica y poliéster.
- **Termoplásticas:** son aquellas que pasan de un estado sólido a líquido cuando se trabaja a altas temperaturas y son fabricadas con materiales plásticos reciclables como polipropileno (PP), (P. Pontón, 2011).
- **Elastoméricas:** son materiales que contienen zonas elásticas de gran proporción capaces de deformarse elásticamente hasta un cierto grado y volver a su estado original. Esta característica las hace muy solicitadas en la industria y el comercio.

Matrices cerámicas

Los materiales cerámicos se caracterizan por tener un elevado punto de fusión, alta dureza y rigidez lo que implica que estos materiales son frágiles. además, poseen una baja densidad y resistencia a la corrosión. Debido a estas características, se busca reforzar este tipo de material con el objetivo aumentar la tenacidad del material compuesto. En el caso de las matrices cerámicas es importante que los refuerzos sean capaces de resistir altas temperaturas por lo que trabajar con este tipo de matrices es bastante complejo (J. Valera, 2016).

1.4.3 Interfaz

La unión entre dos elementos es de vital importancia por lo que el papel de la interfaz es primordial en los materiales compuestos. Se tiene una interfaz buena cuando el refuerzo se complementa bien con la matriz ya que de esto dependerán las propiedades mecánicas que se obtendrán. Cuando las cargas que se apliquen sobre la superficie de la matriz se transmiten hacia los refuerzos se denota la presencia de una buena interfaz, lo contrario es señal de una mala interfaz, lo que provocaría una unión deficiente causando la falla del material (P. Pontón, 2011).

Para combinar los materiales es preferible que la matriz se encuentre en estado líquido y tenga un grado de mojabilidad muy bueno cuando se extienda sobre la fibra o refuerzo. La mojabilidad es un factor importante que influye en las propiedades del material final, por lo que existen cuatro formas en las que se puede unir dos materiales (Tabla 1.2):

Tabla 1.2 Unión entre constituyentes de un material compuesto

Tipos de unión entre constituyentes de un material compuesto	
Unión mecánica	Se basa en la rugosidad del material
Unión química	Grupos químicos compatibles entre refuerzo - matriz
Unión electrostática	Se requiere una carga positiva y una carga negativa
Unión mediante Inter difusión	La unión se genera mediante cadenas poliméricas

(Fuente: P. Pontón, 2011)

1.4.4 Refuerzo

Fibra natural como refuerzo en materiales compuestos

Las fibras naturales son materiales presentes en varias aplicaciones de ingeniería (Figura 1.2), estas son las encargadas de proporcionar propiedades mecánicas diferentes a la matriz, además de contribuir en la disminución del peso dependiendo del porcentaje de fibra empleado, por lo que su uso en aplicaciones, sobre todo, en el campo tecnológico tiene como finalidad elevar la rigidez de la matriz y su resistencia a la fatiga disminuyendo el peso del material. Estas fibras pueden emplearse en el sector industrial, químico, aeronáutico, muebles y elementos del hogar e incluso para la fabricación de accesorios de seguridad o para fabricación de armas. Las fibras naturales se pueden clasificar por su origen en fibras vegetales animales y minerales.



Figura 1.2 Fibras vegetales

(Fuente: Gandano, 2021)

Fibra vegetal

Este tipo de fibras se encuentran presentes en varios elementos en la naturaleza, están formando parte de las plantas y proporcionan dureza y rigidez en sus tejidos, son de origen biológico y sus características químicas, mecánicas y físicas determinan sus propiedades. Las fibras naturales son un grupo de células con una alta resistencia mecánica formadas por lignina y celulosa que sostienen a la planta, se puede ver que estas fibras son utilizadas para la fabricación de textiles, papel y cartón, también han sido utilizadas para la fabricación de herramientas y elementos para el uso doméstico (Vidal, 2016).

Las fibras de origen vegetal se suelen clasificar en blandas, duras y de superficie, siendo estas últimas las más utilizadas como refuerzo de materiales compuestos (Tabla 1.3).

Tabla 1.3 Fibras de origen vegetal

Tipos de fibras naturales de origen vegetal				
Fibras Blandas	Fibras duras	Fibras de superficie	Otro tipo de fibra	
Tallo	Hoja	Semilla	Caña	Frutos
Cáñamo	Abacá	Algodón	Esparto	Palma aceitera
Ramio	Sisal	Kapok	Bejuco	Coco
Lino	Cuarua	Algodoncillo	Bambú	Banano
Kenaf	Fermio	Yute	Bagazo	---

(Fuente: Modificado de A. Mohanty, 2009)

Fibra de yute

La fibra de yute (Figura 1.3) fue material muy utilizado durante la época de la revolución industrial, es conocida como la fibra dorada y proviene de la corteza de la planta de yute rojo y del yute blanco. Se caracteriza por tener un aspecto brillante con longitudes bastante largas y una densidad de 1.3 [g/cm³], tarda alrededor de 120 días en desarrollarse en zonas tropicales con humedad que supera el 60%, no requiere de fertilizantes y se produce alrededor de 2 toneladas por cada hectárea de cultivo, lo que se posiciona como la segunda fibra con mayor producción después del algodón (FAO, 2016).

Esta fibra es producida en el continente asiático principalmente en la India y Bangladesh con una producción de más del 90% de yute a nivel mundial, de tal manera que, estos países son el principal exportador de yute para Ecuador. Uno de los principales beneficios que existen a la hora de utilizar fibra de yute es que es un material 100% biodegradable y reciclable, lo que garantiza el cuidado del medio ambiente en varias de sus aplicaciones ya sea en la industria textil, cosméticos, medicamentos, ingeniería entre otros.

En el país solo se puede encontrar en forma de fibras tejidas e hilos de 1 o más hebras y no en su estado natural por lo que para poder trabajar con estas es necesario desenredarlas y si fuera el caso limpiarlas con jabón neutro para posteriormente secarlas.



Figura 1.3 Fibra de yute: tejido e hilo de una sola hebra

(Fuente: Textiles Álvarez, 2019)

Influencia de la orientación y cantidad de fibra aplicada como refuerzo

En los materiales compuestos se pueden utilizar fibras continuas o alineadas, es decir, fibras de gran longitud; también se pueden emplear fibras discontinuas o cortas que pueden ser alineadas u orientadas al azar. Las propiedades mecánicas que proporcionan las fibras al material compuesto dependen de su orientación en el plano en que sean ubicadas, por lo tanto, los materiales compuestos con fibras continuas o largas que se utilicen con una orientación definida se comportarán como anisotrópicos. Por otro lado, cuando se emplean fibras cortas orientadas aleatoriamente las propiedades del material compuesto proporcionarán un comportamiento isotrópico. En el caso de estudio de este trabajo la fabricación de la propela de un drone con materiales compuestos se debe considerar que debido a las condiciones de trabajo se requieren propiedades isotrópicas en el material por lo que el refuerzo debe ser empleado como fibras cortas orientadas al azar (A. Moral, 2007).

La cantidad y orientación de las fibras es muy importante para la conformación del material compuesto (Figura 1.4). Cuando se tiene fibra continua y alineada sus propiedades dependen del ángulo que se forma en entre la dirección de la carga y la dirección de la fibra, en tanto que cuando se habla de fibras discontinuas alineadas sus propiedades dependen de la cantidad de fibra en la matriz. Teóricamente un material compuesto podría tener hasta un 90% de su composición solo en fibra, aun cuando en la práctica este valor está entre el 60 al 65%. Varios de estos factores son responsables de que las propiedades mecánicas como resistencia mecánica, tenacidad, dureza y elasticidad, etc., aumenten o disminuyan en el material final (Callister, 2007).

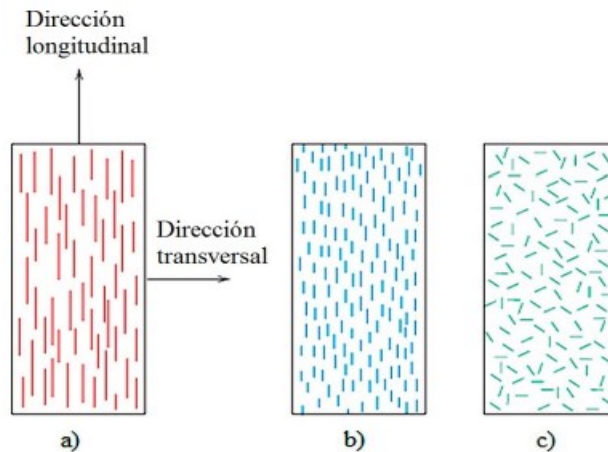


Figura 1.4 Orientación de fibras: (a) continuas longitudinales, (b) discontinuas longitudinales, (c) cortas orientadas al azar

(Fuente: Callister, 2007)

1.4.5 Fabricación de un material compuesto

El proceso de fabricación de materiales compuestos es de vital importancia para la obtención de los productos y elementos que se requieren en la industria. En un material compuesto entre el 50 y el 60% del costo total del elemento representa la etapa de fabricación (F. Levy, 2006), por lo que, se debe elegir el proceso de fabricación más adecuado con el fin de obtener los mejores resultados al menor costo. Esta etapa depende de factores tales como:

- Tipo de matriz.
- Tipo y forma del refuerzo.
- Aplicación del elemento.
- Condiciones del proceso de fabricación, sus ventajas y limitaciones.

(Fuente: P. Pontón, 2011)

Algunos de los procesos para fabricación de materiales compuestos más utilizados con materiales de matrices termoplásticas y termoestables son:

- Estratificación manual.
- Moldeo por aspersion.
- Inyección.
- Moldeo por compresión.
- Estratificación de preimpregnados.

(Fuente: P. Pontón, 2011)

1.4.6 Tipos de fabricación

Estratificación manual

Se conoce como hand lay-up (Figura 1.5), y es uno de los métodos de fabricación más empleados debido a que es un proceso relativamente barato. Este proceso es empleado mayormente para fabricar materiales compuestos de matriz polimérica a temperatura ambiente, con resinas como la epoxy, fenólica y poliéster. La resina debe ser un monómero reactivo que forme entrecruzamientos entre las cadenas poliméricas durante el proceso de curado. Las fibras se pueden emplear en forma de tejidos y no tejidos con orientación definida u orientadas al azar. Normalmente los refuerzos se adicionan en un máximo de 40% en volumen. El proceso consta de los siguientes pasos:

- Se aplica un agente desmoldante sobre la superficie a trabajar.
- Se aplica una capa de la matriz con brocha o rodillo sobre el elemento base y se deja curar. Se puede aplicar gelcoat para conseguir un acabado brillante y proteger de la humedad.
- Luego de cierto tiempo se coloca el refuerzo sobre la matriz y se aplica la resina catalizada sobre cada capa de refuerzo y se pasa el rodillo para evitar el aire atrapado en la superficie.



Figura 1.5 Proceso hand lay up

(Fuente: P. Pontón, 2011)

Moldeo por aspersion

Es un proceso similar al de estratificación manual, con la diferencia de que se utiliza una pistola de aspersion para poder depositar la fibra corta y la resina al mismo tiempo sobre la superficie base (Figura 1.6). Este proceso no emplea presión o altas temperaturas por lo que es muy utilizado para compuestos de matriz de resina poliéster en el que se utiliza un

porcentaje en volumen del refuerzo máximo de 40%. Se aplica gelcoat para dar un brillo y protección a los elementos fabricados y elementos de relleno como el carbonato de calcio con el fin de abaratar costos. El proceso es el siguiente:

- Se debe aplicar un agente desmoldante en el molde para evitar que se adhiera el material compuesto.
- Se aplica gelcoat para proteger y mejorar el acabado final dejando curar a temperatura ambiente.
- Mediante el uso de la pistola de aspersión se aplica la matriz y el refuerzo simultáneamente manteniendo el espesor del componente uniforme.
- Se utiliza un rodillo para reducir la acumulación de aire sobre la superficie.
- Se emplea un atomizador de forma alternada con el tejido de refuerzo para lograr una mayor resistencia.
- Se deja curar el material una vez terminado el proceso a temperatura ambiente durante un tiempo de 2 a 4 horas.



Figura 1.6 Proceso de moldeo por aspersión

(Fuente: P. Pontón, 2011)

Inyección

En este proceso el material polimérico se encuentra fundido dentro de la máquina, y viaja internamente hasta un molde cerrado en donde es inyectado y toma la forma definida por el molde. Se aplica principalmente en polímeros y matrices termoplásticas con un porcentaje máximo en volumen de refuerzo del 25%. Este proceso es utilizado con resinas termoplásticas como polipropileno, polietileno, nylon, entre otras (Figura 1.7).

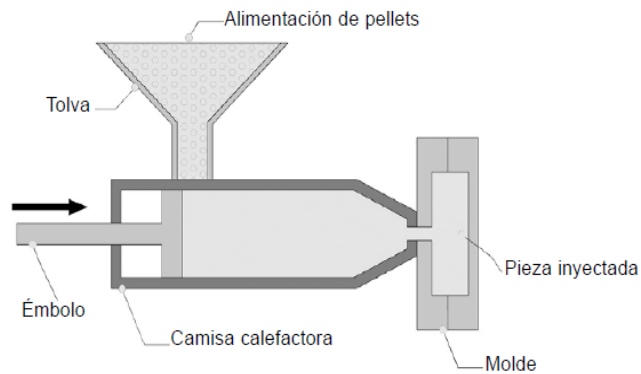


Figura 1.7 Proceso de inyección

(Fuente: P. Pontón, 2011)

Moldeo por compresión

Es un proceso bastante conocido y utilizado para la fabricación de materiales compuestos (Figura 1.8), que emplea un molde, generalmente metálico, compuesto de un macho y una hembra, para que una vez pre impregnada la fibra con la matriz dentro de la hembra se pueda aplicar presión a través del macho y compactar la mezcla. Este proceso se puede aplicar a materiales termoplásticos y termoestables y el contenido máximo de fibra en volumen es de 30%. Los pasos para el proceso de moldeo por compresión son los siguientes:

- Se colocan láminas de fibra y polímeros termoplásticos con una orientación específica en el molde, que debe estar previamente encerado con un agente desmoldante.
- Se cierra el molde y se coloca en la prensa de calefacción, para ser sometido a la presión de moldeo para que los materiales empiecen la etapa de unión.
- Se espera un tiempo estimado sin dejar de presionar los materiales hasta que estos se hayan solidificado por completo.
- Se retira el elemento del molde.



Figura 1.8 Proceso por compresión

(Fuente: P. Pontón, 2011)

Estratificación de preimpregnados

Es un proceso en el cual las fibras se pueden usar en forma de tejido o de manera alternada y se emplea con polímeros termoplásticos o termoestables. Este proceso permite la obtención de un material compuesto con un porcentaje en volumen de refuerzo más preciso por lo que se ahorra material (máximo de 60% en volumen de refuerzo). En este proceso se trabaja a la temperatura de fusión de los polímeros y su ciclo de curado es bastante rápido por lo que se puede trabajar con procesos de recubrimiento por fusión en caliente y apilamiento de láminas alternando la fibra y matriz por deposición electrostática (Figura 1.9), donde los polímeros están en forma de polvo y, por impregnación de solvente se reduce la viscosidad de la resina para que la fibra se sumerja en la misma por fusión en caliente.

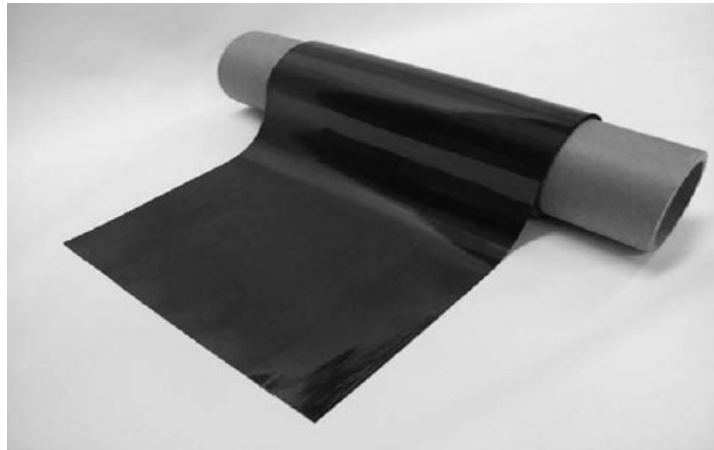


Figura 1.9 Proceso de estratificación de preimpregnados

(Fuente: P. Pontón, 2011)

1.4.7 Propela

En un dron un elemento fundamental para el despegue, movimiento y aterrizaje es la propela o propela la cual, se caracteriza por proporcionar la fuerza de empuje que hace que el dron se eleve (Figura 1.10). En el aeromodelismo este movimiento se conoce como aumento de energía cinética en el aire de la atmósfera y es el que proporciona el movimiento angular a las propelas. El flujo de aire genera una corriente de energía que crece a medida que la presión incrementa al atravesar el área de la propela. En una propela las fuerzas principales que gobiernan son las fuerzas de torque y empuje que son las variables principales en su diseño; es así como, el empuje se puede utilizar para comparar y conocer la eficiencia de éstas.



Figura 1.10 Propela de dron e dos aspas

(Compra drones, 2018)

Características de la propela

Una propela está expuesta a un flujo que provoca su movimiento y debido a su geometría presenta una distribución de presiones sobre toda su superficie siendo mayores en la parte superior de la superficie. Este fenómeno provoca una fuerza de empuje que proporciona el movimiento a la propela y empieza el giro. En las propelas esta fuerza es muy importante pues con el aumento de la velocidad, la propela puede experimentar cambios en el aspecto aerodinámico por lo que es importante tomar en cuenta las variables que deben existir para que una propela trabaje de forma ideal.

En la Tabla 1.4 se pueden observar las especificaciones técnicas de una propela estándar 12X6 APC (APC, 2018).

Tabla 1.4 Especificaciones técnicas de propela APC 12x6 EP

Especificaciones técnicas	
Propela	APC 12x6EP
V [m/s]	20.000
J (relación de avance de propela)	11000.000
Empuje	0.159
Ct (coeficiente de tracción)	0.092
Cp (coeficiente de potencia)	0.043
PWR (potencia) [W]	846.000
Torque [Nm]	0.733
Empuje [N]	33.125

(Fuente: APC, 2018)

Métodos de fabricación de propelas para UAV

Los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) han sido tendencia en la ingeniería en la última década, motivo por el cual, la demanda de propelas de repuestos también aumento. Existen varios métodos de fabricación que se han desarrollado, tales como:

- Impresión 3D: para fabricar una propela comercial para drones UAV se utiliza un programa de diseño (CAD) para después importar el diseño y fabricar mediante impresión 3D. A menudo este método de fabricación se utiliza con materiales termoplásticos como por ejemplo el P400 ABS y el Duraform HS. En la Figura 1.11 se puede observar el diseño y fabricación de una propela de 4 aspas. Estos materiales suelen presentar alta durabilidad y buenas propiedades mecánicas durante las operaciones de vuelo.

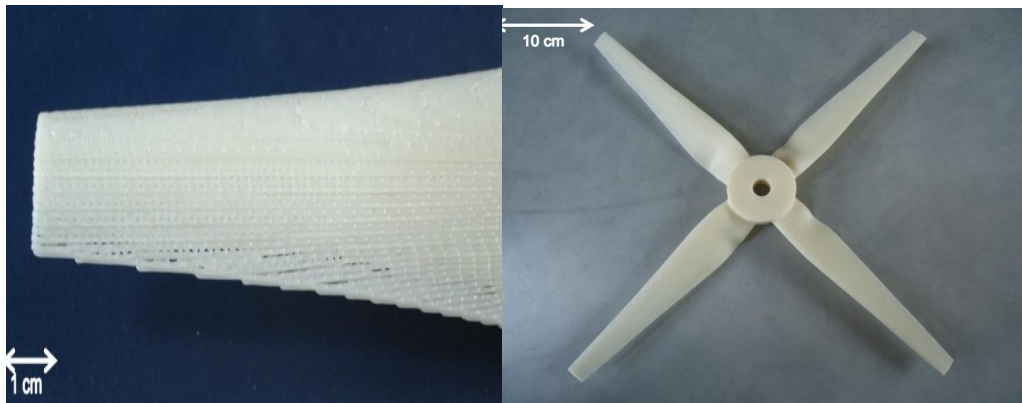


Figura 1.11 Fabricación de propela de 4 aspas mediante impresión 3D

(fuente: Rutkay, 2016)

- Maquinado manual: en un principio las propelas eran de madera y fabricadas artesanalmente a mano mediante tornos, cortadoras, talladoras entre otras herramientas (Figura 1.12). Este proceso se realizaba para propelas de gran tamaño que por lo general se utilizaban en aviones tripulados. Debido a que los UAV requieren propelas con geometrías más pequeñas y de materiales más resistentes, el maquinado manual dejó de ser una opción para estos modelos ya que existen nuevos métodos de fabricación.



Figura 1.12 Maquinado manual de una propela de dos aspas

(Fuente: Bertorelli. P, 2019)

- Maquinado por el método de CNC: el proceso de maquinado asistido por computadora es bastante utilizado debido a que permite fabricar propelas de diversos tamaños con geometrías de gran complejidad. El proceso se realiza mediante el modelado de la propela en software de diseño (SolidWorks, Inventor, AutoCAD, etc.). Una vez obtenido el modelo se procede a simular las operaciones de maquinado en un software CAM que genera los códigos de programación que van a ser ingresados en la máquina CNC y se procede a la fabricación de la propela (Figura 1.13).

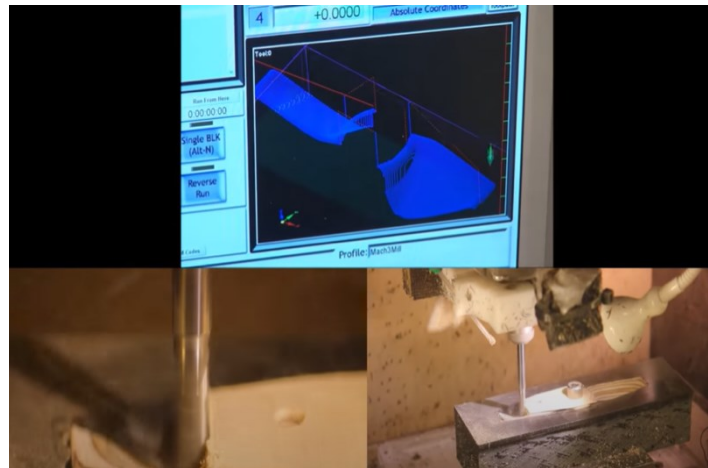


Figura 1.13 Proceso de modelado de propela mediante maquinado CNC

(Fuente: Protocorner, 2014)

- Fabricación por molde de inyección: es el principal método utilizado para la fabricación de propelas y propelas de drones y UAVs a nivel mundial. Este proceso se realiza empleando un molde cerrado usualmente metálico (Figura 1.14), que se coloca dentro de la máquina para que el material fundido ingrese en él y formar la propela luego de un intervalo de tiempo al ser abierto obteniéndose el elemento final.

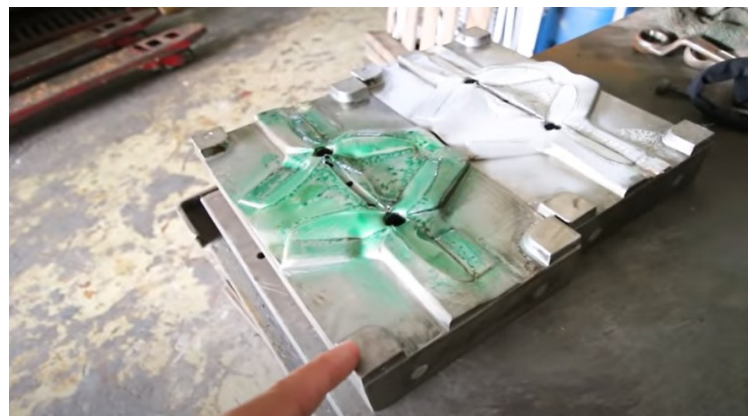


Figura 1.14 Molde de inyección de una propela de 3 aspas

(Fuente: Flyers District, 2018)

- Fabricación por compresión: este proceso se realiza con un molde macho – hembra que va a contener el material que va a ser utilizado. En la industria este proceso se emplea cuando se requiere propelas de material compuesto. A diferencia de las propelas fabricadas por el método CNC en este método lo que se requiere es fabricar un molde con el perfil de la propela que al ser sometido a una carga de compresión moldee el material contenido en él (Figura 1.15).



Figura 1.15 Fabricación de propela por compresión

(Fuente: LeGault. M, 2020)

1.4.8 Túnel de viento

El túnel de viento es una cámara con aire en movimiento que permite estudiar cuales son los efectos de éste en un objeto (Figura 1.16), por lo que su uso ayuda a determinar y seleccionar las mejores características de las propelas mediante pruebas en condiciones simuladas de vuelo y conocer su comportamiento, así como para realizar el diseño, optimización y configuración de propelas más eficientes. En el túnel de viento se pueden realizar pruebas de vibración, de nivel de ruido, empuje estático de propelas, ensayos de fatiga con cargas cíclicas y comparación de ángulos de ataque y de eficiencia entre dos o más propelas (Robotics. T, 2020).

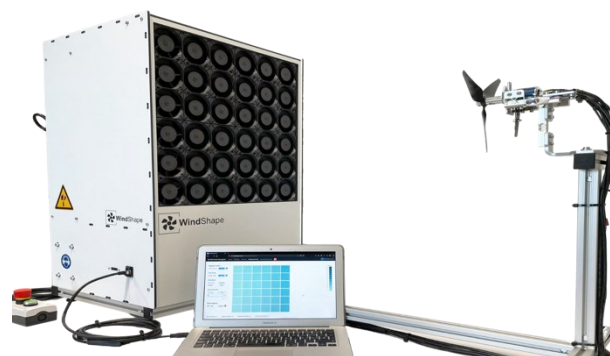


Figura 1.16 Túnel de viento subsónico

(Fuente: Robotics. T, 2020)

2 METODOLOGÍA

El trabajo de elaboración y análisis de una propela fabricada con material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibra natural consta de tres etapas. En la primera etapa se realiza la selección tanto de la matriz como del refuerzo a emplearse en la elaboración del material compuesto que, al tratarse de una comparación, se toma como referencia los materiales empleados en el estudio realizado por Rivera J., 2022 y se selecciona el material compuesto que obtuvo los mejores resultados. Una vez determinado el material compuesto se procedió a realizar varias pruebas para su obtención, así como para realizar el diseño mecánico y mecanización de la propela.

En la segunda parte se procedió con la manufactura de la propela mediante mecanizado CNC. En este proceso fue necesario considerar las condiciones de operación a las cuales iba a ser sometida la máquina, tomando en cuenta que el elemento fue mecanizado en dos pasos. El primer paso incluyó el diseño y fabricación de una base de aluminio que soportara la propela y el ingreso del código de programación en la máquina CNC para proceder tanto con la maquinación de la base para soportar la propela, así como una de sus caras en el material compuesto. En el segundo paso se utilizó la base de aluminio para soportar la propela sobre su cara maquinada y efectuar el maquinado en su segunda cara para finalizar el proceso de fabricación de la propela. Durante este proceso se debe fijar correctamente el material compuesto contra la base de aluminio para evitar, en lo posible, fallas en el maquinado del material.

En la tercera parte se lleva a cabo las pruebas de funcionalidad y operación de la propela con el fin de validar los resultados obtenidos con la simulación realizada por Rivera J., 2022 para posteriormente proceder al análisis de resultados y finalización del trabajo.

La Figura 2.1 muestra el diagrama del procedimiento establecido para la realización de este trabajo de integración curricular.

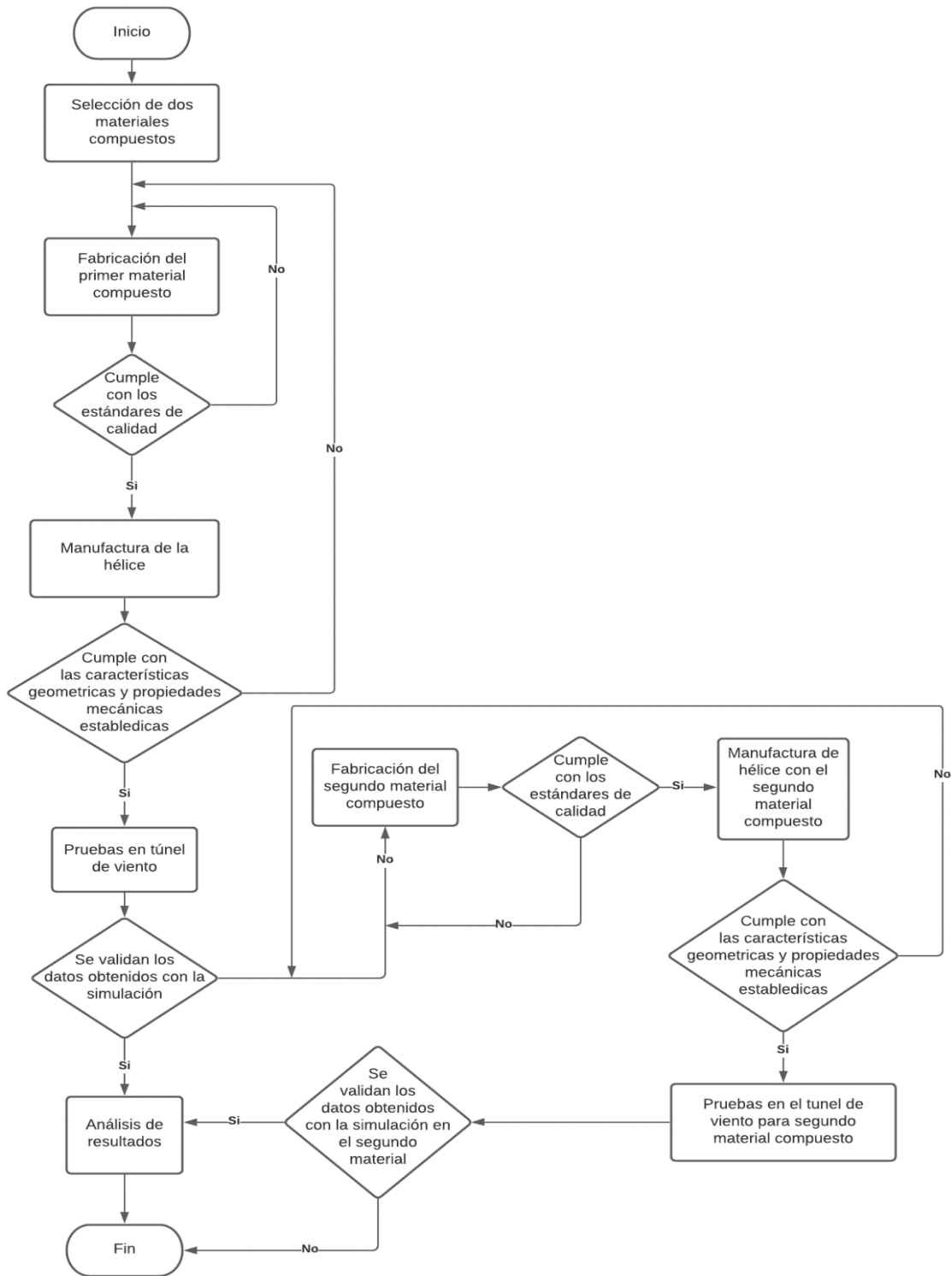


Figura 2.1 Metodología

(Fuente: Propia)

2.1 Fabricación de la propela

2.1.1 Dimensiones de Propela

Las propelas comerciales pueden ser seleccionadas de acuerdo con sus características geométricas, físicas e incluso propiedades mecánicas. En la APC (Advance Precision Composites), existen varios modelos de propelas que son utilizadas en el aeromodelismo, pues las distintas aplicaciones que existen en el mercado actual exigen que los UAV dispongan de propelas de alta calidad y que se puedan reemplazar. Para este trabajo se obtienen las dimensiones geométricas de la propela APC 12x6 EP de la Tabla 2.1 y con éstas se realiza el diseño del molde.

Tabla 2.1 Especificaciones geométricas de propela APC 12x6 EP

Características geométricas	
Paso [in-mm]	6.000 – 152.400
Diámetro de propela de punta a punta [in-mm]	12.000 – 304.800
Diámetro de cubo [in-mm]	1.000 – 25.400
Grosor de cubo [in-mm]	0.480 – 12.192
Diámetro de eje [in-mm]	0.250 – 6.350
Espesor de aspa [in-mm]	0.078 – 2.000
Peso [oz-g]	1.620 – 45.930

(fuente: APC, 2018)

2.1.2 Geometría base

Con base a los parámetros presentados en la Tabla 2.1, se determina las dimensiones necesarias para diseñar y fabricar la base que va a contener el material compuesto. Este proceso se realiza mediante el diseño de la propela APC 12x6 EP en SolidWorks (Figura 2.2).

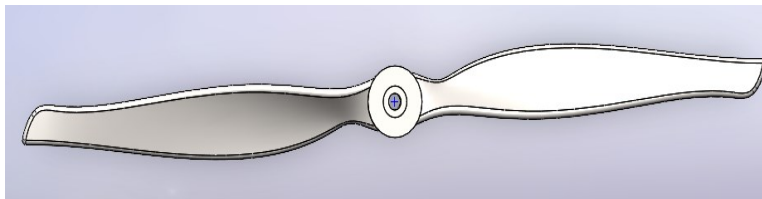


Figura 2.2 Diseño preliminar de propela APC 12x6 EP

(Fuente: Propia)

En relación con el modelo de la Figura 2.2, se dimensiona un perímetro sobre toda la superficie. Para esto, se debe tomar en cuenta que durante el maquinado la cantidad de material desbastado sea mínima. Por lo que, a partir de la vista frontal de la propela en el software, se realiza un diseño rectangular de 400x40 [mm] como se puede observar en la Figura 2.3.

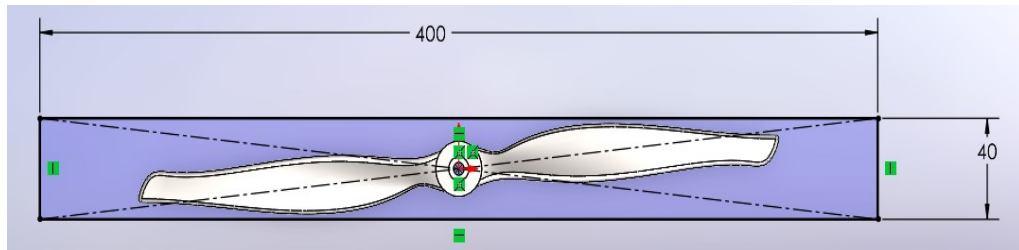


Figura 2.3 Diseño para base metálica

(Fuente: Propia)

2.1.3 Diseño de base para molde

Para el diseño se consideró un molde macho – hembra, utilizado en varios modelos de fabricación de elementos termoplásticos y termoestables, que sea desmontable para facilitar la separación del material compuesto. Adicionalmente, se tomó en cuenta que los elementos a fabricar sean de fácil obtención y que puedan ser reemplazados si alguno llegara a fallar. La geometría de la cavidad interior del molde debe ser de 400x40 [mm] con una profundidad de 25.4 [mm] o 1 pulgada ya que se debe considerar que el espesor de las aspas de la propela comercial está entre 2 a 5 [mm] y el espesor del cubo suele ser de 15 [mm] (APC, 2018). El modelo final diseñado en el software y el molde final fabricado se puede observar en la Figura 2.4:



Figura 2.4 Modelado en SolidWorks y obtención final de molde fabricado

(Fuente: Propia)

2.2 Proceso de fabricación de molde de material compuesto

2.2.1 Selección de material compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra de yute orientada al azar

Para la selección del material compuesto se toma en cuenta la simulación realizada por Rivera J., 2022, de donde se obtienen los valores de esfuerzos de Von Mises, límite elástico y factor de seguridad (Tabla 2.2). Estos resultados se validan mediante el criterio estructural que establece que el esfuerzo de Von Mises debe ser menor al esfuerzo permisible (Echavarría, 2021).

Tabla 2.2 Resultados de simulación de Propela APC 12x6 EP

Nombre	Valor
Esfuerzo von mises [MPa]	10.785
Factor de seguridad	2.550
Límite de elástico [MPa]	27.57

(Fuente: Rivera J., 2022)

Como se observa en la Tabla 2.2, el límite elástico máximo que existe en una propela APC 12x6 EP de aluminio para los parámetros establecidos es 27.574 [MPa] y el esfuerzo de Von Mises máximo en la simulación es 10.785 [MPa]; con lo cual, la selección del material compuesto se realiza con base a un rango mayor al esfuerzo de Von Mises y menor al límite elástico de la propela.

A partir de estos valores se realizó una recopilación bibliográfica sobre diferentes materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de yute, tomando en cuenta que la propela va a ser sometida a cargas de tracción y flexión por la forma en la que interactúa con el fluido se necesita un material compuesto isotrópico, es decir, que sus propiedades sean las mismas en cualquier dirección, por lo que la fibra de yute debe ser corta y orientada aleatoriamente dentro de la matriz. De acuerdo con los trabajos investigados, se determinó que el proyecto de (Gowda. K, 2018) “*Study of Mechanical Characteristics of Banana and Jute Fiber Reinforced Polyester Composites*” cumple con los parámetros para replicar el material compuesto.

El documento presenta la caracterización mecánica de dos diferentes fibras naturales: la fibra de yute y fibra de banano como refuerzos combinados con una matriz poliéster. Las fibras son de 10 [mm] de longitud, orientadas aleatoriamente para proporcionar el comportamiento isotrópico al material con proporciones de 5, 10, 15, 20 y 25. Los resultados

en ensayos de tensión y flexión para la fibra de yute que se realizaron en el documento consultado y los resultados obtenidos en la simulación se comparan en la Tabla 2.3:

Tabla 2.3 Comparación de resultados investigados para la elaboración de un material compuesto de fibra de yute de matriz poliéster.

Carga de simulación Limite elástico [MPa]	Esfuerzo de tensión [MPa]			Esfuerzo de flexión [MPa]		
	Proporciones [%]	Espesores de placa		Proporciones [%]	Espesores de placa	
		3 [mm]	5 [mm]		3 [mm]	5 [mm]
27.570	5.000	17.090	10.680	5.000	15.750	12.120
	10.000	22.490	14.930	10.000	26.160	21.900
	15.000	23.450	16.590	15.000	42.510	24.870
	20.000	35.150	24.880	20.000	55.890	41.230
	25.000	43.940	39.280	25.000	53.650	38.150

(Fuente: modificado de Gowda. K, 2018)

En la tabla anterior se puede observar que el material compuesto con las mejores propiedades mecánicas es el que contiene proporciones de refuerzo de entre 20 y 25% de yute. Por lo que, para garantizar la mejor combinación de propiedades, se decide replicar el material 20% de refuerzo de fibra de yute y espesor de 5 [mm].

2.2.2 Análisis de composición del material compuesto a fabricar

Durante esta etapa se toma en cuenta todos los materiales a utilizar y las proporciones obtenidas de (Gowda. K, 2018) para la fabricación del material compuesto (Tabla 2.4).

Tabla 2.4 Materiales para elaborar el material compuesto.

Material	Proporción
Fibra de yute	20%
Resina Poliéster	80%
Materiales que se restan del porcentaje de resina poliéster.	
Estireno	11%
Octoato de cobalto	1%
MEKP	1%

(Fuente: modificado de Gowda, 2018)

La resina poliéster (matriz) ocupa mayor volumen en el material compuesto, a esta se agrega estireno al 11% para reducir su viscosidad y garantizar la interacción entre refuerzo y matriz. Se adiciona octoato de cobalto al 1% para así acelerar el proceso de secado al iniciar la reacción. De la misma forma, se añade MEKP (peróxido de metiletilcetona) al 1% para que actúe como catalizador de la mezcla y de inicio la reacción.

2.2.3 Cálculos de proporciones para el material compuesto

En relación con las dimensiones establecidas en el apartado (2.1.1), se tiene un volumen de 406.400 [mm³] volumen con el cual se pueden determinar las cantidades necesarias de matriz poliéster, estireno, octoato de cobalto y MEKP:

Densidad de yute = 1300 [g/l]

Densidad de poliéster = 1100 [g/l]

Volumen de molde = 0.4064 [l]

Cálculo de la proporción de fibra de yute a utilizarse en la fabricación del material compuesto:

$$p_{yute} = \rho_{yute} \times V_{molde} = 1300 \left[\frac{g}{l} \right] \times 0.4064 [l] = 528.32 [g]$$
$$\rightarrow \%p_{yute} = 20\% \times 528.32 [g] = 105.66 [g]$$

Ecuación 2.1

Cálculo de la proporción de resina poliéster a utilizarse en la fabricación del material compuesto:

$$p_{resina} = \rho_{resina} \times V_{molde} = 1100 \left[\frac{g}{l} \right] \times 0.4064 [l] = 447.04 [g]$$
$$\rightarrow \%p_{resina} = 80\% \times 447.04 [g] = 357.63 [g]$$

Ecuación 2.2

Cálculo de la proporción de estireno a utilizarse en la fabricación del material compuesto:

$$p_{estireno} = 11\% \times p_{resina} = 11\% \times 357.63 [g] = 39.33 [g]$$

Ecuación 2.3

Cálculo de la proporción de octoato de cobalto a utilizarse en la fabricación del material compuesto:

$$p_{octoato} = 1\% \times p_{resina} = 1\% \times 357.63 [g] = 3.6 [g]$$

Ecuación 2.4

Cálculo de la proporción de MEKP a utilizarse en la fabricación del material compuesto:

$$p_{MEKP} = 1\% \times p_{resina} = 1\% \times 357.63[g] = 3.6[g]$$

Ecuación 2.5

El resumen de los cálculos se observa en la Tabla 2.5

Tabla 2.5 Proporciones finales para molde de material compuesto.

Material	Proporción en gramos
Fibra de yute	105.660
Resina poliéster	357.630
Estireno	39.330
Octoato de cobalto	3.600
MEKP	3.600
Cantidad final de resina poliéster	311.100

(Fuente: Propia)

2.2.4 Fabricación de molde de material compuesto

En primer lugar, se aplica cera desmoldante sobre todos los elementos que conforman el molde para después ensamblarlo (Figura 2.5).



Figura 2.5 Placa metálica armada

(Fuente: Propia)

Luego se procede a pesar los materiales con una balanza con apreciación de dos decimales para obtener las proporciones exactas (Figura 2.6).

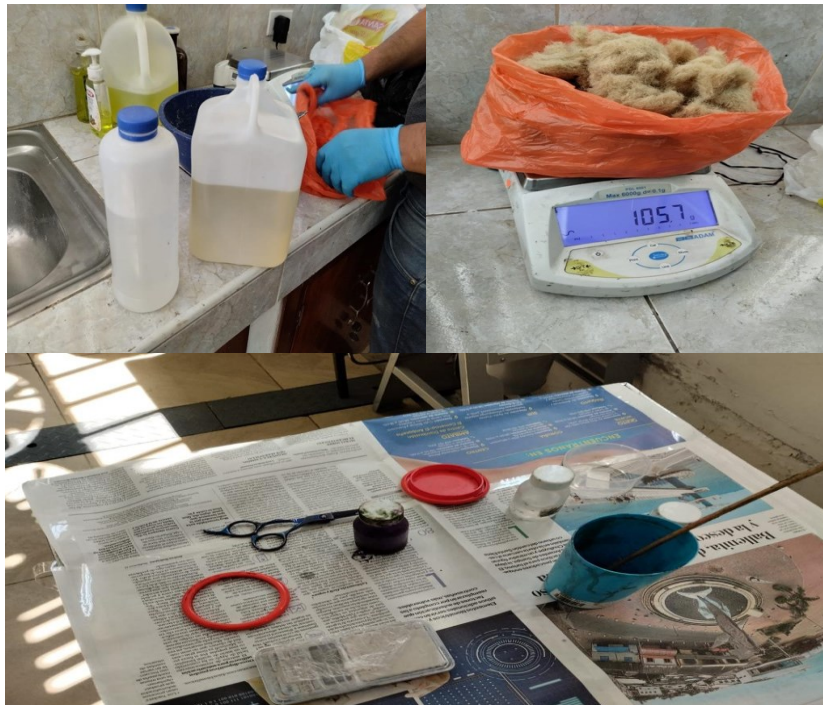


Figura 2.6 Medición de materiales para elaboración de material compuesto
(Fuente: Propia)

Una vez pesados todos los componentes, se procede a mezclar el estireno con la resina poliéster para reducir su viscosidad. Durante este proceso se debe evitar la formación de burbujas ya que esto provocaría vacíos durante la etapa de secado (Figura 2.7).



Figura 2.7 Mezcla de resina con estireno
(Fuente: Propia)

Se añade el octoato de cobalto a la mezcla anterior hasta que ésta tome una tonalidad rosada o púrpura (Figura 2.8).

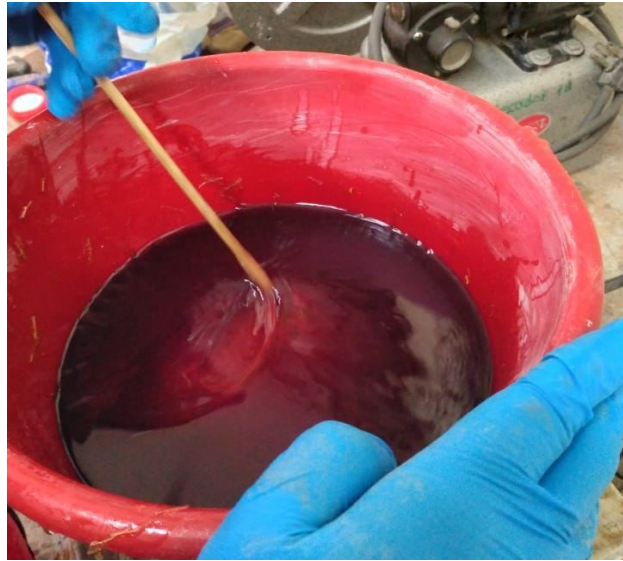


Figura 2.8 Mezcla de solución con octoato de cobalto

(Fuente: Propia)

De la misma forma, se agrega el MEKP evitando la formación de burbujas obteniéndose una tonalidad marrón o café en la mezcla (Figura 2.9).



Figura 2.9 Mezcla de solución con MEKP

(Fuente: Propia)

Una vez combinados todos los elementos con el MEKP empezará la reacción. Por lo que, se debe colocar la fibra de yute sobre la solución e integrar de manera uniforme para garantizar una correcta integración entre fibra y matriz. Durante la integración de la mezcla en la base se debe llenar todos los espacios huecos evitando la formación de burbujas.

Posteriormente, se coloca la mezcla sobre el molde metálico y se aseguran las placas para luego colocarlo en la prensa mecánica y someterlo a una carga de compresión de 1000 psi durante 1 hora (Figura 2.10).



Figura 2.10 Prensa mecánica

(Fuente: Propia)

Para garantizar el resultado se esperó 5 días para desmoldar el material obteniéndose lo observado en la Figura 2.11.

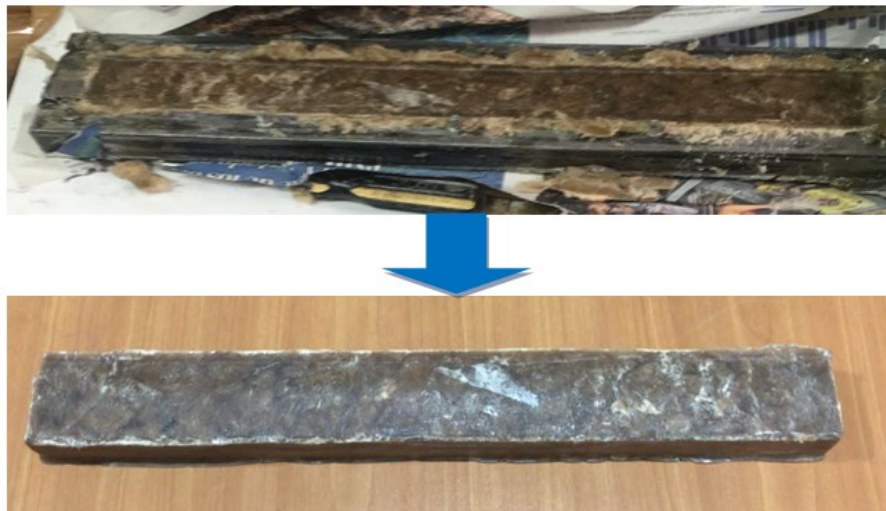


Figura 2.11 Molde de material compuesto final

(Fuente: Propia)

2.3 Proceso de fabricación por CNC

Para la fabricación de la propela por CNC, es necesario que el material permanezca estático durante el maquinado para evitar choques con la superficie de la herramienta de desbaste, es por esto que el proceso se realiza cara por cara y empleó la base que soportó la primera cara maquinada durante la operación de corte de la segunda cara.

2.3.1 Diseño y fabricación de molde de la propela

En primer lugar, se diseña una base con el perfil de una de las caras de la propela en SolidWorks (Figura 2.12) para inmovilizar la propela durante el maquinado de la segunda cara. Este elemento debe tener bordes interiores con radio de 1.5 [mm] de redondeo para evitar que la pieza se atasque al retirarla, ya que la herramienta de corte no puede realizar vértices rectos por la geometría de la propela; la profundidad de la cavidad es la mitad del espesor de la propela.

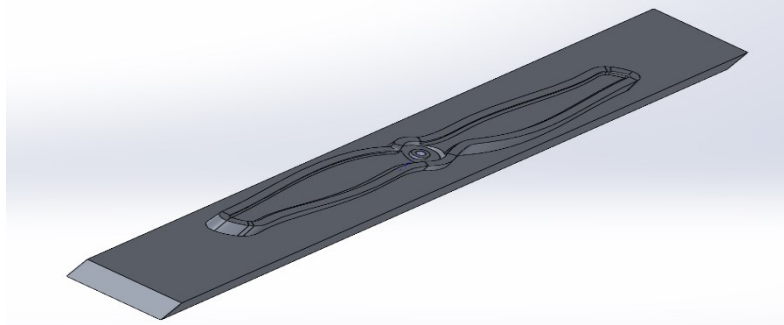


Figura 2.12 Diseño de base de aluminio de propela en SolidWorks

(Fuente:Propia)

Una vez obtenido el diseño se solicitó al Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica la fabricación de un lingote de aluminio de 500x60x30 [mm] (Figura 2.13), mientras simultáneamente se realizó la programación en código G para el maquinado CNC mediante la utilización del software Solid CAM. Este proceso se llevó a cabo con la colaboración del Ing. Javier Valverde, especialista en diseño y fabricación de elementos mecánicos del Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

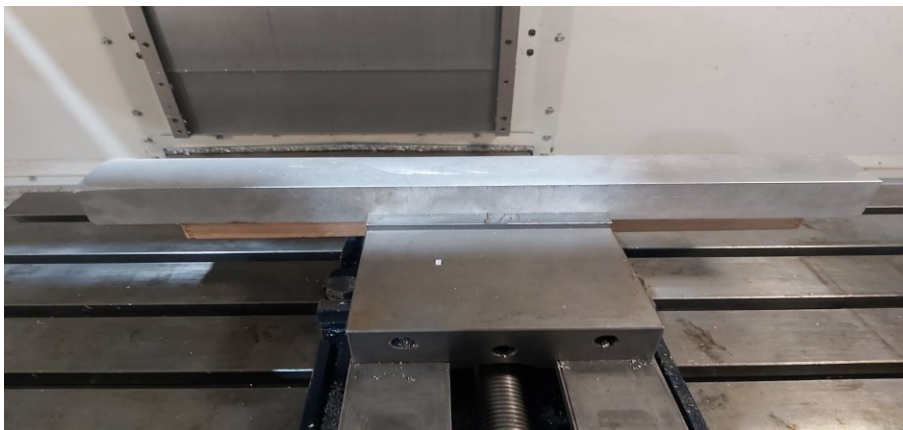


Figura 2.13 Lingote de aluminio

(Fuente:Propia)

Para garantizar el acabado del molde y obtener una mejor superficie se utilizó las siguientes herramientas (Tabla 2.6):

Tabla 2.6 Herramientas de corte para fresadora CNC.

Herramienta	Diámetro de herramienta [mm]
Broca HSS	5.000
Fresa de desbaste recta HSS	10.000
Fresa de desbaste recta HSS	6.000
Fresa de acabado redondo carburo HKS	6.000
Fresa de acabado redondo carburo HKS	3.000

(Fuente: Propia)

El desbaste del lingote de aluminio tardó alrededor de 6 horas y se utilizó refrigerante para evitar que la herramienta se sobrecaliente (Figura 2.14).



Figura 2.14 Proceso de desbastado de lingote de aluminio

(Fuente: Propia)

En cuanto finaliza el desbaste se realiza un cambio de herramientas para proceder con el acabado superficial de la pieza con las fresas de punta redonda (Figura 2.15).

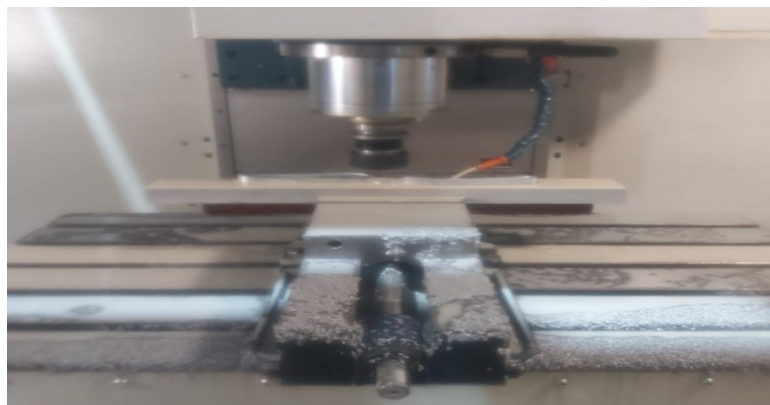


Figura 2.15 Proceso de acabado en lingote de aluminio

(Fuente: Propia)

Una vez finalizado el maquinado se limpió la pieza, y se pudo observar la existencia de porosidades en el aluminio, defectos que no afectan al proceso de obtención de la propela (Figura 2.16).



Figura 2.16 Molde final de aluminio: base de la propela

(Fuente: Propia)

2.3.2 Prueba de maquinado de propela en placa de madera

Para el maquinado de la propela se realizó una prueba en una barra de madera con el objetivo de garantizar la obtención de ésta (Figura 2.17) al verificar el código de programación de la CNC.



Figura 2.17 Prueba en lingote de madera

(Fuente: Propia)

Una vez finalizado el proceso de mecanizado, se obtiene la propela de prueba (Figura 2.18) comprobando la validez de la programación, pero aumentando el tiempo de acabado para obtener una superficie más lisa (proceso de prueba disponible en el Anexo I).



Figura 2.18 Obtención final de prueba de mecanizado de propela en madera

(Fuente: Propia)

2.3.3 Proceso de maquinado primera cara de propela

En el Taller de Máquinas Herramientas el lingote de material compuesto es encuadrado para posteriormente ser fijado a la mesa de trabajo de la CNC. Después se adaptan las herramientas de corte en el portaherramientas y finalmente se ingresan los códigos de programación para que inicie la operación de desbastado de la primera cara de la propela (Figura 2.19).



Figura 2.19 Proceso de mecanizado de lingote de material compuesto

(Fuente: Propia)

El desbastado se realiza en aproximadamente 5 horas con fresas de punta recta para eliminar el material en bruto y conformar la pieza (Figura 2.20), para proporcionar el acabado se cambia la herramienta por una fresa de punta redonda y se obtiene la primera cara de la propela.



Figura 2.20 Mecanizado de primera cara de propela de material compuesto

(Fuente: Propia)

2.3.4 Proceso de maquinado segunda cara de propela

En esta etapa se realizó la preparación del molde de aluminio que va a soportar la propela (Figura 2.21). En primer lugar, se hizo el roscado de 5 [mm] de diámetro en el centro del molde de aluminio para sujetar la propela y se cubrió la superficie con cera desmoldante para facilitar el desprendimiento de la propela.



Figura 2.21 Preparación de molde de aluminio de propela

(Fuente: Propia)

Se acopla la propela en el molde de aluminio con un tornillo de 5 [mm] para fijarla y proceder al mecanizado (Figura 2.21) de la segunda cara de la propela. Este proceso tarda alrededor de 10 horas debido a la disminución de la velocidad de paso de la herramienta y al incremento del número de pasadas para evitar fractura en el material como sucedió en pruebas anteriores. (Ver Anexo II).



Figura 2.22 Proceso de mecanizado de segunda cara de propela

(Fuente: Propia)

Al finalizar el proceso de mecanizado, se limpia la superficie del material y se retira el tornillo, obteniéndose la propela de material compuesto que se observa en la Figura 2.23.



Figura 2.23 Obtención de propela de matriz poliéster reforzada con fibra de yute

(Fuente: Propia)

2.4 Pruebas de propela en el túnel de viento

En esta etapa se evaluó la resistencia de la propela para verificar si cumple con las exigencias de una propela comercial y así comparar con los resultados de Rivera J., 2022. Para esto se utilizó el “banco de pruebas para un sistema de propulsión de un UAV de ala fija enfocado a la realización de ensayos de consumo de energía” desarrollado por (Hernández & Nandar, 2021) y el túnel de viento abierto del INAMHI (Instituto Nacional de Metrología e Hidrología) en la ciudad de Quito, Ecuador.

2.4.1 Calibración del banco de pruebas del sistema de propulsión de un UAV.

El banco de pruebas, desarrollado por Hernández & Nandar, 2021 proporciona datos de corriente, voltaje, potencia, RPM, velocidad de viento, empuje y eficiencia del sistema que son importantes para escoger un buen sistema de propulsión (propela y motor). El presente trabajo se enfocó en obtener los datos de velocidad del viento, RPM, empuje, torque y así poder determinar su eficiencia. Para esto se realizó una calibración de los equipos con el fin de garantizar la correcta obtención de datos en función de las especificaciones que se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Especificaciones de equipos para pruebas en propela APC 12x6 EP

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

(Fuente: Propia)

Se verifica que los sensores de velocidad de aire, empuje y, velocidad de motor marquen los valores de cero para proceder con las pruebas dentro del túnel de viento (Figura 2.24).

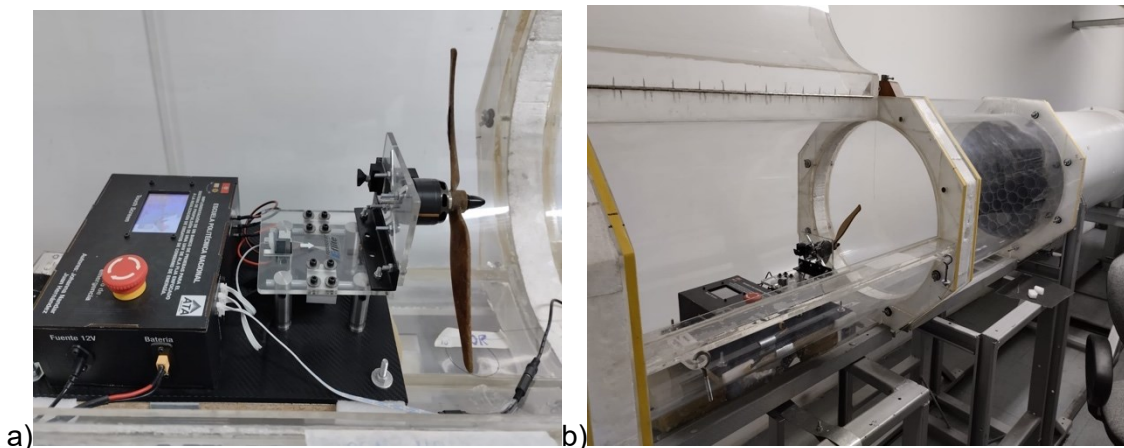


Figura 2.24 Proceso de pruebas: a) instalación sistema de propulsión. b) incorporación de sistema en el túnel de viento

(Fuente: Propia)

2.4.2 Balanceo de propela de material compuesto

El desbalance de una propela es una falla común que se puede presentar en propelas nuevas o usadas. Cuando una propela está desbalanceada, produce vibraciones perjudiciales que generan fisuras en la misma propela, fallas internas en el motor y en el drone.

Se sabe que una propela está desbalanceada cuando se coloca en un eje y no se mantiene en equilibrio. El desbalance se debe a una diferencia de masa en las aspas por defecto de fabricación o por acumulación de residuos durante su operación. Existen varias formas de

balancear una propela, por medio de una lija para igualar el peso de las aspas, mediante la aplicación de limpiador para eliminar residuos acumulados o por medio de la adición de cinta adhesiva.

Para la propela fabricada en material compuesto (Figura 2.25) se utilizó la cinta adhesiva que fue colocada en el lado con menos peso hasta lograr el equilibrio de la propela.



Figura 2.25 Balanceo de propela de material compuesto con cinta adhesiva (Taípe)
(Fuente: Propia)

2.4.3 Pruebas de la propela en el túnel de viento

Para la realización de pruebas en el túnel de viento, se colocó la propela de material compuesto en el eje del motor junto con la batería y sensores en cada uno de los puertos y se encendió el sistema. Después, se ejecutó el comando de control remoto para controlar el banco de pruebas mediante la computadora y se verificó que los sensores estén encendidos para comenzar las pruebas que fueron 3 para cada propela.

Se enciende el túnel de viento a una velocidad de 5 [m/s] y se varía el control de velocidad (Throttle) entre el 40% y el 60% mediante la computadora. No se emplean velocidades mayores debido al fallo que se produjo cuando se empleó un Throttle de 65% (8220 [RPM]) produciéndose la fractura (Figura 2.26) en la propela 1 (Anexo. IV).

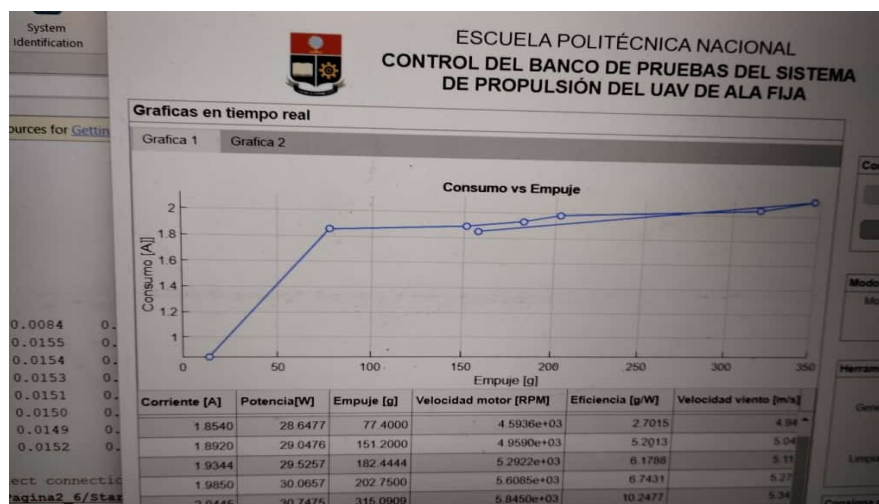


Figura 2.26 Obtención de datos mediante la aplicación de matlab App designer
(Fuente: Propia)

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de la propela de material compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra natural de yute sometida a un flujo controlado mediante el uso de un sistema de propulsión dentro de un túnel de viento. El análisis se enfoca en determinar si la propela resiste las condiciones de operación y si sus resultados son comparables con los resultados obtenidos en el proyecto TIC de Rivera J., 2022.

3.1.1 Obtención de eficiencia de propela

En el presente trabajo se aplicó las fórmulas de aerodelismo para propelas de drone (James D., 2022) para determinar la eficiencia de la propela de material compuesto, por otro lado, se utilizó la información proporcionada por la simulación de Rivera J., 2022 para obtener el torque de la propela sometida bajo ciertas condiciones de prueba. A continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas para obtener la eficiencia de la propela y así obtener los esquemas.

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

Ecuación 3.1

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

Ecuación 3.2

$$C_p = 2\pi \times C_Q$$

Ecuación 3.3

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

Ecuación 3.4

$$f_{propela} = \frac{C_T}{C_p} \times J$$

Ecuación 3.5

Donde:

D = diámetro de la propela [m]

ρ_{aire} = densidad del aire $1225 \frac{kg}{m^3}$

Q = torque de la propela [Nm]

T = empuje de la propela [N]

J = relación de radio de avance de la propela

C_p = coeficiente de potencia de la propela

C_T = coeficiente de empuje de la propela

C_Q = coeficiente de torque de la propela

n = velocidad angular de la propela (revoluciones por segundo) $\left[\frac{rev}{s}\right]$

Los cálculos correspondientes a la primera prueba de la propela 1 y de la propela 2 se muestran en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2. El resto de los datos de las pruebas efectuadas en las propelas están disponibles en el Anexo III.

Tabla 3.1 Datos obtenidos de la prueba 1 para la propela 1

Throttle [%]	Empuje [g]	Empuje [N]	RPM	W [rev/s]	Vair [m/s]	Q [N-m]	C_T	C_Q	C_p	J	$f_{propela}$ [%]
40.000	167.077	1.638	4916.600	81.943	4.900	0.170	0.023	0.008	0.049	0.196	9.173
45.000	186.900	1.833	5206.800	86.780	4.800	0.230	0.023	0.009	0.060	0.181	7.015
50.000	324.000	3.177	5553.600	92.560	5.100	0.280	0.035	0.010	0.064	0.181	9.951
55.000	366.450	3.594	5765.400	96.090	5.000	0.290	0.037	0.010	0.061	0.171	10.263
60.000	402.000	3.942	6129.000	102.150	5.200	0.440	0.036	0.013	0.082	0.167	7.259

(Fuente: Propia)

Tabla 3.2 Datos obtenidos de la prueba 1 para la propela 2

Throttle [%]	Empuje [g]	Empuje [N]	RPM	W [rev/s]	Vair [m/s]	Q [N-m]	C_t	C_q	C_p	J	$f_{propela}$ [%]
40.000	247.000	2.423	5016.200	83.603	4.700	0.190	0.033	0.008	0.053	0.184	11.410
45.000	249.000	2.443	5120.800	85.347	4.600	0.196	0.032	0.008	0.052	0.177	10.690
50.000	332.000	3.257	5623.500	93.725	4.800	0.250	0.035	0.009	0.055	0.168	10.618
55.000	345.000	3.384	5838.000	97.300	5.000	0.290	0.034	0.010	0.060	0.169	9.545
60.000	367.000	3.600	6320.000	105.333	5.100	0.430	0.031	0.012	0.076	0.159	6.452

(Fuente: Propia)

3.1.2 Análisis de resultados de graficas de empuje y eficiencia de propela.

Durante el desarrollo de las pruebas con las propelas de material compuesto existieron momentos al inicio o al final del proceso, en donde el sistema de propulsión perdía estabilidad de forma inesperada debido a defectos de fabricación y montaje, lo que provocaba que el motor comenzara a vibrar reduciendo su velocidad y consecuentemente el empuje de las propelas, por lo que los datos recolectados de empuje y velocidad no eran estables y aumentaban o disminuían momentáneamente. Sin embargo, esto no afectó al experimento, ya que el objetivo del proyecto era estudiar el comportamiento de la propela y obtener datos de empuje, velocidad y eficiencia que muestren una tendencia similar a los datos teóricos obtenidos por Rivera J., 2022 para validar el uso del material en este tipo de aplicaciones.

Una vez obtenidos los valores para ambas propelas se construyeron las curvas de empuje y eficiencia en función de las RPM para cada propela (Figura 3.1, Figura 3.2, Figura 3.3 y Figura 3.4) con el fin de poder compararlas con las gráficas de la simulación obtenidas por Rivera J., 2022, (Figura 3.5).

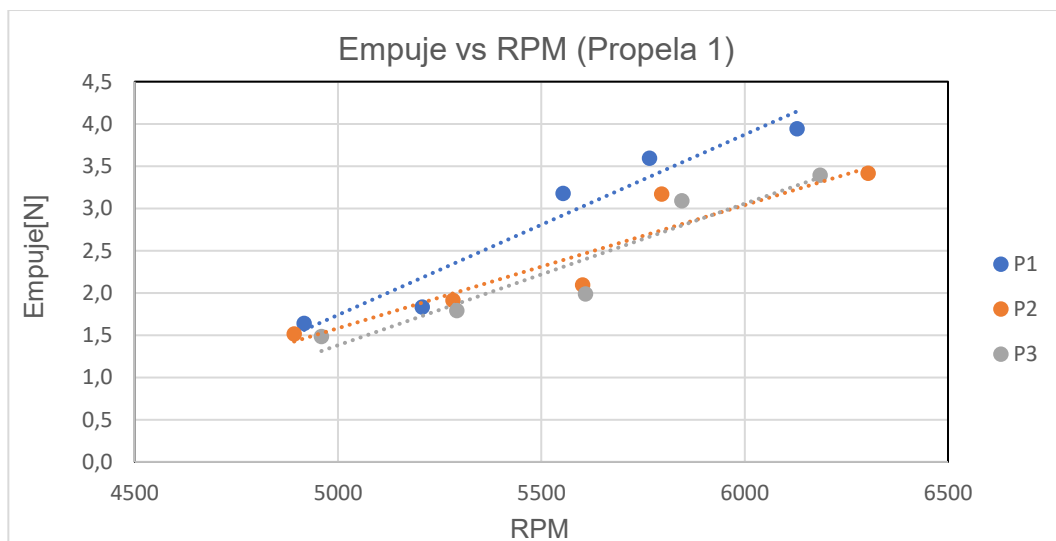


Figura 3.1 Gráfica de Empuje vs RPM para la propela 1

(Fuente: Propia)

Como se observa en la Figura 3.1 el empuje es similar para las tres pruebas realizadas en cuanto inicia el proceso, pero cuando la velocidad del motor aumenta la curva en la prueba P1 muestra un desfase con respecto a las otras dos pruebas. Esto se debe a que en la prueba P1 el sistema de propulsión empezó a vibrar produciendo una variación de empuje con respecto a las otras pruebas, pero, una vez que aumentó la velocidad del motor, el sistema se estabilizó y pudo continuar el proceso.

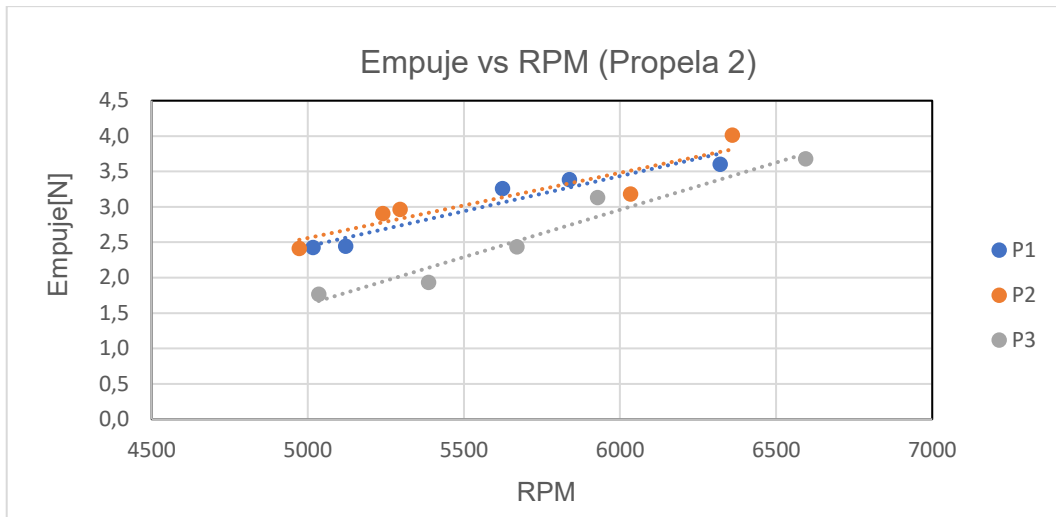


Figura 3.2 Gráfica de Empuje vs RPM para la propela 2

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.2 se observa que las pruebas P1 y P2 empiezan con un empuje similar en los mismos rangos de velocidad. Sin embargo, la prueba P3 tiene un menor empuje, esto se debe a que la propela empezó a vibrar, lo que hizo que el empuje tarde en incrementarse hasta que el sistema se vuelva a estabilizar. En el caso de las pruebas P1 y P2, el empuje aumento de manera continua sin problema hasta llegar al punto máximo en donde la velocidad del motor era constante. Se pudo notar que las pruebas siguen una tendencia creciente de empuje cuando la velocidad del motor aumenta. Esto significa que, la propela dos obtuvo mejores resultados comparados con la propela uno.

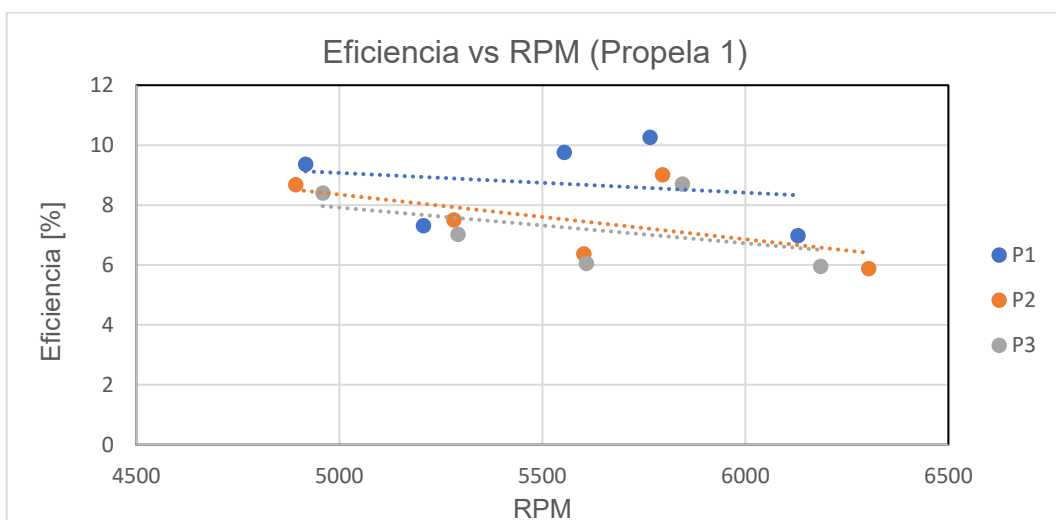


Figura 3.3 Gráfica de Eficiencia vs RPM para la propela 1

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.3 se observa como la eficiencia de la propela disminuye a medida que la velocidad aumenta, esto se debe a que la propela empuja el viento hacia atrás y mueve la

aeronave hacia adelante iniciando el despegue. Este fenómeno produce una pérdida de energía que es compensada con el empuje que produce el sistema de propulsión (motor – propela). En la prueba P1 se observa como la eficiencia incrementa proporcionalmente a la velocidad del motor, esto se debe a que el sistema de propulsión perdió estabilidad tal como se explicó en la Figura 3.1 con respecto a la prueba P1 pero una vez que se estabilizó el sistema la propela dejó de vibrar y continuó con la tendencia normal.

En el caso de las pruebas P2 y P3, la eficiencia disminuyó a medida que la velocidad del motor aumentaba, sin embargo, a las 5800 RPM el sistema vibró por unos instantes, haciendo que la eficiencia aumente momentáneamente hasta estabilizarse obteniéndose una eficiencia aproximada del 6% para ambas pruebas.

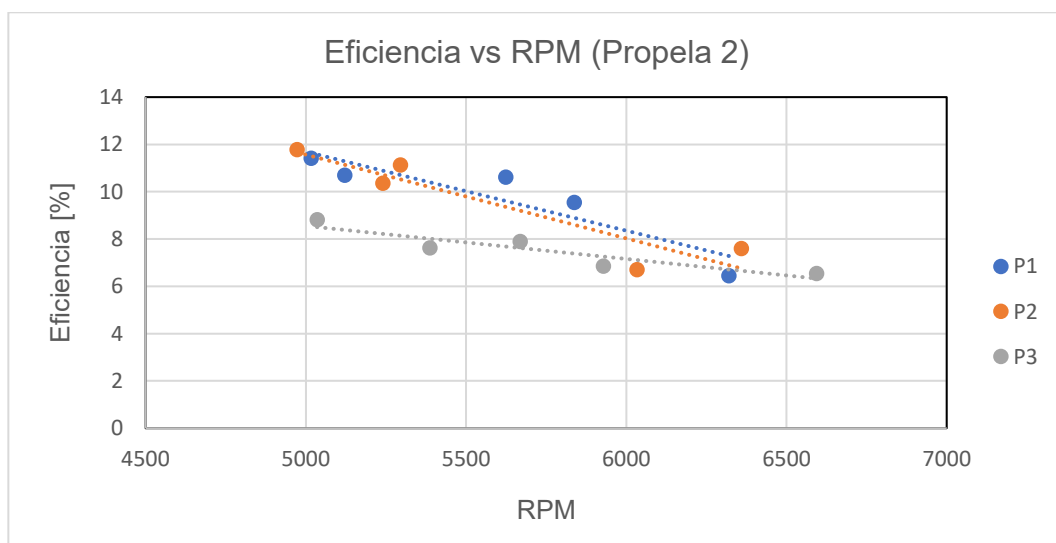


Figura 3.4 Gráfica de Empuje vs RPM para la propela 2

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.4, se observa como la eficiencia inicial en las pruebas P1 y P2 es de 11.41% y 11.77% respectivamente, esta fue disminuyendo hasta llegar a los 6.71 % y 7.60 %. En el caso de la prueba P3, debido a las vibraciones en el sistema de propulsión, la eficiencia era menor debido al empuje mostrado en la Figura 3.2, por lo que una vez que el sistema se estabilizó, la eficiencia fue decreciendo de forma normal mostrando la misma tendencia de los datos teóricos.

3.1.3 Análisis y cálculo de error entre datos teóricos y experimentales de las propelas evaluadas

En la Figura 3.5 se observa el empuje y la eficiencia teóricas en función de las RPM obtenidas por Rivera J., 2022 en su simulación de la propela de material compuesto.

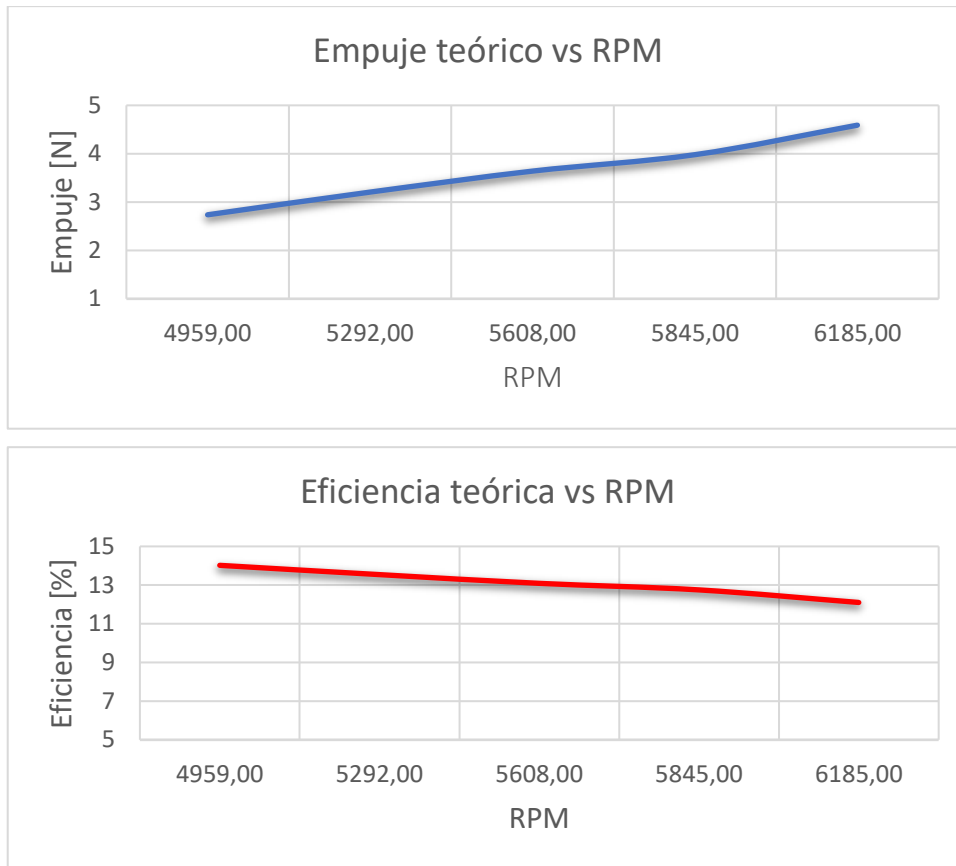


Figura 3.5 Gráfica teórica de empuje y eficiencia vs RPM

(Fuente: Rivera J., 2022)

Con esta información se procede a calcular los errores absolutos y relativos de acuerdo a las ecuaciones obtenidas de (Cabrera. J & Valera. R, 2016) presentadas a continuación:

$$Error_{abs} = |Valor_{aprox} - V_{real}|$$

Ecuación 3.6

$$Error_{relativo} = \frac{Error_{abs}}{Valor_{real}} \times 100$$

Ecuación 3.7

Donde:

$Valor_{aprox}$ = valor calculado aproximado

$Valor_{real}$ = valor real obtenido

Se realizan las operaciones y se obtienen los porcentajes de error para el empuje y eficiencia de las propelas de material compuesto (Tabla 3.3, Tabla 3.4, Tabla 3.5 y Tabla 3.6).

Tabla 3.3 Empuje: Porcentaje de error para la propela de material compuesto 1

Propela de material compuesto 1	Prueba P1	Empuje experimental [N]	Empuje teórico [N]	Error _{absoluto}	Error _{relativo}	Error [%]
		1.638	2.740	1.102	0.402	40.201
		1.833	3.210	1.377	0.429	42.901
		3.177	3.640	0.463	0.127	12.709
		3.594	3.980	0.386	0.097	9.706
		3.942	4.590	0.648	0.141	14.110
	Prueba P2	Empuje experimental [N]	Empuje teórico [N]	Error _{absoluto}	Error _{relativo}	Error [%]
		1.513	2.740	1.227	0.448	44.794
		1.911	3.210	1.299	0.405	40.470
		2.094	3.640	1.546	0.425	42.470
		3.171	3.980	0.809	0.203	20.331
		3.414	4.590	1.176	0.256	25.626
	Prueba P3	Empuje experimental [N]	Empuje teórico [N]	Error _{absoluto}	Error _{relativo}	Error [%]
		1.483	2.740	1.257	0.459	45.868
		1.790	3.210	1.420	0.442	44.245
		1.989	3.640	1.651	0.454	45.359
		3.091	3.980	0.889	0.223	22.338
		3.394	4.590	1.196	0.261	26.053

(Fuente:Propia)

Tabla 3.4 Empuje: Porcentaje de error para la propela de material compuesto 2

Propela de material compuesto 2	Prueba P1	Empuje experimental [N]	Empuje teórico [N]	Error _{absoluto}	Error _{relativo}	Error [%]
		2.423	2.740	0.317	0.116	11.570
		2.443	3.210	0.767	0.239	23.906
		3.257	3.640	0.383	0.105	10.527
		3.384	3.980	0.596	0.150	14.966
		3.600	4.590	0.990	0.216	21.565
	Prueba P2	Empuje experimental [N]	Empuje teórico [N]	Error _{absoluto}	Error _{relativo}	Error [%]
		2.413	2.740	0.327	0.119	11.928
		2.904	3.210	0.306	0.095	9.543
		2.963	3.640	0.677	0.186	18.612
		3.178	3.980	0.802	0.201	20.142
		4.012	4.590	0.578	0.126	12.589
	Prueba P3	Empuje experimental [N]	Empuje teórico [N]	Error _{absoluto}	Error _{relativo}	Error [%]
		1.766	2.740	0.974	0.356	35.557
		1.933	3.210	1.277	0.398	39.797
		2.433	3.640	1.207	0.332	33.165
		3.129	3.980	0.851	0.214	21.375
		3.679	4.590	0.911	0.199	19.855

(Fuente:Propia)

Tabla 3.5 Eficiencia: Porcentaje de error para la propela de material compuesto 1

Propela de material compuesto 1	Prueba P1	$f_{propela}$ [%]	$f_{teórica}$ [%]	Error absoluto	Error relativo	Error [%]
		9.173	14.020	4.847	0.346	34.574
		7.015	13.540	6.525	0.482	48.188
		9.951	13.090	3.139	0.240	23.978
		10.263	12.750	2.487	0.195	19.509
		7.428	12.100	4.672	0.386	38.612
	Prueba P2	$f_{propela}$ [%]	$f_{teórica}$ [%]	Error absoluto	Error relativo	Error [%]
		8.274	14.020	5.746	0.410	40.983
		7.556	13.540	5.984	0.442	44.198
		6.724	13.090	6.366	0.486	48.629
		9.305	12.750	3.445	0.270	27.017
		6.360	12.100	5.740	0.474	47.438
	Prueba P3	$f_{propela}$ [%]	$f_{teórica}$ [%]	Error absoluto	Error relativo	Error [%]
		7.582	14.020	6.438	0.459	45.917
		7.186	13.540	6.354	0.469	46.929
		6.379	13.090	6.711	0.513	51.270
		9.305	12.750	3.445	0.270	27.020
6.595		12.100	5.505	0.455	45.500	

(Fuente:Propia)

Tabla 3.6 Eficiencia: Porcentaje de error para la propela de material compuesto 2

Propela de material compuesto 2	Prueba P1	$f_{propela}$ [%]	$f_{teórica}$ [%]	Error absoluto	Error relativo	Error [%]
		11.410	14.020	2.610	0.186	18.615
		10.690	13.540	2.850	0.210	21.047
		10.618	13.090	2.472	0.189	18.882
		9.545	12.750	3.205	0.251	25.141
		6.452	12.100	5.648	0.467	46.680
	Prueba P2	$f_{propela}$ [%]	$f_{teórica}$ [%]	Error absoluto	Error relativo	Error [%]
		11.773	14.020	2.247	0.160	16.024
		10.353	13.540	3.187	0.235	23.538
		11.130	13.090	1.960	0.150	14.977
		6.708	12.750	6.042	0.474	47.390
		7.603	12.100	4.497	0.372	37.167
	Prueba P3	$f_{propela}$ [%]	$f_{teórica}$ [%]	Error absoluto	Error relativo	Error [%]
		8.813	14.020	5.207	0.371	37.141
		7.630	13.540	5.910	0.436	43.649
		7.892	13.090	5.198	0.397	39.706
		6.850	12.750	5.900	0.463	46.271
6.538		12.100	5.562	0.460	45.966	

(Fuente:Propia)

Como se observa en la Tabla 3.3, el error relativo de empuje en la propela 1 es de casi el 45% en cuanto iniciaron las pruebas. Esto se debe a que, al inicio del proceso el sistema tardó en estabilizarse, pero en cuanto aumento la velocidad del motor (RPM) la lectura de empuje se normalizó, obteniéndose porcentajes de error final en las pruebas P1, P2 y P3 de 14.110%, 25.626% y 26.053%.

En el caso de la Tabla 3.4 el error relativo de empuje fue menor para la prueba P1 y P2, en donde se mantuvo estable durante toda la prueba hasta llegar casi a las 6400 [RPM] teniendo errores que van desde el 11% hasta un máximo del 20%. Sin embargo, en la prueba P3 durante la primera mitad de la prueba la propela empezó a vibrar, por lo que se obtuvieron errores de casi un 40%. En cuanto el motor supero las 5000 [RPM] el sistema se estabilizó obteniéndose un error final de 19.855%.

En el caso de la eficiencia en la Tabla 3.5, se observa como el error relativo para la prueba P1 al inicio del experimento es de 34.574%, después ésta aumento hasta los 48.180% para nuevamente disminuir hasta los 19.509%. Finalmente, el error relativo final fue de 38.612%. Esto se debe a que, el sistema de propulsion perdió estabilidad produciendo vibraciones en la propela generando errores mayores. Durante las pruebas P2 y P3, el error relativo al inicio del experimento fue de 40.983% y 45.917% respectivamente. Estos errores se mantuvieron cerca del rango hasta llegar casi a las 5900 [RPM], en donde, el error relativo disminuye hasta el 27% y finalmente vuelven a aumentar hasta los 47.438% y 45.500%.

En la Tabla 3.6 el error relativo en la prueba P1 y P2 es de 18.615% y 16.024% respectivamente. En el caso de la prueba P1 el error se mantuvo igual hasta las, 5838 [RPM] en donde se obtuvo un error del 25.141%. Después, la velocidad del motor aumentó hasta las 6320 [RPM] teniéndose un error final del 38.612%.

En el caso de la prueba P2 en cuanto el motor llego a las 5900 [RPM] el error aumento hasta el 47.390% y luego se mantuvo en los 37.167%. En la prueba P3, los errores fueron mucho más grandes, teniendo un error promedio del 44% pero bastante bajo comparado con los errores en la propela 1.

Finalmente, basándose en el análisis en los literales anteriores, en donde, se comparó los resultados obtenidos con los datos teóricos del trabajo de realizado por Rivera J., 2022, se determinó que la propela 2 presentó errores relativos más bajos que los de la propela 1. De la misma manera, se determinó que la propela 2 puede trabajar a mayores revoluciones que la propela 1 y que los valores de empuje son mucho más estables con ésta. Por consiguiente, la propela 2 presenta las mejores propiedades, características aerodinámicas y funcionalidad bajo la influencia de un flujo de aire controlado simulando condiciones reales.

3.2 Conclusiones

- La utilización de fibra de yute en procesos de ingeniería es un gran avance de innovación en varios proyectos, es así como su uso en procesos de manufactura de propelas no solo ayudará a reducir la utilización de materiales como fibra de vidrio, nylon, fibra de carbono y materiales plásticos que son perjudiciales para el medio ambiente sino que también disminuirá los costos al considerar que la fibra de yute es un material biodegradable y económico, características que lo hacen un material más prometedor.
- Los materiales compuestos de matriz poliéster reforzado con fibra de yute de longitud corta y orientadas aleatoriamente presentan las mejores propiedades mecánicas para la fabricación de las propelas pues este tipo de configuración proporciona características isotrópicas a lo largo de todo el compuesto permitiendo que éste sea capaz de resistir las cargas de tracción, flexión y empuje que se producen durante el pilotaje en comparación con otras fibras naturales que presentan propiedades mecánicas inferiores a pesar de tener la misma configuración como es el caso de los materiales compuestos de matriz poliéster reforzado con fibra de bambú o fibra de coco.
- El método de mecanizado CNC utilizado para la fabricación de una propela APC 12x6 EP de material compuesto de matriz poliéster y reforzado con fibra de yute es considerado como un proceso innovador a la hora de diseñar elementos mecánicos con geometrías complejas. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que problemas como formación de porosidades, falta de curado en el material compuesto y orientación de las fibras son parámetros muy importantes a la hora de mecanizar ya que las herramientas de corte solo acceden al material compuesto de manera perpendicular y pueden producir sobre cargas de esfuerzos, generándose la fractura si el material no está en buenas condiciones o si este no tiene una buena fijación.
- Las pruebas realizadas en la propela de material compuesto mediante el uso del sistema de propulsión y bajo la aplicación de condiciones de flujo de aire controlado (túnel de viento) indican un buen funcionamiento de la propela a velocidades no mayores a las 6500 [RPM], donde se pudo observar que no sufrió deformaciones ni fracturas durante los ensayos. Sin embargo, debido a problemas de fabricación y montaje del sistema de propulsión, éste tendía a vibrar y proporcionar momentáneamente información errónea durante las pruebas por lo que no se puede conocer de manera precisa el máximo empuje que puede alcanzar la propela antes de fallar.

- Al comparar los datos obtenidos en el componente práctico con los simulados en el componente teórico se determina que la propela 2 presenta mejores características geométricas, un acabado más fino y una buena composición estructural en comparación con la propela 1. De la misma forma, durante las pruebas en el túnel de viento la propela 2 tuvo un mejor desempeño manteniendo la estabilidad durante casi todas las pruebas. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que existen algunos factores que no se pueden considerar debido a la falta de equipos de medición como son ángulos de sustentación, vibraciones, velocidad del sonido y temperatura con los cuales se podría realizar un análisis más detallado.

3.3 Recomendaciones

- En el proceso de mezcla para la formación del material compuesto, se debe tener cuidado con la mezcla de todos los componentes para evitar la formación de burbujas de aire y así evitar formación de porosidades y malformaciones en el material compuesto.
- Durante la fabricación del material compuesto existieron problemas en el proceso de curado debido a que el tiempo de permanencia era desconocido, por lo que, para evitar fallas en el material, se mantuvo dentro del molde metálico durante un periodo de 5 a 7 días, sin embargo, se puede notar que a mayor espesor del material mayor debería ser el tiempo de su permanencia en el molde para así garantizar su completo curado. Por otro lado, se debe considerar la manera de obtener uniformidad en la mezcla de material compuesto para evitar la falta de homogeneidad del material en el molde y consecuentemente la falta de refuerzo en determinados sitios de la matriz.
- Se recomienda mejorar la fijación del material compuesto durante el proceso de mecanizado para evitar que cuando la herramienta de corte entre en contacto con el material genere esfuerzos adicionales a los aplicados durante el maquinado que no solo puede producir fallas en el elemento, sino que pueden contribuir al cambio de su geometría tal como es el caso de la reducción de espesores.
- Durante las pruebas en el túnel de viento, se debe verificar y corregir el balance de las propelas con el fin evitar las vibraciones en sistema de propulsión, daños en el motor y obtención de datos equivocados.
- Se puede considerar como una alternativa para trabajos futuros la fabricación de propelas de material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras naturales por el método de compresión utilizando molde macho-hembra, ya que, a pesar de que el método CNC es bueno, existen varios aspectos a considerar para poder llevarlo a cabo, a diferencia del sugerido en el cual lo que se tiene que garantizar es la homogeneidad del material compuesto al ser depositado en el molde y un tiempo adecuado para su completo curado para evitar deformaciones posteriores.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FAO. (2013). *Future Fibres: Yute. Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura*. Recuperado el 14 de febrero de 2022, de: <https://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/jute/es>.
- Rodríguez, H. (2016). *Materiales Compuestos*. ingmecanica. Recuperado el 12 de abril de 2022, de: <https://ingmecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn114.html>
- AIMPLAS. (2019). *Tipos de materiales compuestos*. Instituto tecnológico del plástico. Recuperado 3 de noviembre de 2021, de <https://www.aimplas.es/blog/tipos-de-materiales-compuestos/>
- Gandano, A. (2020). *Taller de fibras naturales*. CentroCentro. Recuperado 12 de enero de 2022, de <https://www.centrocentro.org/programa-publico/taller-de-fibras-naturales>
- Figuroa, C (2017). *Manufactura y procesamiento de materiales avanzados cermet base alúmina reforzados con partículas de plata* (Ingeniero industrial). Universidad Autónoma del estado de México.
- Drones, S. (2018). *¿Cómo funcionan las propelas de un dron? | COMPRAR DRONES ONLINE*. comprar drones online. Recuperado 15 de octubre de 2021, de <https://www.comprardrones.online/como-funcionan-las-helices-de-un-drone/>
- Ruipérez, P (2014). *Diseño y fabricación de un dron (ingeniería de diseño)*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Túnel de viento subsónico*. (2015). TecnoEdu.com. Recuperado 12 de noviembre de 2021, de <https://tecnoedu.com/Aeronautica/AF1300.php>
- Agencia EbalDesign Cía. Ltda. (s. f.). *Textiles Alvarez. fibra de yute*. Textiles Alvarez. Recuperado 4 de febrero de 2022, de <http://www.textilesalvarez.com>
- B, A. (2018). *2016 Materiales compuestos de matriz cerámica ESTRUCTURA, PROCESAMIENTO Y PROPIEDADES DE MATERIALES CERÁMICOS*. Academia. Recuperado 14 de febrero de 2022, de <https://www.academia.edu/>
- W. Callister (2007), "Materials Science and Engineering: An introduction", 10ma. ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
- P. Mallick, "Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design", 4ra. ed. Estados Unidos: CRC Press, 2012.

- Rutkay, B., & Laliberté, J. (2016). Design and manufacture of propellers for small unmanned aerial vehicles. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 4(4), 228–245. <https://doi.org/10.1139/juvs-2014-0019>
- Unmanned Systems Technology. (2022). *Carbon Fiber Drone Propellers | Custom Propeller Design | Mejzlik*. Recuperado 12 de marzo de 2022, de <https://www.unmannedsystemstechnology.com/company/mejzlik-propellers/>
- Ponton, P., Guerrero, V. H., Rosas, N., & Sotomayor, V. (2011). *nuevos materiales aplicaciones estructurales e industriales* (1.ª ed., Vol. 1). impreffp. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4532>
- Echavarria, C., Jimenez, J., Hoyos, J., & Alvarado, P. (2021, abril). OPTIMIZACIÓN GEOMÉTRICA MULTI-OBJETIVO DE PROPELAS. ResearchGate. Recuperado 10 de mayo de 2022, de https://www.researchgate.net/publication/351132729_OPTIMIZACION_GEOMETRICA_MULTI-OBJETIVO_DE_HELICES
- Protocorner. (2014). *CNC - DIY Propeller Part 1* [Vídeo]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=5yCLQf_RHFE
- Robotics, T. (2020). *Propeller Wind Tunnel Testing*. Tyto Robotics. Recuperado 22 de mayo de 2022, de <https://www.tytorobotics.com/pages/propeller-wind-tunnel-testing>
- Bertorelli, P. (2019). *Wooden Props*. KITPLANES. <https://www.kitplanes.com/wooden-props/>
- Megha, B., Gowda, K., & Easwara, G. (2018). Investigation on Mechanical Behavior of Hybrid Jute/Banana Natural Fiber Reinforced Polyester Composites. *International Journal of Recent Trends in Engineering and Research*, 4(2), 208–214. <https://doi.org/10.23883/ijrter.2018.4184.tx0rq>
- Valera, J. (2018). *Materiales compuestos de matriz cerámica ESTRUCTURA, PROCESAMIENTO Y PROPIEDADES DE MATERIALES CERÁMICOS*. Academia. Recuperado 1 de octubre de 2021, de <https://www.academia.edu>
- Rutkay, B., & Laliberté, J. (2016b). Design and manufacture of propellers for small unmanned aerial vehicles. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 4(4), 228–245. <https://doi.org/10.1139/juvs-2014-0019>
- APC Propellers | Quality Propellers that are Competition Proven. (2019). APC Propellers. <https://www.apcprop.com/>

- James, D. (s. f.). Propeller Selection | The UAV Chronicles. The UAV Chronicles. Recuperado 12 de abril de 2022, de <https://uav.jreyn.net/quadcopter-design/step-4-propeller-selection>
- Cabrera, J., & Varela, R. (2016). *Tipos de errores*. Análisis numérico - Temas desarrollados. Recuperado 14 de julio de 2022, de <https://sites.google.com/site/analisisnumericoipn/home>
- Flyers District. (2018). Inside a Drone Propeller Factory in China. This one is different. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=FQYtRjRVhtw>
- Gowda, K., Megha, B., & Easwara, G. (2018). Investigation on Mechanical Behavior of Hybrid Jute/Banana Natural Fiber Reinforced Polyester Composites. *International Journal of Recent Trends in Engineering and Research*, 4(2), 208–214. <https://doi.org/10.23883/ijrter.2018.4184.tx0rq>
- LeGault, M. (2020). *Drones: Composite UAVs take flight*. Composites World. <https://www.compositesworld.com/articles/drones-composite-uavs-take-flight>

5 ANEXOS

ANEXO I

Proceso de mecanizado de propela de madera

Se realiza las pruebas de mecanizado de la propela en una barra de madera con el fin de encontrar posibles errores en la programación y detectar problemas en el transcurso del proceso (Figura 5.1).



Figura 5.1 Prueba en lingote de madera

(Fuente: Propia)

El mecanizado empieza con la primera cara de la propela y continúa hasta llegar a la mitad de su espesor (Figura 5.2). Este proceso tarda 10 horas en ejecutarse debido al número de herramientas requeridas por su geometría compleja.



Figura 5.2 Mecanizado de la primera cara de la propela de madera

(Fuente: Propia)

Se apoya la primera cara de la propela maquinada en el molde de aluminio y es fijada por medio de un tornillo de 5 [mm] al molde. Luego se ingresa el segundo código de programación y se procede con el mecanizado de la segunda cara de la propela (Figura

5.3). El proceso tarda alrededor de 8 horas y termina con el uso de las fresas redondas que proporcionan el acabado.



Figura 5.3 Mecanizado de segunda cara de propela de madera

(Fuente: Propia)

Finalmente, en la Figura 5.4 se puede apreciar la propela de madera misma que presenta un buen acabado y cero fallas durante el maquinado lo que proporciona los parámetros base para el maquinado del material compuesto.



Figura 5.4 Obtención final de prueba de mecanizado de propela en madera

(Fuente: Propia)

ANEXO II

Falla de material durante el maquinado de la propela en el material compuesto

Durante el proceso de maquinado se pudo observar una fractura en el lado izquierdo de la propela (Figura 5.5). La falla cubre casi toda la cara del asa y esta no se pudo desprender del molde de aluminio sin fracturarse.



Figura 5.5 Propela fallida durante el primer intento de mecanizado

(Fuente: Propia)

En la Figura 5.6 se puede apreciar de mejor manera la fractura de la propela que inutiliza el material. Se observa que ésta pudo haberse generado por una sobrecarga de esfuerzos en el mismo debido a la falta de fijación de la propela en el molde de aluminio. Otras posibles causas son la falta de material de refuerzo en dicha zona o una mala interacción entre fibra – matriz, que pudo haber disminuido la resistencia mecánica del material y causar la falla.



Figura 5.6 Falla de propela de material compuesto

(Fuente: Propia)

ANEXO III

Datos de las pruebas realizadas en el túnel de viento propela 1 y 2

La Tabla 5.1 y Tabla 5.2 muestran los datos obtenidos y calculados de las pruebas 2 y 3 de la propela 1.

Tabla 5.1 Datos obtenidos de la prueba 2 para la propela 1

Throttle [%]	Empuje [g]	Empuje [N]	RPM	W [rev/s]	Vair [m/s]	Q [N-m]	C_T	C_a	C_p	J	$f_{propela}$ [%]
40.000	154.200	1.513	4892.000	81.533	5.044	0.180	0.022	0.008	0.053	0.203	8.274
45.000	194.800	1.911	5282.200	88.037	5.118	0.234	0.023	0.009	0.059	0.191	7.556
50.000	213.470	2.094	5601.500	93.358	5.274	0.280	0.023	0.010	0.063	0.185	6.724
55.000	323.235	3.171	5796.000	96.600	5.344	0.300	0.032	0.010	0.063	0.181	9.305
60.000	348.000	3.414	6303.800	105.063	5.411	0.440	0.029	0.012	0.078	0.169	6.360

(Fuente: Propia)

Tabla 5.2 Datos obtenidos de la prueba 3 para la propela 1

Throttle [%]	Empuje [g]	Empuje [N]	RPM	W [rev/s]	Vair [m/s]	Q [N-m]	C_T	C_a	C_p	J	$f_{propela}$ [%]
40.000	151.200	1.483	4959.000	82.650	5.044	0.190	0.021	0.009	0.054	0.200	7.582
45.000	182.444	1.790	5292.200	88.203	5.118	0.230	0.022	0.009	0.058	0.190	7.186
50.000	202.750	1.989	5608.500	93.475	5.274	0.280	0.022	0.010	0.062	0.185	6.379
55.000	315.091	3.091	5845.000	97.417	5.344	0.290	0.031	0.009	0.060	0.180	9.305
60.000	346.000	3.394	6185.300	103.088	5.411	0.430	0.030	0.013	0.079	0.172	6.595

(Fuente: Propia)

La Tabla 5.3 y Tabla 5.4 muestran los datos obtenidos y calculados de las pruebas 2 y 3 de la propela 2.

Tabla 5.3 Datos obtenidos de la prueba 2 para la propela 2

Throttle [%]	Empuje [g]	Empuje [N]	RPM	W [rev/s]	Vair [m/s]	Q [N-m]	C_T	C_a	C_p	J	$f_{propela}$ [%]
40.000	246.000	2.413	4972.600	82.877	4.700	0.185	0.033	0.008	0.053	0.186	11.773
45.000	296.000	2.904	5240.100	87.335	4.500	0.230	0.036	0.009	0.059	0.169	10.353
50.000	302.000	2.963	5295.600	88.260	5.000	0.240	0.036	0.010	0.060	0.186	11.130
55.000	324.000	3.178	6033.000	100.550	5.200	0.390	0.030	0.012	0.075	0.170	6.708
60.000	409.000	4.012	6359.200	105.987	5.300	0.420	0.034	0.012	0.073	0.164	7.603

(Fuente: Propia)

Tabla 5.4 Datos obtenidos de la prueba 3 para la propela 2

Throttle [%]	Empuje [g]	Empuje [N]	RPM	W [rev/s]	Vair [m/s]	Q [N-m]	C_T	C_a	C_p	J	$f_{propela}$ [%]
40.000	180.000	1.766	5035.000	83.917	5.000	0.190	0.024	0.008	0.053	0.195	8.813
45.000	197.000	1.933	5387.000	89.783	4.900	0.220	0.023	0.008	0.053	0.179	7.630
50.000	248.000	2.433	5669.000	94.483	5.200	0.270	0.026	0.009	0.059	0.181	7.892
55.000	319.000	3.129	5928.000	98.800	5.300	0.390	0.030	0.012	0.078	0.176	6.850
60.000	375.000	3.679	6594.000	109.900	5.400	0.440	0.029	0.011	0.071	0.161	6.538

(Fuente: Propia)

ANEXO IV

Falla en propela 1

Las primeras pruebas se realizaron con la propela 1, la cual fue sometida a condiciones extremas para poder determinar las condiciones límite con las que el material compuesto fallaría. Por tal razón se varió la velocidad de rotación (throttle) entre el 40% y el 65% en intervalos de aumento de 5%. La Figura 5.7 muestra el consumo de energía vs el empuje desarrollado por la propela que está directamente relacionado con el aumento de la velocidad del motor que llegó hasta 8220 [RPM] o throttle de 65 % donde se puede observar que la propela empezó a fallar y se fracturó disminuyendo la fuerza de empuje de manera significativa.

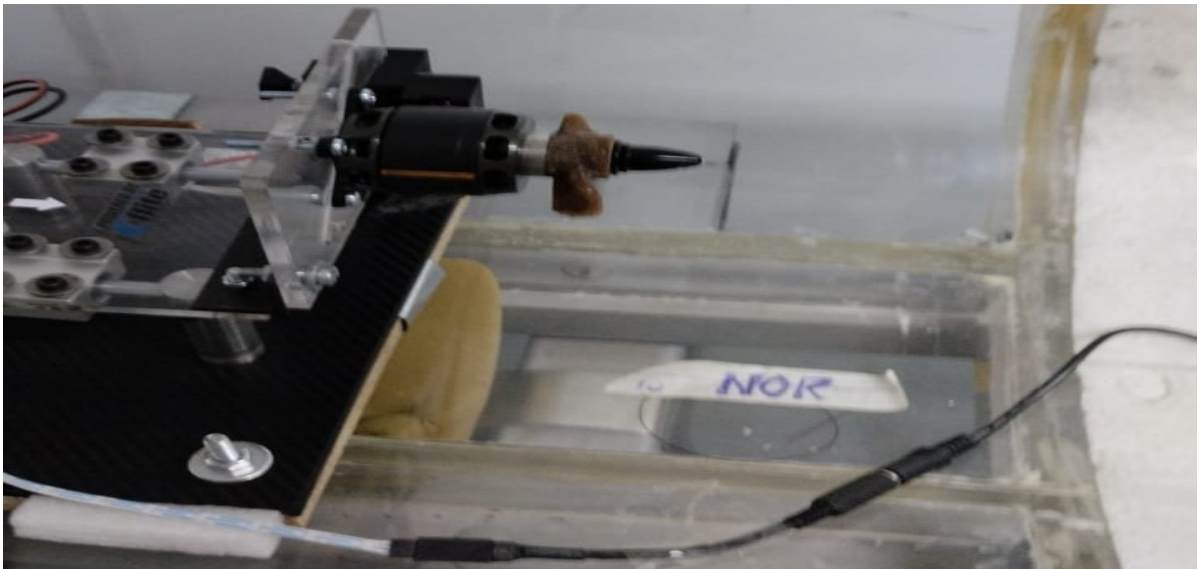
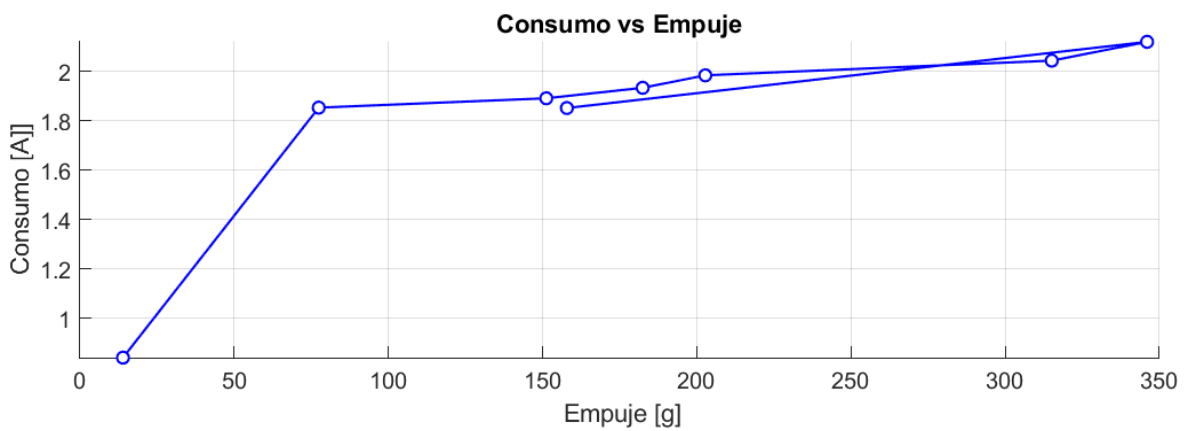
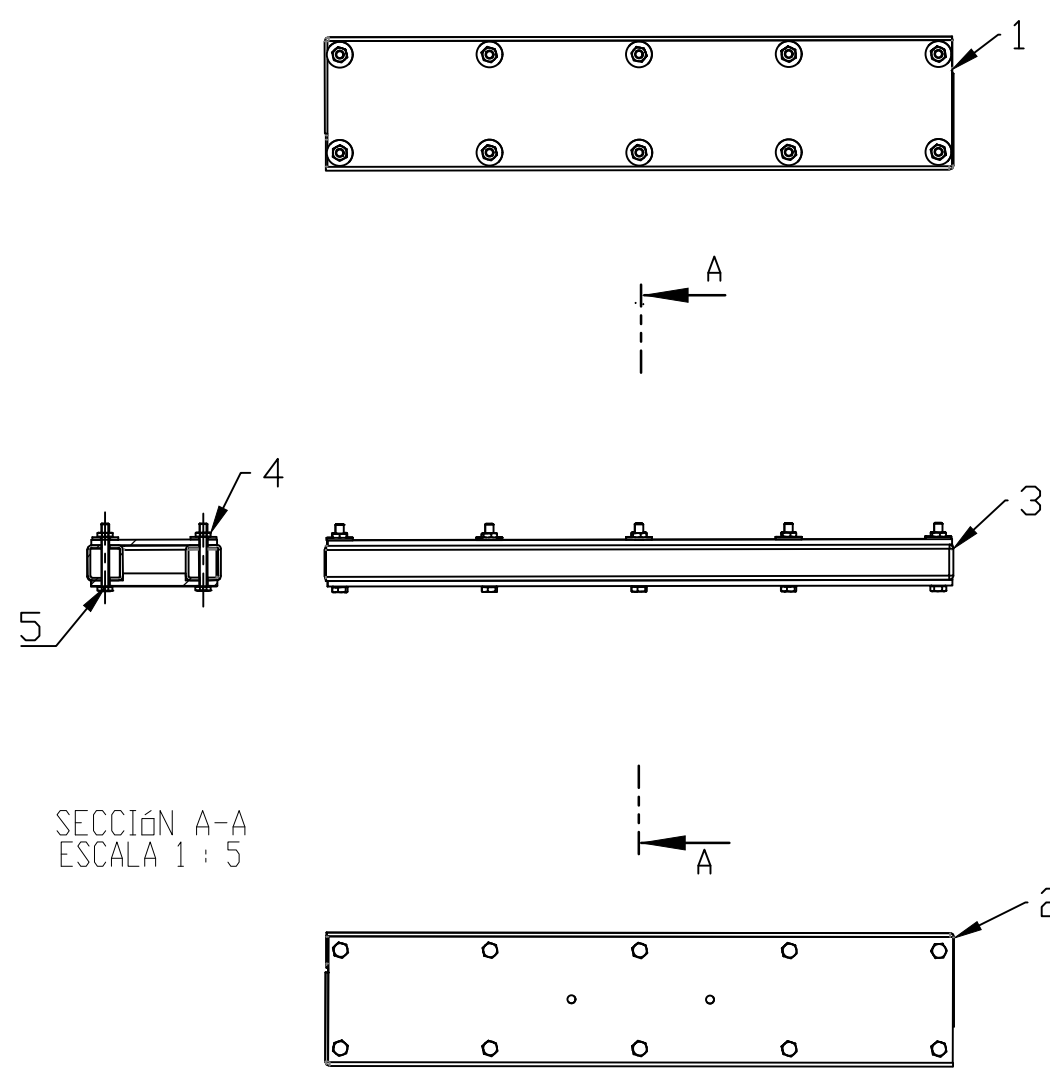


Figura 5.7 Falla de propela 1

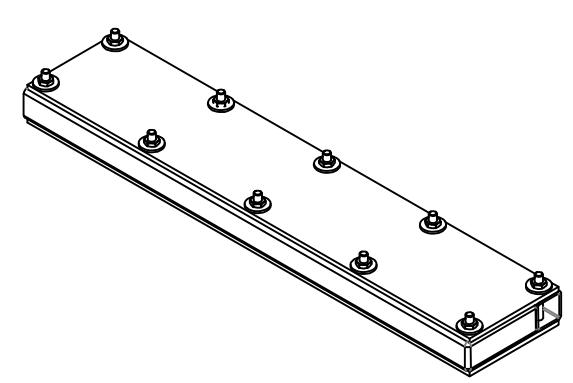
(Fuente: Propia)

ANEXO V

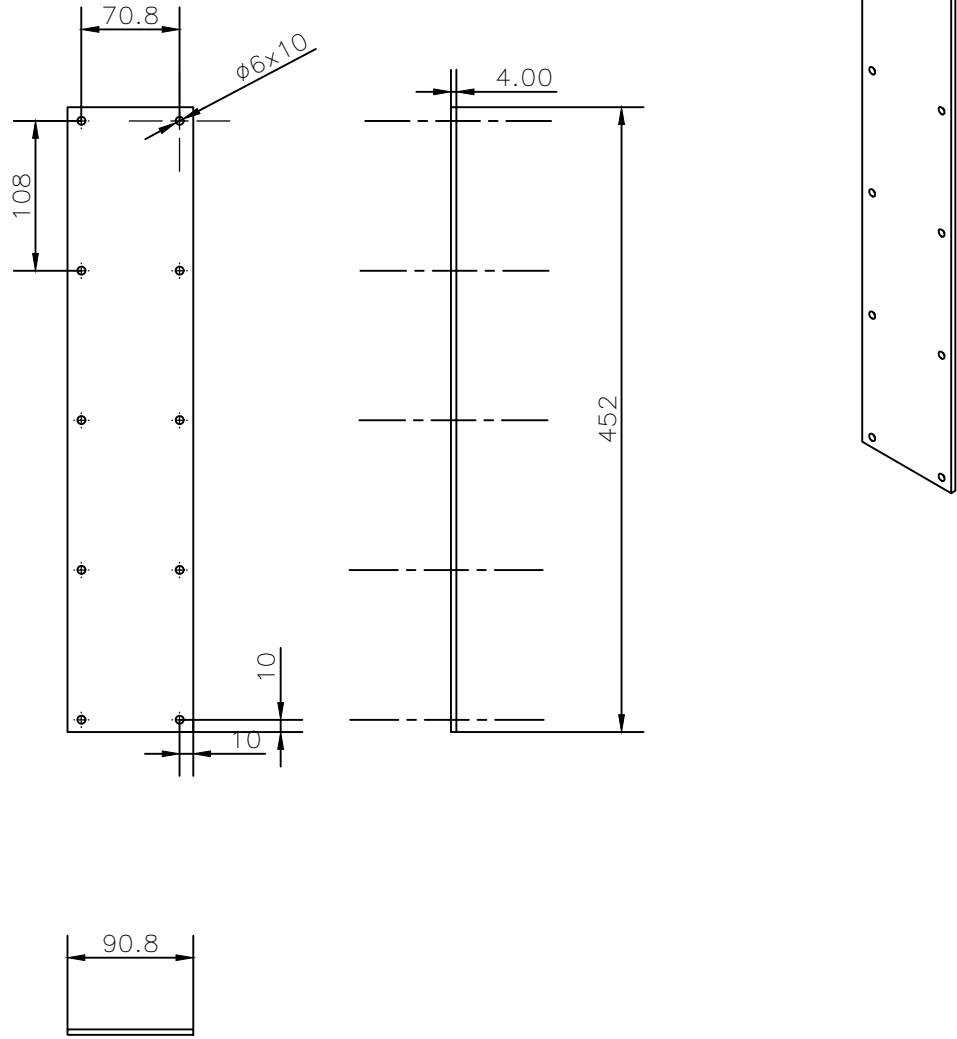
Planos de diseño



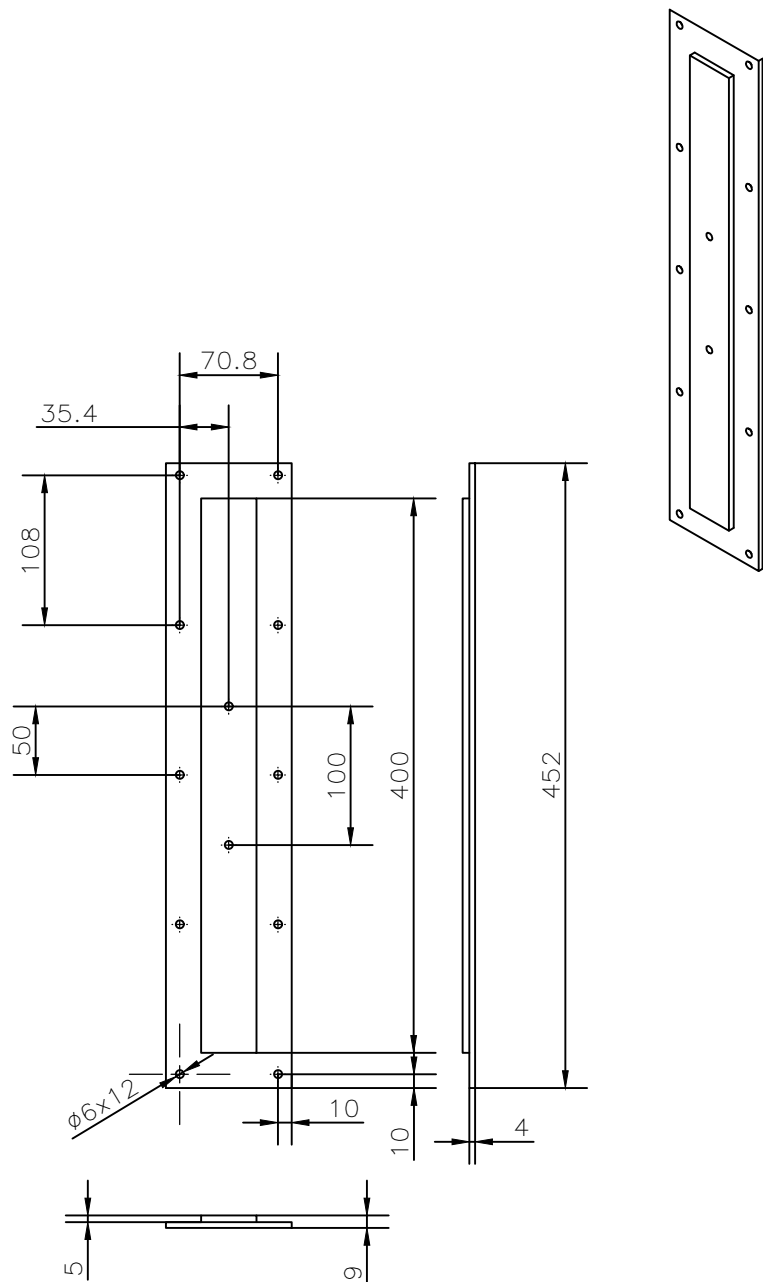
SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 5



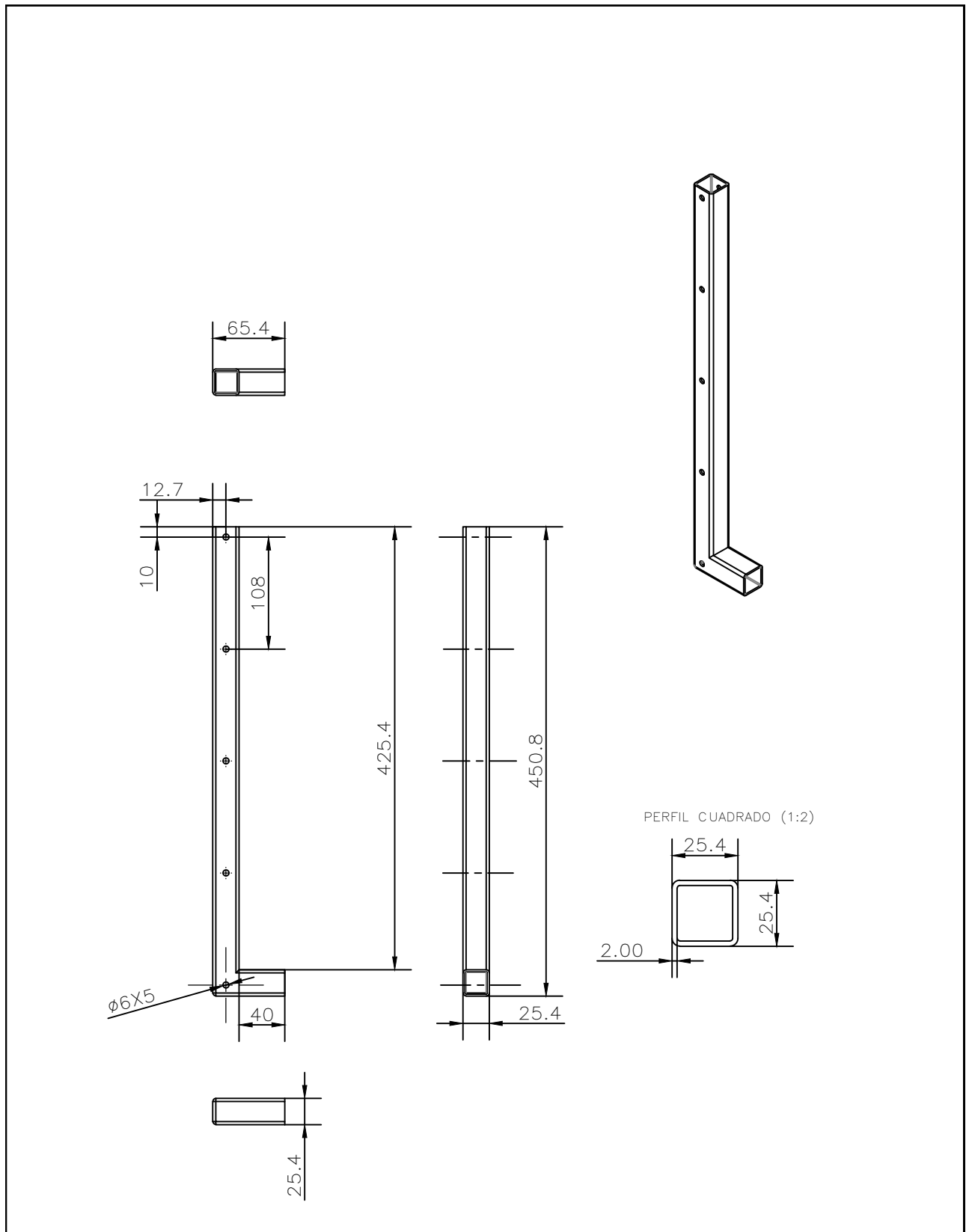
6	A-1	Arandelas	10	Acero	N/A	Normalizado
5	A-1	Tornillos M6	12	Acero	N/A	Normalizado
4	B-4	Tuercas M6	10	Acero	N/A	Normalizado
3	B-4	Barra en L	2	Acero .G		Tubo cuadrado 1 pulg
2	A-2	Placa superior	1	Acero .G		Placa de 400*40 [mm]
1	A-1	Placa Inferior	1	Acero G.		Placa de 400*40 [mm]
N°	ZONA	DENOMINACION:	CANT	MATERIAL:	PLANO/NORMA	OBSERVACIONES
EPN		FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA		Dib. Peralta, G Dis. Peralta, G Rev. Ing. Rodriguez P, PhD.		ESCALA: 1:5
BASE METALICA PARA MATERIAL COMPUESTO				1,101		FECHA: 27/7/2022



Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Peralta G.	
MATERIAL: Acero AISI 1018		Tol. Gral. ±0.05	Escala: 1:5	Dis.	Peralta G.
PLACA INFERIOR		1.101-01		Rev.	Ing. Rodriguez P. PhD.
				Fecha: 27/7/22	

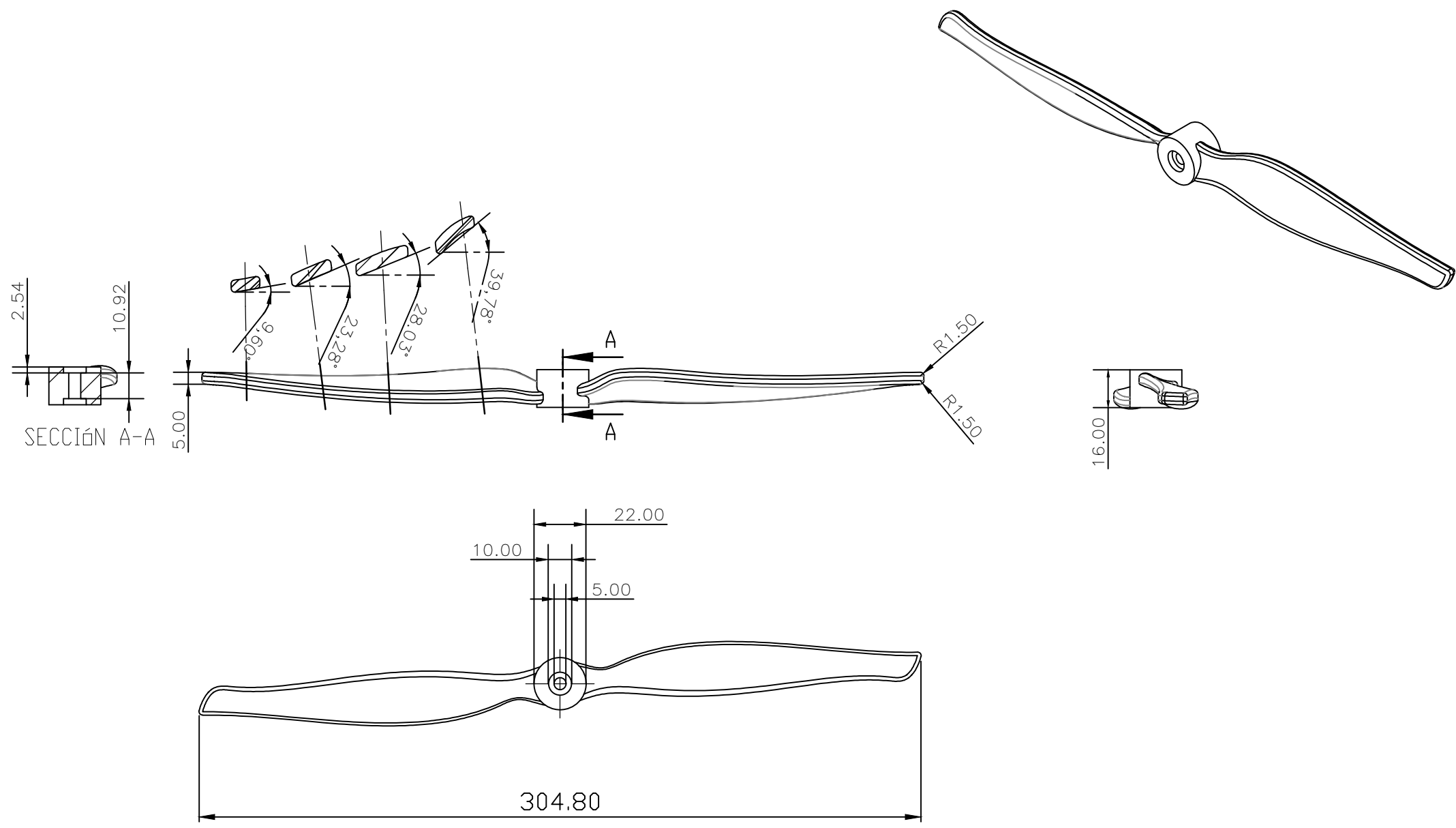


Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Peralta G.	
MATERIAL: Acero AISI 1018		Tol. Gral. ±0.05	Escala: 1:5	Dis.	Peralta G.
				Rev.	Ing. Rodriguez P. PhD.
PLACA SUPERIOR			1.101-02		Fecha: 27/7/22



Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Peralta G.	
MATERIAL: Acero AISI 1018		Tol. Gral. ±0.05	Escala: 1:5	Dis.	Peralta G.
				Rev.	Ing. Rodriguez P. PhD.
BARRA EN L			1.101-03		Fecha: 27/7/22

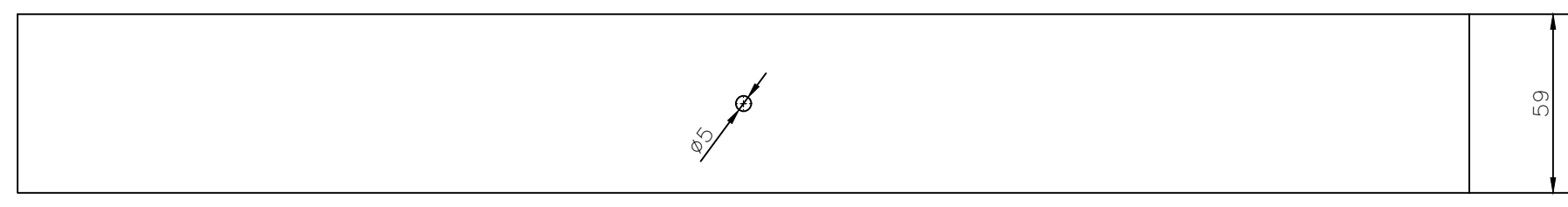
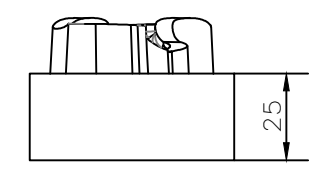
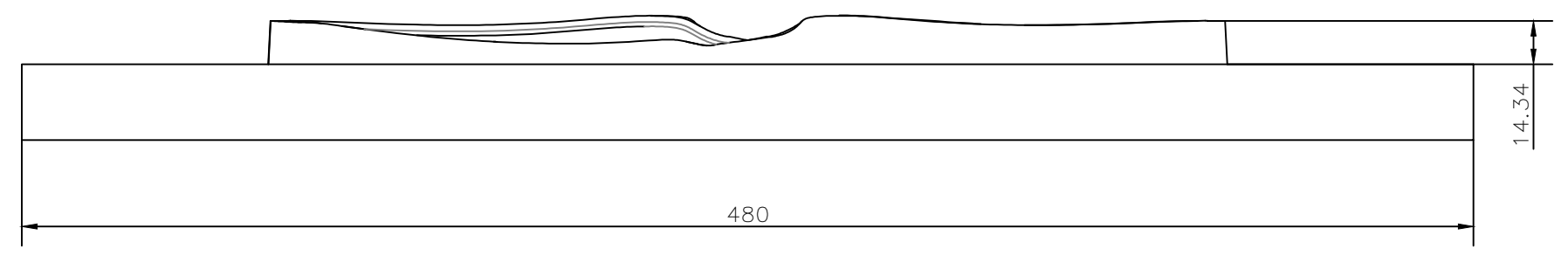
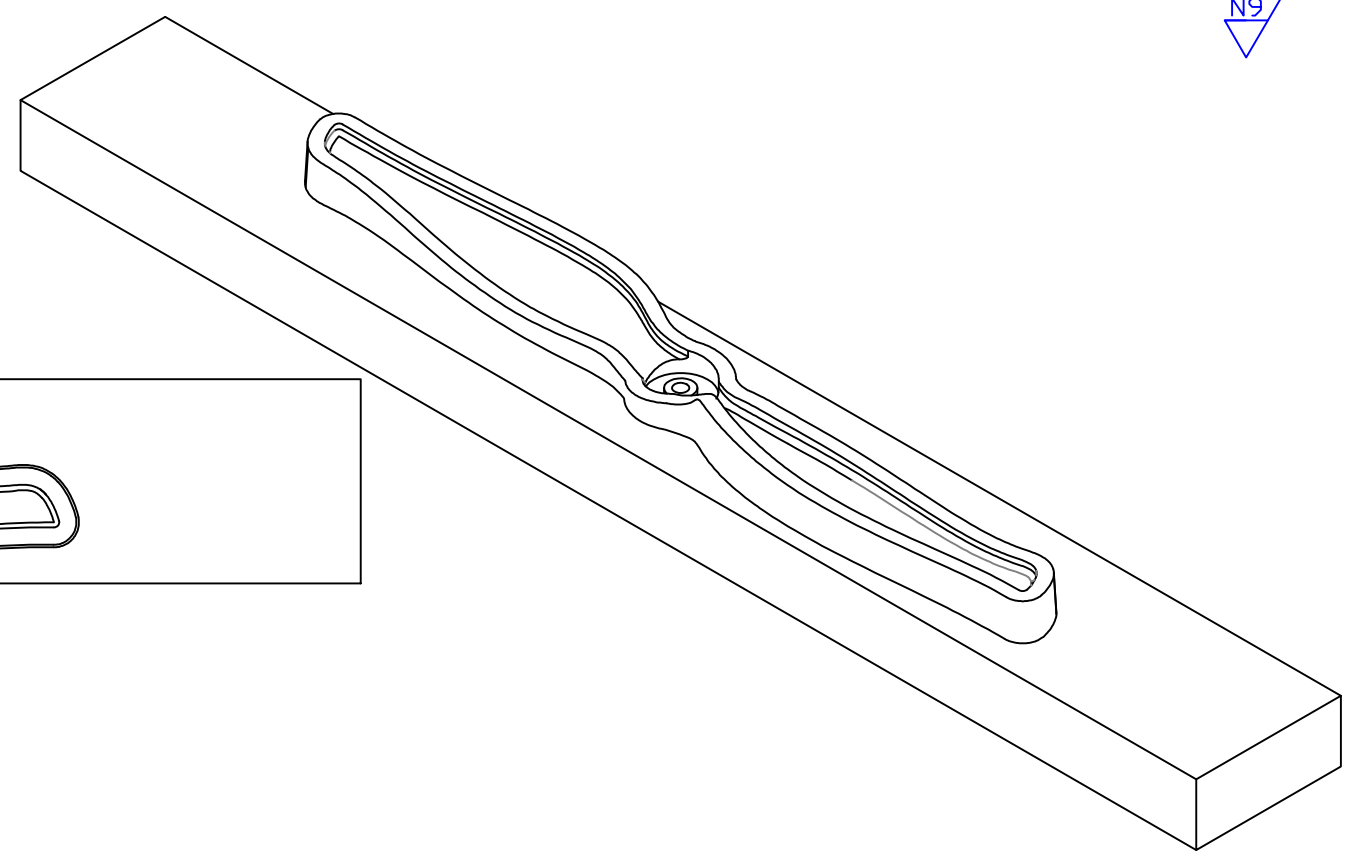
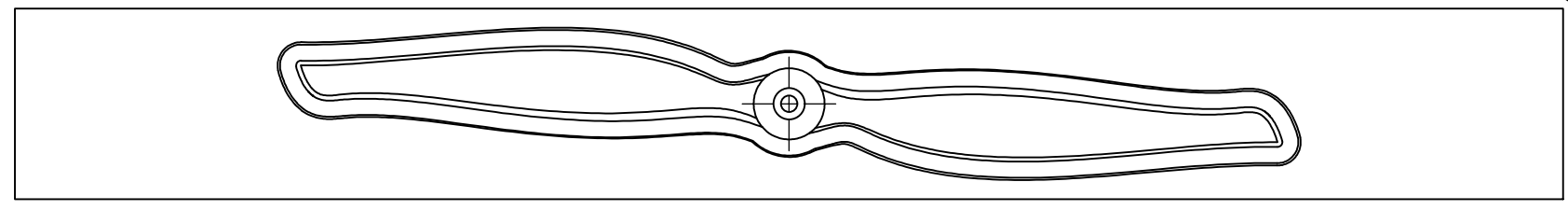
N9



Observación: Maquinado CNC

Trat. Térmico:	Ninguno	E.P.N	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento:	Ninguno		Dib.:	Peralta, G
MATERIAL:	M.C YUTE-POLYESTER	Tol. Gral.: ±0,05	Dis.:	Peralta, G
		Escala:	Rev.:	Ing.Rodriguez P., PhD.
Propela APC 12*6 EP		CNC - 01	Fecha: 27-7-22	

N9



Observación: Maquinado CNC

Trat. Térmico:	Ninguno	E.P.N	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA				
Recubrimiento:	Ninguno		Dib.:	Peralta, G			
MATERIAL:	ALUMINIO A36	Tol. Gral.:	±0,05	Escala:	1:1	Dis.:	Peralta, G
						Rev.:	Ing.Rodríguez P., PhD.
BASE DE PROPELA				CNC - 02		Fecha:	
						27-7-22	