



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**PROYECTO TÉCNICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

TEMA:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE VEHÍCULO
IMPULSADO POR VIENTO PARA EL LABORATORIO DE FÍSICA DE LA
CARRERA DE MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”

AUTOR: Israel Santiago Ballesteros Sisa

TUTOR: Ing. Gonzalo Eduardo López Villacis, Mg.

AMBATO - ECUADOR

Marzo - 2023

CERTIFICACIÓN

En mi calidad de tutor del Proyecto Técnico, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE VEHÍCULO IMPULSADO POR VIENTO PARA EL LABORATORIO DE FÍSICA DE LA CARRERA DE MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”** elaborado por el Sr. Israel Santiago Ballesteros Sisa, portador de la cédula de ciudadanía: 1804762787-7, estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente proyecto técnico es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Esta concluido en su totalidad.

Ambato, marzo 2023



Ing. Gonzalo Eduardo López Villacis, Mg.

TUTOR

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Yo, **Israel Santiago Ballesteros Sisa**, con C.I.: 180476278-7 declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente proyecto técnico con el tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE VEHÍCULO IMPULSADO POR VIENTO PARA EL LABORATORIO DE FÍSICA DE LA CARRERA DE MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”**, así como también tablas, criterios, ideas, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del proyecto, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, marzo 2023



Israel Santiago Ballesteros Sisa

C.I. 180476278-7

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Proyecto Técnico o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi proyecto técnico, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, marzo 2023



Israel Santiago Ballesteros Sisa

C.I. 180476278-7

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Proyecto Técnico, realizado por el estudiante Israel Santiago Ballesteros Sisa de la Carrera de Ingeniería Mecánica bajo el tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE VEHÍCULO IMPULSADO POR VIENTO PARA EL LABORATORIO DE FÍSICA DE LA CARRERA DE MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”**

Ambato, marzo 2023

Para constancia firman:



Ing. Diego Fernando Núñez Núñez MSc.

MIEMBRO CALIFICADOR



Ing. Mg. Santiago Paul Cabrera Anda

MIEMBRO CALIFICADOR

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación está dedicado a Dios por guiarme y darme sabiduría para cumplir mi objetivo de ser ingeniero mecánico. A mis padres que me ayudaron en cada peldaño de mi instrucción académica y me enseñaron a no rendirme frente a las dificultades, aunque uno ya no esté presente siempre estará acompañándome desde el cielo. Ellos me acompañaron en los malos y buenos momentos de mi vida ayudándome a convertirme en un mejor ser humano.

A mi tío por apoyarme y ayudare a culminar el proyecto más importante hasta el momento de mi carrera universitaria.

Por último, agradezco a toda mi familia por estar a mi lado de manera incondicional y siempre demostrarme que la familia s el pilar fundamental en la vida, gracias a todos por estar a mi lado en este largo y difícil camino.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por toda la ayuda que me brindo hasta llegar al final de mi carrera.

En segundo, a mis padres y familia, que siempre han estado a mi lado en los buenos y malos momentos, siendo un soporte fundamental en mi formación académica ya que gracias a ellos he logrado cumplir mis objetivos.

A mis queridos abuelos, aunque algunos ya no se encuentren presentes siempre me cuidaron y guiaron.

Agradezco al Ing. Gonzalo López por ser una persona paciente y compartir conocimientos para lograr el objetivo la culminación de mi trabajo de titulación.

Al final, agradezco a todas las personas que colaboran en la elaboración de mi trabajo de titulación con algún consejo o aporte para su culminación.

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO I.....	1
1 MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Antecedentes investigativos	1
1.2. Marco Teórico	4
1.2.1. Black Bird	4
1.2.2. Aerodinámica	5
2.2.2. Potencial Eólico en Ecuador	7
2.2.5. Vehículo impulsado por viento (dinámica longitudinal)	10
2.3. Objetivos	18
2.4.1. Objetivo General	18
2.4.2. Objetivos Específicos	18

CAPITULO II:.....	19
2 METODOLOGÍA.....	19
3.1. Materiales.....	22
3.2. Metodología.....	31
3.2.1. Bibliográfica.....	31
3.2.2. Proceso experimental.....	31
3.2.3. Investigación de campo.....	31
CAPITULO III.....	32
3 RESULTADOS.....	32
4.1. Analisis de resultados.....	32
4.1.1. Diseño de engranajes helicoidales de ejes oblicuos.....	32
4.1.2. Análisis de eficiencia.....	58
4.1.3. Pruebas de funcionamiento.....	63
CAPITULO IV.....	65
5.1. Conclusiones.....	65
5.2. Recomendaciones.....	66
Referencias.....	67
ANEXOS.....	71
Figuras del prototipo y modelo original.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Elementos empleados para el diseño del Blackbird.....	22
Tabla 2.- Elementos empleados para el rediseño del Blackbird.....	26
Tabla 3.- Comparativa de esfuerzos, factor de seguridad y deformación.....	57
Tabla 4.- Ensayo de avance	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Sistema de ejes y connotación de fuerzas aerodinámicas.	6
Figura 2.- Potencial eléctrico del Ecuador....	9
Figura 3.- Registro de velocidad del viento.	10
Figura 4.- Curva de Durst para las equivalencias entre las diferentes velocidades. .	10
Figura 5.- Esquemático de dinámica longitudinal de un vehículo terrestre.....	11
Figura 6.- Características de un perfil aerodinámico	13
Figura 7.- Condiciones de velocidad antes y después del paso del fluido a través del area de acción de la hélice.....	13
Figura 8.- Velocidades y fuerzas sobre un elemento de aspa.....	14
Figura 9.- Coeficiente de fuerza.	16
Figura 10.- Modelo CAD desarrollado por Xyla Foxlin.....	19
Figura 10.- Modelo CAD desarrollado por el autor	20
Figura 10.- Diagrama para el desarrollo del proyecto de investigación	21
Figura 13.- Diseño del modelo de engrane a desarrollar	33
Figura 14.- Factor dinámico para el diseño de engranes.	40
Figura 15.- Factor de alineación.	42
Figura 16.- Factor de correlación	42
Figura 17.- Factor de sobrecarga	43
Figura 18.- Factor de confiabilidad	43
Figura 19.- Material base de los engranes	44
Figura 20.- Factor de vida para el diseño de engranes.	47
Figura 21.- Factor de ciclos de esfuerzo para el diseño de engranes.	48
Figura 22.- Propiedades de material de las piezas impresas (PLA-PA6)	51
Figura 23.- Propiedades de material de las piezas impresas (Aleación de Aluminio)	51

Figura 24.- Fuerzas aplicadas al modelo.....	51
Figura 25.- Fuerzas aplicadas al modelo.....	52
Figura 26.- Mallado del modelo	52
Figura 27.- Análisis estructural del modelo	53
Figura 28.- Análisis estructural del modelo	53
Figura 29.- Esfuerzo máximo del modelo.....	53
Figura 30.- Análisis estructural de los engranes.....	54
Figura 31.- Análisis estructural de los engranes.....	54
Figura 32.- Esfuerzo equivalente.....	55
Figura 33.- Analisis del esfuerzo (esfuerzo máximo).....	55
Figura 34.- Análisis de las ruedas.....	56
Figura 35.- Factor de seguridad del modelo.....	56
Figura 36.- Factor de seguridad del modelo.....	57
Figura 37.- Velocidad máxima del viento en Ambato.....	62

RESUMEN

Cabe señalar que se han realizado muchas investigaciones sobre vehículos de energía eólica en la última década y se han presentado una gran cantidad de publicaciones científicas. Sin embargo, desarrollar un prototipo requiere muchos cálculos y fabricación. Por tal motivo, el presente trabajo de investigación tuvo como objetivo diseñar y construir un prototipo de vehículo de propulsión eólica para el laboratorio de física de la carrera de mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, mediante el cual se pueda determinar que un vehículo de propulsión eólica puede superar la velocidad del viento. La metodología utilizada fue de carácter bibliográfico-experimental, por lo que el modelo consistió en un trazado y/o carcasa que sirvió de base a una hélice conectada a las ruedas del vehículo que empleó una transmisión de engranajes helicoidales, de manera que cuando el vehículo avanzaba, de ser así, la hélice gira de una manera que proporciona tracción que acelera el vehículo en presencia de energía del viento de cola, lo que explica el mecanismo de conversión de energía. El modelo desarrollado muestra datos de deformación por debajo del promedio, exhibiendo una eficiencia muy alta, siendo esta del 74,01 por ciento

Palabras Clave: Momento, vehículo impulsado por viento, hélice, engranes helicoidales

ABSTRACT

It should be noted that a lot of research has been done on wind energy vehicles in the last decade and a large number of scientific publications have been presented. However, developing a prototype requires a lot of calculations and manufacturing. For this reason, the aim of this research work was to design and build a prototype of a wind-powered vehicle for the physics laboratory of the mechanics course at the Technical University of Ambato, by means of which it can be determined that a wind-powered vehicle can overcome the speed of the wind. The methodology used was of a bibliographic-experimental nature, so the model consisted of a layout and/or casing that served as the basis for a propeller connected to the wheels of the vehicle that used a helical gear transmission, so that when the vehicle advanced, if so, the propeller rotates in a way that provides traction that accelerates the vehicle in the presence of tailwind energy, which explains the mechanism of energy conversion. The developed model shows below average deformation data, exhibiting a very high efficiency of 74,01 percent.

Keywords: Momentum, wind-driven vehicle, propeller, helical gears.

CAPÍTULO I

1 MARCO TEÓRICO

” DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE VEHÍCULO IMPULSADO POR VIENTO PARA EL LABORATORIO DE FÍSICA DE LA CARRERA DE MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”

1.1. Antecedentes investigativos

Blackford [1] en su trabajo de investigación bajo el tema; the physics of a push-me pull-you boat aseveró que las leyes básicas de conservación de la masa, energía y el momento fueron aplicadas a un novedoso modelo de embarcación acuática, misma que es impulsada por el viento. Dentro del trabajo desarrollado se encontró una condición crítica que debe cumplirse para que la embarcación acelere contra el viento, y también se muestran expresiones para calcular la velocidad final. La denotada embarcación posee una hélice de tipo eólico conectada a través de un eje recto a una hélice submarina. La energía cinética extraída del viento por la hélice de aire es utilizada por la hélice de agua para mover la embarcación directamente contra el viento.

Como es notorio, la idea general es establecer como un vehículo impulsado por el viento puede superar este impulso. Situación que, al tener un conocimiento sobre las leyes de conservación de la energía y el momento, se puede acotar que se están violando estas leyes. Sin embargo, al momento de analizar este concepto de manera consistente existe una condición crítica a dominar si se desea alcanzar este efecto. Existe un tamaño relativo de las dos hélices que debe cumplirse para que el barco se mueva contra el viento, incluso para hélices ideales. También que la velocidad máxima alcanzable en condiciones ideales es el doble de la velocidad del viento. Los valores con base en las dimensiones del modelo fueron las siguientes; una hélice de aeromodelo de 36 cm de diámetro (expuesta al viento) y otra de 10 cm (submarina); ambas conectadas por un eje de acero inoxidable de 65 cm x 3,2 mm montado (eje inclinado a 22° con respecto a la horizontal). Según el autor, el rendimiento puede optimizarse probando hélices de distinto paso. El modelo diseñado produjo un empuje neto hacia adelante de casi 1 N en una velocidad de viento de 5 m/s proporcionada por

un ventilador doméstico. El investigador aseveró de igual manera que un vehículo con ruedas también podría ser impulsado contra el viento acoplando el eje de la hélice a las ruedas. La velocidad máxima alcanzable, en condiciones ideales, se espera sea igual al doble de la velocidad del viento.

En su trabajo de investigación, Gur [2] pudo desarrollar un método simple y efectivo para estimar la eficiencia máxima disponible de una hélice. El método de asimilación incluye pérdidas axiales, circunferenciales y de arrastre en los cálculos, lo que permite una estimación realista de la eficiencia máxima de la hélice y su comportamiento bajo diversos estímulos. El método se basa en la llamada formulación de Glauert y se extiende a la hélice real mediante la regresión de los resultados conocidos de la literatura. El modelo final incluye una estimación del arrastre medio de la pala, así como otros parámetros integrales, como el diámetro de la hélice, el factor de actividad y el coeficiente de sustentación de diseño integrado. Usando este coeficiente de arrastre promedio, se puede estimar una amplia gama de geometrías de hélice con buena precisión para la máxima eficiencia disponible.

En términos simples, el documento presenta un método semianalítico para evaluar el rendimiento de una hélice determinada. La geometría de una hélice se define en términos de sus principales propiedades integrales: diámetro, el factor de actividad o solidez y el coeficiente de sustentación de diseño integrado; utilizando estos parámetros y las condiciones de vuelo, es decir, la relación de avance y el coeficiente de potencia, se puede encontrar la máxima eficiencia disponible para una hélice y estimar su empuje máximo producido. La formulación de Glauert utiliza el arrastre promedio de la pala como parámetro de entrada y describe cómo se puede estimar este parámetro mediante la regresión de la eficiencia de la hélice. Esta regresión muestra una buena relación entre el producto del coeficiente de empuje y el coeficiente de sustentación de diseño integrado con el coeficiente de arrastre medio. Sin embargo, el coeficiente de empuje es un parámetro de resultado. Para evitar el proceso iterativo, se requiere una formulación alternativa que utilice el coeficiente de rendimiento y la relación de alimentación. El coeficiente de arrastre medio de la pala se utilizó como parámetro de la calidad aerodinámica de la hélice. Este parámetro es desconocido para el diseñador y el método presentado proporciona una buena aproximación al mismo. Además, la incertidumbre del modelo presentado se resuelve fácilmente mediante un

coeficiente de seguridad de coeficiente de arrastre medio generoso con un efecto razonable en el resultado final.

Según Sadak, *et al.*, [3] la crisis energética, la preocupación por el medio ambiente y la escasez de combustibles convencionales han aumentado el interés por la ingeniería verde. El uso de la energía eólica para producir energía con el propósito de propulsar un vehículo es una de estas aplicaciones de la ingeniería que se encuentran actualmente en desarrollo. Sin embargo, llegado a este punto es fundamental identificar si al momento de poner a prueba un modelo de vehículo se dispone de un viento uniforme sobre una superficie plana.

Se puede aseverar que en la última década se han llevado a cabo muchas investigaciones sobre el vehículo impulsado por el viento; actualmente denominado como Down Wind Faster Than The Wind (DWFTTW). Es por este motivo que los investigadores de este particular trabajo se orientaron a desarrollar un mecanismo de conversión de energía por medio de una hélice permita alcanzar una velocidad superior a la proporcionada por el viento mismo. El diseño del prototipo consta de una hélice conectada a las ruedas del vehículo (transmisión por cadena/correa) de modo que cuando el vehículo avanza, la hélice gira generando un empuje que acelera el vehículo. En concreto, se centra en la hélice de eje horizontal de un vehículo de cola para que tenga un movimiento relativo con el viento a una velocidad superior a la del viento. En consecuencia, a esta aseveración, es necesario reconocer que no existe un límite superior definido para los vehículos de este tipo. Es decir, en la medida en que se mejoren las eficiencias, las velocidades también aumentarían de forma no sintética. Durante el desarrollo del prototipo los investigadores denotan que los cálculos muestran que es posible ir a favor del viento incluso a 2,5 veces la velocidad del viento en un vehículo de propulsión eólica (situación ideal). Para lograr esta particular eficiencia es necesario emplear una hélice de paso variable para que, variando el ángulo de paso, se pueda mantener un ángulo de ataque óptimo (relación máxima entre sustentación y resistencia) en las palas de la hélice al variar la velocidad del vehículo.

1.2. Marco Teórico

1.2.1. Black Bird

Blackbird es un vehículo experimental propulsado por el viento, construido en 2010 para demostrar que es posible que un vehículo de este tipo vaya directamente a favor del viento y en consecuencia pueda superar tal velocidad. Este prototipo emplea un rotor conectado a las ruedas y no tiene motor, batería ni volante de inercia. El primer constructor fue Rick Cavallaro y John Borton, de Sportvision, con el patrocinio de Google y Joby Energy en asociación con el departamento de aeronáutica de la Universidad Estatal de San José. En una prueba supervisada y reconocida por la North American Land Sailing Association en julio de 2010, Cavallaro alcanzó una velocidad de 44,6 km/h (27,7 mph) navegando directamente a favor del viento con vientos de 16 km/h (10 mph): casi tres veces la velocidad del viento [4]. En 2012, Blackbird también demostró navegar directamente a favor del viento con el doble de velocidad del viento [5].

Para comprender el funcionamiento del modelo es necesario recordar que los vehículos propulsados por rotor son vehículos propulsados por el viento que utilizan rotores en lugar de velas. Estos elementos pueden tener una cubierta a su alrededor (ventilador) o constituir una hélice no conducida, y que pueden ajustar su orientación para enfrentarse al viento aparente. El rotor puede estar conectado mediante un tren de transmisión a las ruedas o a un generador que suministra energía eléctrica a los motores eléctricos que accionan las ruedas [6]. Por otro lado, un vehículo con un rotor de palas conectado mecánicamente a las ruedas puede diseñarse para ir a una velocidad superior a la del viento, tanto directamente contra el viento como directamente a favor del viento. A favor del viento, el rotor funciona como una turbina eólica que impulsa las ruedas. A favor del viento, funciona como una hélice, impulsada por las ruedas. En ambos casos, la potencia procede de la diferencia de velocidad entre la masa de aire y el suelo, recibida por el rotor o las ruedas del vehículo [6].

En relación con el vehículo, tanto el aire como el suelo pasan hacia atrás. Sin embargo, si el viento sopla en contra, el aire llega al vehículo más rápido que el suelo, mientras que, si el viento sopla a favor más rápido que la velocidad del viento, el aire llega al vehículo más despacio que el suelo. En cada caso, el vehículo toma energía del medio

más rápido y la transmite al más lento: en contra del viento, toma energía del viento y la transmite a las ruedas y, a favor del viento, toma energía de las ruedas y la transmite al rotor, en cada caso de forma proporcional a la velocidad del medio en relación con el vehículo [7]. El rotor recoge la energía del aire que se aproxima e impulsa las ruedas, como lo haría una turbina eólica. A favor del viento, cuando el vehículo se desplaza a mayor velocidad que el viento, el suelo es el medio que se mueve más rápido en relación con el vehículo, por lo que las ruedas recogen la energía y la transmiten al rotor, que propulsa el vehículo.

1.2.2. Aerodinámica

Se puede aseverar que la aerodinámica es la ciencia que estudia el flujo de aire y es por este motivo que teóricamente hablando esto tiene un impacto significativo en el diseño del vehículo (sin importar la tipología del vehículo), ya que puede reducir el consumo de combustible y mejorar el comportamiento direccional a altas velocidades [5]. Un vehículo tiene buena aerodinámica cuando proporciona la menor resistencia posible [8]. La resistencia del vehículo se expresa mediante el coeficiente de resistencia C_x . Un valor de C_x igual a 1 es igual a una superficie plana frente al aire. Cuanto menor sea el valor C_x de un vehículo, mejor será su aerodinámica. Un valor de 0,30 corresponde a un buen coeficiente aerodinámico y corresponde a una gota de agua, por lo que alguna vez se intentó copiar esta cifra en el diseño de carrocerías [9]. Los pequeños complementos de un automóvil, como los retrovisores, las antenas, las tiras decorativas o los tiradores de las puertas, tienen un efecto negativo en la aerodinámica y, por lo tanto, son objeto de una investigación especial en este ámbito. La instalación de alerones permite evitar un impacto en movimiento sobre uno de los ejes del vehículo a altas velocidades, cuando las fuerzas aerodinámicas cambian significativamente [10].

Es por este motivo que los fabricantes de todo el mundo invierten mucho tiempo y dinero en pruebas y prototipos para desarrollar un vehículo que combine la estética y la ingeniería para ofrecer un producto deseable y de bajo consumo de combustible, un costo que forma parte del valor final del automóvil [11]. Según Brugarolas [12] es necesario recordar que cuando se inventó el automóvil, se pensó solo como un medio de transporte y la velocidad alcanzada dependía solo del desplazamiento y la potencia

del motor. Sin embargo, a finales del siglo XIX y principios del XX, los esfuerzos de los fabricantes se centraron en desarrollar y optimizar los componentes mecánicos de un automóvil (motor y transmisión); pero la estética también jugaba un papel fundamental, ya que los vehículos tenían un chasis indeterminado sobre el que se montaban tres o cuatro ruedas con el motor, la caja de cambios y su dirección asociada. Todo esto estaba respaldado por una carrocería de moda, generalmente diseñada por carroceros y con fines más estéticos que técnicos. El diseño de un automóvil moderno está influenciado fundamentalmente por la forma de su carrocería, que afecta tanto al aprovechamiento de la potencia desarrollada por el motor como a la estabilidad del vehículo a altas velocidades [13].

Cabe señalar que cualquier sistema de carga se puede reducir a una fuerza y un momento que actúan en un punto, cuyas componentes dependen del sistema de ejes elegido como referencia. En aerodinámica, cuando se calcula el efecto del viento sobre un cuerpo sometido a un flujo constante con velocidad, se suelen utilizar dos marcos de referencia; siempre y cuando el origen está unido al cuerpo [14]. La dirección y el patrón de velocidad incidente U en el eje x . Por el contrario, en el eje z se encuentra en un plano vertical y forma un ángulo con el eje x , y el eje y es definido de tal manera que el sistema de ejes forma un triángulo rectángulo; tal y como se muestra en la figura mostrada a continuación. En el segundo sistema de referencia (los ejes de la carrocería), el eje x se alinea en la dirección preferida de la carrocería (como la cuerda o el eje longitudinal del vehículo), y los otros dos ejes, el z y el y , se definen como tal. Ese conjunto también forma un triángulo rectángulo en el que el eje z está dirigido hacia la normal superior local [14].

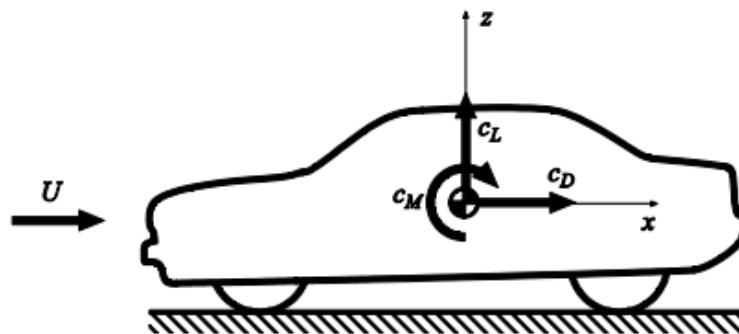


Figura 1.- Sistema de ejes y connotación de fuerzas aerodinámicas. [14]

Las estimaciones de la fuerza resultante en los ejes se dan como arrastre para la proyección del eje x (paralelo al flujo incidente), elevación para la proyección del eje z (perpendicular al flujo incidente) y fuerza lateral para el eje y; utilizando la nomenclatura aeronáutica para los componentes del movimiento, estos son momento de balanceo (eje X), momento de guiñada (eje Z) y momento de cabeceo (eje Y). A partir de las ecuaciones de Navier-Stokes [15], sujetas a una serie de condiciones que limitan su alcance, se puede inferir que a bajas velocidades se puede establecer una relación simple entre la velocidad y la presión a lo largo de la trayectoria recorrida por la partícula de fluido. Esta relación es la ecuación de Bernoulli, que, a lo largo de una línea de corriente, conecta la presión constante P_v y la velocidad V en un punto del campo de flujo con las relaciones de presión y velocidad P_u y U que prevalecen corriente arriba que se alejan de cuerpo. La ecuación se detalla a continuación.

$$P_v + \frac{\rho V^2}{2} = P_u + \frac{\rho U^2}{2} = P_R \quad (\text{Ecu. 1})$$

Donde

ρ = densidad del fluido

P_R = presión de remaso (zona en la cual el flujo se desprende debido al cambio de dirección)

Nota: Esta expresión se mantiene con una corriente en situaciones en las que se puede suponer que el flujo de aire es potencial y la velocidad del fluido es menor que la del sonido, como es el caso de los vehículos. Una excepción son las capas límite y los vórtices que se forman debajo de los cuerpos, donde la viscosidad del aire ($17,2 \eta / \mu\text{Pa}\cdot\text{s} - 13,43 \nu / \text{mm}^2/\text{s}$), aunque relativamente pequeña, juega un papel importante y el flujo ya no es posible [16].

2.2.2. Potencial Eólico en Ecuador

El potencial eólico en Ecuador es de gran importancia en el contexto de proyectos ya implementados, puesto que existen varios parques eólicos. El mayor potencial se encuentra en la región central del país (sierra); con valores que superan los 6 m/s en

algunos meses, midiendo 80 m de altura. Por otro lado, los vientos predominantes en todo el país son los alisios, que vienen del este y soplan en todo el continente [17]. El contorno de Ecuador divide al país en cuatro zonas climáticas claramente definidas que le otorgan características especiales. De este a oeste, estas son las siguientes regiones:

- La región oriental o amazónica se ve afectada por una disminución de la velocidad del viento, especialmente en los niveles inferiores, debido a la orografía y ecosistema de la región.
- En la región de la Sierra, el aire puede acelerarse y, debido a su ubicación geográfica a lo largo de los Andes, también comprimirse, fenómeno conocido en física de flujo como efecto Venturi.
- En la región costera, donde hay una interacción entre los vientos alisios del este y las dos circulaciones locales, la combinación del viento global con el viento local conduce a una mayor variación espacial en el recurso y la ubicación de la región de alta velocidad.
- Las Islas Galápagos tienen un viento global que no es tan perturbado como en el continente. Debido al carácter volcánico del archipiélago, las laderas son imponentes y forman un laberinto en el que el viento converge y diverge (acelera y frena) en un espacio relativamente pequeño, cambiando de dirección al mismo tiempo [17].

A continuación, se muestra una proyección del potencial eólico que se puede aprovechar en las diferentes provincias del Ecuador según el Balance Energético Nacional del Ecuador. La generación eléctrica es 56,23% hidráulica, 0,26% eólica, 0,33% fotovoltaica, 1,79% biomasa y 0,09% biogás generando 3.325,39 MW para un total de 4.726,39 MW de energía renovable frente a un escenario de energía no renovable del 41,3% [18].

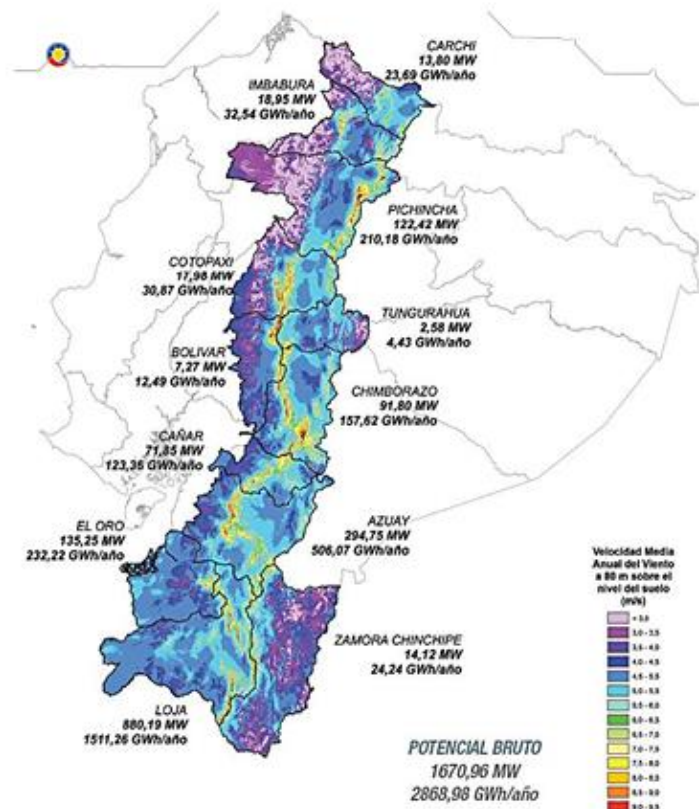


Figura 2.- Potencial eléctrico del Ecuador. [18]

2.2.4.1. Velocidad del Viento

La velocidad base del viento corresponde a un valor de referencia internacional especificado en los estándares para eventos de viento y se determina a partir de registros históricos de velocidades máximas diarias, mensuales, anuales y medias medidas en las estaciones de la red meteorológica y climática [19]. En los parámetros técnicos, debido a la naturaleza turbulenta del flujo de aire, no se utilizan valores instantáneos de velocidad, sino valores medios en diferentes intervalos de tiempo o periodos. Estos valores deben ser anexados con la probabilidad de no superar la velocidad máxima esperada. Cabe aclarar que, en aras de la sencillez, dado que no se trata de una definición estricta, se utiliza como exceso de probabilidad anual el recíproco del período medio de retorno [20].

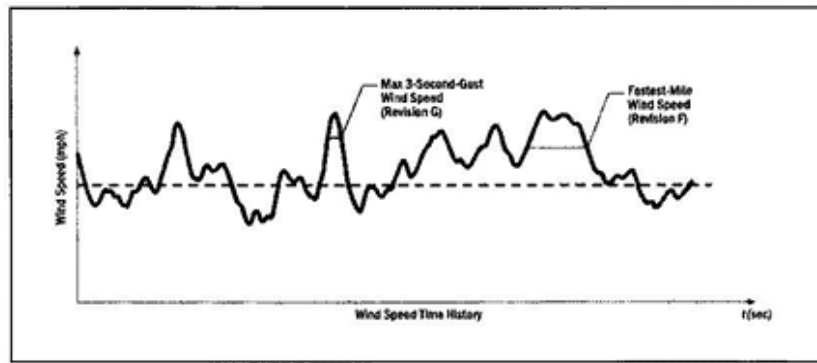


Figura 3.- Registro de velocidad del viento. [21]

De acuerdo con De la Rosa et al., [22] varios estudios meteorológicos han demostrado que en regiones extratropicales, sobre un terreno horizontal de rugosidad uniforme ya una altitud dada, la velocidad del viento varía de manera comprobada en función del intervalo medio. Por tanto, para obtener velocidades de viento uniformes con diferentes periodos medios, se utiliza la curva de Durst [Durst, C.S. (1960)]. En necesario destacar que si se analiza la curva presentada continuación se puede determinar el valor máximo de las velocidades del viento para el período promedio durante el cual estas fueron registradas y/o procesadas.

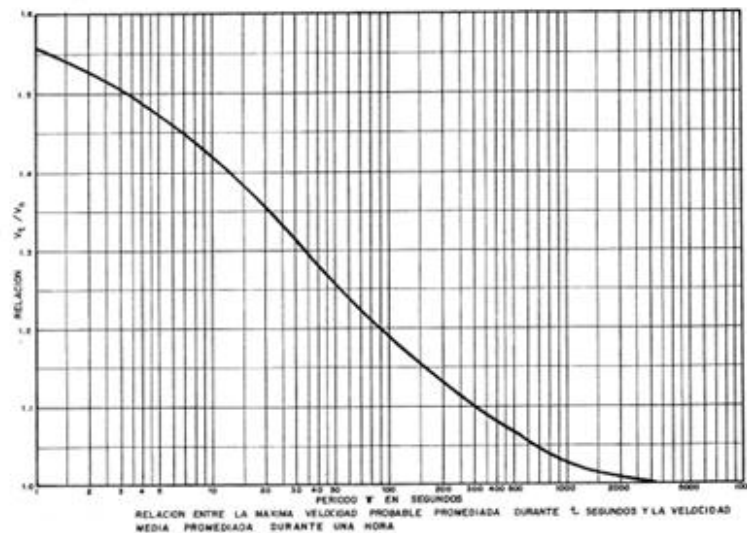


Figura 4.- Curva de Durst para las equivalencias entre las diferentes velocidades. [21]

2.2.5. Vehículo impulsado por viento (dinámica longitudinal)

Según Figueroa [23] la aerodinámica de vehículos terrestres es la ciencia que se ocupa de las fuerzas y el movimiento resultante de los vehículos terrestres en el aire. Al

estudiar objetos de este tipo, es importante tener un modelo que sirva de base para describir las fuerzas que actúan sobre ellos. En este sentido, la tierra es el modelo de la dinámica longitudinal de los vehículos, que define las fuerzas propulsoras que vencen las fuerzas de arrastre que se oponen al desplazamiento del vehículo para avanzar.

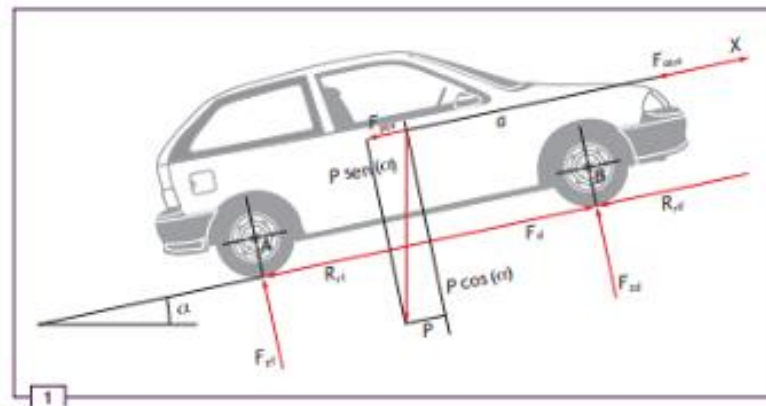


Figura 5.- Esquemático de dinámica longitudinal de un vehículo terrestre. [23]

Las fuerzas empleadas para dicho movimiento se enlistan a continuación:

F_d (fuerza de tracción de las Ruedas): La velocidad de las ruedas está determinada por la suma de dos movimientos simultáneos. Estos son el movimiento de rotación con respecto a su eje y el movimiento de traslación en el suelo. Estos a su vez producen dos fuerzas que ponen en movimiento la rueda, a saber, la fuerza tangencial y la fuerza adhesiva.

F_{zt} y F_{zd} (Fuerzas de reacción de las ruedas): La dirección de estas reacciones es perpendicular al suelo y su magnitud corresponde a la componente de peso (α) distribuida a cada rueda.

F aire (fuerza de resistencia aerodinámica): La fuerza ejercida por el aire contra el movimiento; esta se determina mediante la siguiente expresión:

$$F_{aire} = P_s * A_f * C_x \quad (Ecu. 2)$$

Donde

P_s : presión superficial del aire

A_f : área frontal del vehículo

C_d : coeficiente de arrastre

Por otro lado, la presión superficial del aire puede ser detallada por la siguiente expresión:

$$0,5 * \rho * v^2 \quad (\text{Ecu. 3})$$

F pte (fuerza de resistencia debido a la pendiente): Esto se debe a las dificultades que presenta un plano inclinado como consecuencia de la carga componente que crea. Esta fuerza se ejerce sobre el centro de gravedad del vehículo.

Rrd y Rrt (resistencia a la rodadura): Estas magnitudes se producen cuando la rueda está rodando o cuando la superficie sobre la que se apoya se deforma, aunque sea levemente.

2.2.5.1. Propulsión por medio de hélice

A lo largo de la historia, desde Arquímedes hasta la actualidad, se sabe que muchos sistemas de propulsión han utilizado principios aerodinámicos fundamentales específicos al momento de su aplicación en campo; motivo por el cual es necesario identificar las siguientes instancias.

Aerodinámica de Hélices

La hélice consta de un número variable de palas distribuidas alrededor de la circunferencia del cubo de la hélice. La sección transversal de cada pala está formada por un conjunto de aletas aerodinámicas, situadas una detrás de otra a lo largo de toda la envergadura de la pala, cuyo ángulo de incidencia varía desde la base hasta la punta. En general, un perfil aerodinámico tiene dos secciones: un extradós o región de baja presión y un intradós o región de alta presión. Es la distribución de presión que ocurre

alrededor del perfil aerodinámico cuando interactúa con un fluido en movimiento lo que conduce a la aparición de fuerzas de sustentación y arrastre en el perfil aerodinámico. La figura 6.- muestra las partes típicas de un perfil aerodinámico [24].

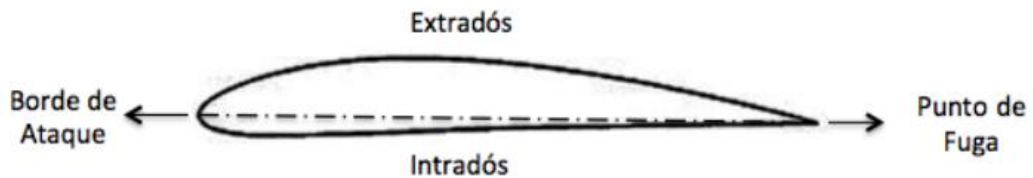


Figura 6.- Características de un perfil aerodinámico. [23]

Los coeficientes de sustentación y arrastre de un perfil aerodinámico dependen principalmente de dos variables; el ángulo de ataque del perfil aerodinámico con respecto a la velocidad del perfil aerodinámico y el número de Reynolds. En general, la eficiencia de un perfil aerodinámico en términos de sustentación es proporcional al número de Reynolds a lo largo del perfil aerodinámico [25].

Propulsión de una Hélice

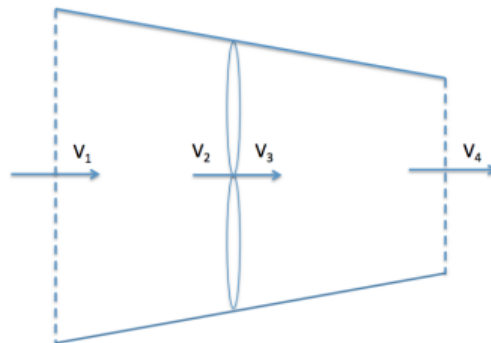


Figura 7.- Condiciones de velocidad antes y después del paso del fluido a través del área de acción de la hélice. [23]

El movimiento de la hélice se basa principalmente en los principios de conservación de la energía y el impulso. A medida que gira la hélice, se realiza un trabajo sobre el fluido que fluye a través de ella, acelerándolo desde el borde de ataque del perfil aerodinámico en el plano delantero de la hélice hasta un punto de fuga detrás de la hélice [26]. Este cambio en el movimiento del fluido bajo la acción de la hélice se debe

principalmente a la distribución de presión creada por la geometría del perfil aerodinámico. Zang [27], aseveró que con base en segunda ley de Newton y la conservación del momento, la fuerza generada por una hélice es proporcional al flujo másico que pasa por su área de acción y al cambio de velocidad del fluido, es decir:

Donde:

$$T = m \cdot (V_4 - V_1) \quad (\text{Ecu. 4})$$

$$m = \rho AV_2$$

$$V_1 = V_\infty$$

$$V_2 = V_3 = V_1(1 + a)$$

$$V_4 = V_1(1 + b) \quad (\text{Ecu. 5})$$

Las variables a y b corresponden a los coeficientes de interferencia axial y onda de la hélice, respectivamente. De acuerdo con el principio del movimiento axial, el coeficiente es igual al doble del coeficiente de interferencia axial, es decir, $b = 2a$

Análisis de Rendimiento de una Hélice

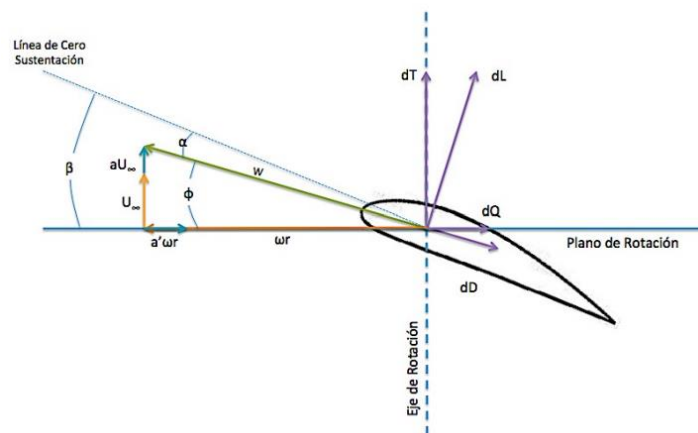


Figura 8.- Velocidades y fuerzas sobre un elemento de aspa. [28]

La teoría del elemento de pala es una herramienta relativamente simple para los cálculos teóricos del rendimiento de varias turbomáquinas, incluidas las hélices. En este método, las palas de la hélice se dividen en un número finito e independiente de palas a lo largo de todo el tramo. En cada sección, se realiza un balance de fuerzas para determinar los componentes diferenciales de empuje y par generados por las fuerzas de sustentación y arrastre en el perfil aerodinámico, que se calculan utilizando los valores correspondientes de los coeficientes de sustentación y arrastre correspondientes a un perfil aerodinámico bidimensional. Esto significa que esta teoría no tiene en cuenta los efectos secundarios de la inducción de la velocidad del flujo debido a los vórtices de la punta y los efectos de la inducción radial debido a la aceleración angular de la hélice. De manera similar, los principios de conservación del momento axial y angular se aplican a cada elemento de la pala [29].

Teoría del Elemento de Aspa

De acuerdo con el principio del elemento de pala y con base en la figura mostrada a continuación, la diferencia de empuje y momento angular para el elemento de pala se da como:

$$\frac{dT}{dr} = \frac{dL}{dr} \cos \phi - \frac{dD}{dr} \sin \phi = \frac{dL}{dr} \cos \phi (1 - \varepsilon \tan \phi) \quad (\text{Ecu. 6})$$

$$\frac{1}{r} \frac{dQ}{dr} = \frac{dL}{dr} \sin \phi + \frac{dD}{dr} \cos \phi = \frac{dL}{dr} \sin \phi (1 + \varepsilon / \tan \phi) \quad (\text{Ecu. 7})$$

Donde

$$\frac{dL}{dr} = \frac{1}{2} C_l \rho B c W^2$$

$$\frac{dD}{dr} = \frac{1}{2} C_d \rho B c W^2 \quad (\text{Ecu. 8})$$

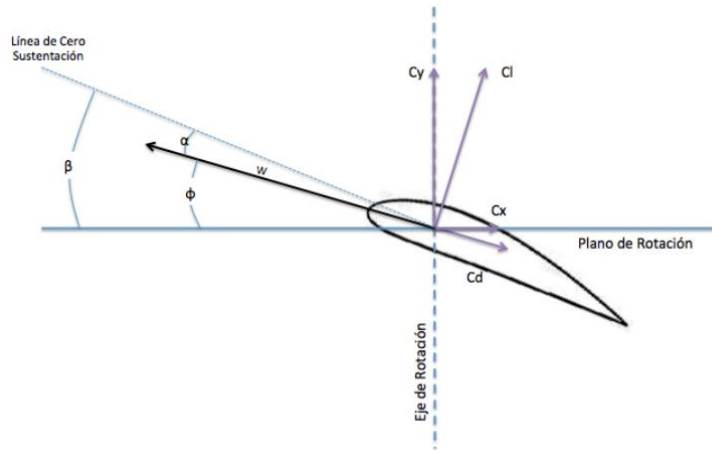


Figura 9.- Coeficiente de fuerza. [28]

Con base a estas ecuaciones, se especifican los coeficientes de fuerza C_y y C_x , los cuales se definen como:

$$C_y = C_1 \cos \phi - C_d \sin \phi = C_1 (\cos \phi - \varepsilon \sin \phi) \quad (\text{Ecu. 9})$$

$$C_x = C_1 \sin \phi + C_d \cos \phi = C_1 (\sin \phi + \varepsilon \cos \phi) \quad (\text{Ecu. 10})$$

Ley de Conservación del Momentum

De manera similar, de acuerdo con la ley de conservación del momento, la diferencia entre el empuje y el par en el elemento de pala de la sección está dada por:

$$\frac{dT}{dr} = 2\pi r \rho V_2 (2V_1 a F) = 4\pi r \rho V_{\infty}^2 a (1+a)r \quad (\text{Ecu. 11})$$

$$\frac{1}{r} \frac{dQ}{dr} = 2\pi r \rho V_2 (2\omega r a' F) r = 4\pi r \rho U_{\infty} \omega a' (1+a)r^2 \quad (\text{Ecu. 12})$$

El factor se incluye con el fin de corregir las pérdidas en la punta del aspa descritas por Prandtl. Este factor está dado por:

$$F = \frac{2}{\pi} \text{Cos}^{-1}(\exp^{-f}) \quad (\text{Ecu. 13})$$

$$f = \frac{B}{2} \frac{1 - \varepsilon}{\sin\phi_{tip}} \quad (Ecu. 14)$$

$$\varepsilon = \frac{r}{R} \quad (Ecu. 15)$$

Sin embargo, para determinar estas diferencias, primero es necesario conocer los valores de los coeficientes de interferencia axial y tangencial y el valor de la velocidad efectiva resultante en el elemento de pala [30]. Dado que los valores de la diferencia de empuje y momento angular, determinados por los principios de los elementos de la pala y la ley de conservación del momento, deben ser equivalentes y es por medio de estos que se obtienen las siguientes expresiones (coeficientes de interferencia axial y tangencial).

$$a = \frac{\sigma K}{(F + \sigma K)} \quad (Ecu. 16)$$

$$a' = \frac{\sigma K'}{(F + \sigma K')} \quad (Ecu. 17)$$

$$K = \frac{C_y}{(4\sin^2\phi)} \quad (Ecu. 18)$$

$$K' = \frac{C_x}{(4\cos\phi\sin\phi)} \quad (Ecu. 19)$$

$$\sigma = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (Ecu. 20)$$

Según estas ecuaciones, los coeficientes de interferencia axial y tangencial están relacionados con la magnitud del ángulo. Por definición para el caso específico de las hélices, este ángulo es:

$$\phi = \beta - \alpha \quad (Ecu. 21)$$

El procedimiento que debe realizarse para calcular la eficiencia parcial de cada elemento de pala es variar el valor del ángulo de ataque de la superficie aerodinámica en el rango en el que proporciona sustentación. En la región donde la relación entre el coeficiente de sustentación y el ángulo de ataque es lineal, hay elementos separados para cada pala a lo largo del tramo. Cada ángulo de ataque determina el rendimiento parcial del elemento de la hélice para diferentes puntos de funcionamiento de la hélice [31]. Finalmente, por integración numérica sobre toda la longitud de la pala, se determinan los valores totales de empuje y par generado por la hélice. Para este proceso, es importante conocer el comportamiento de las superficies aerodinámicas utilizadas en el diseño de la hélice en términos de coeficientes de sustentación y arrastre en función de una amplia gama de ángulos de ataque y para diferentes valores de Reynolds [32].

2.3.Objetivos

2.4.1. Objetivo General

- Diseñar y construir un prototipo de vehículo impulsado por viento para el laboratorio de física de la carrera de mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

2.4.2. Objetivos Específicos

- Sustentar teóricamente las implicaciones que trae el diseño de un prototipo de vehículo impulsado por viento.
- Diseñar el modelo de vehículo con el propósito generar un prototipo acorde a características óptimas de diseño.
- Establecer una comparativa de los resultados obtenidos en campo al respecto del desarrollo matemático.

CAPITULO II:

2 METODOLOGÍA

En este apartado se enlistan cada uno de los pasos llevados a cabo para la elaboración de presente trabajo de investigación. El prototipo a desarrollar es un rediseño del Blackbird que tiene como propósito demostrar que un vehículo impulsado por viento es capaz de superar dicha velocidad por medio de ciertas adecuaciones al modelo original. En este caso en particular se tomó como referencia el modelo desarrollado por Veritasium en compañía con la diseñadora Xyla Foxlin.

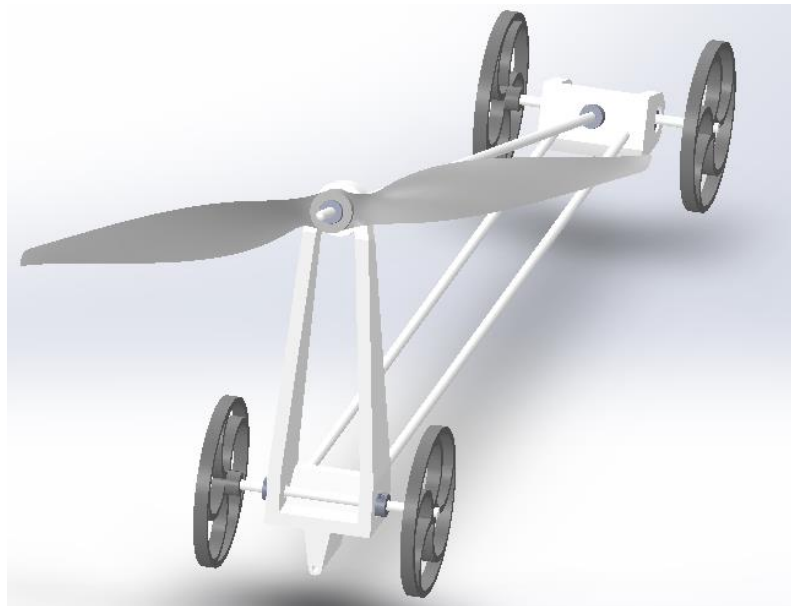


Figura 10.- Modelo CAD desarrollado por Xyla Foxlin

El modelo detallado consta de un cuerpo triangular unido por un gearbox; en cuyo interior descansa un arreglo de engranes rectos de relación 1:1. El conjunto de engranes piñón-rueda tiene la función de recolectar el torque generado por las ruedas e impulsarlo hacia la hélice y viceversa. Sin embargo, el modelo desarrollado tiene como punto de convergencia el mismo gearbox con la diferencia de que en su interior el arreglo consta de un modelo engranajes helicoidales de ejes oblicuos de relación 1:1. Otro punto en discrepancia es la geometría del modelo; en este caso particular el modelo tiene una forma rectangular que generó un redimensionamiento total del modelo original.

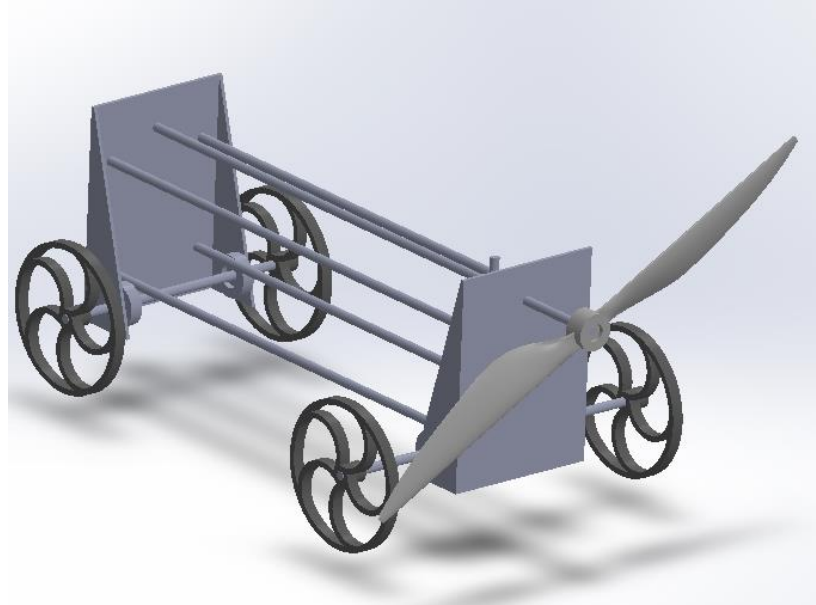
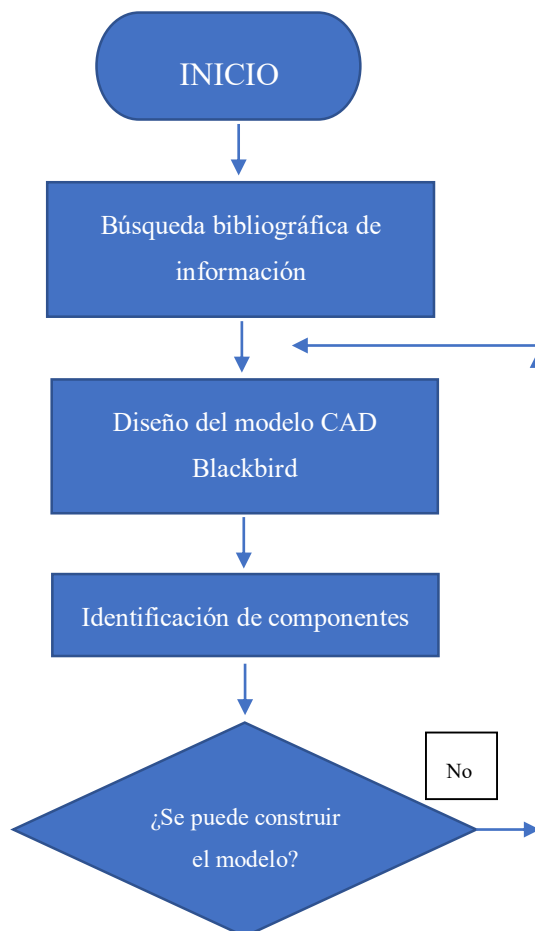


Figura 11.- Modelo CAD desarrollado por el autor

Es menester acotar que el diseño únicamente se efectuará para el modelo desarrollado por el autor; en consecuencia, se enlistan las partes, elementos y/o componentes empleados en la ejecución del presente trabajo de investigación. Sin embargo, en primera instancia se enlista el diagrama de flujo para el proceso de construcción, ensamble y análisis del rediseño del Blackbird.



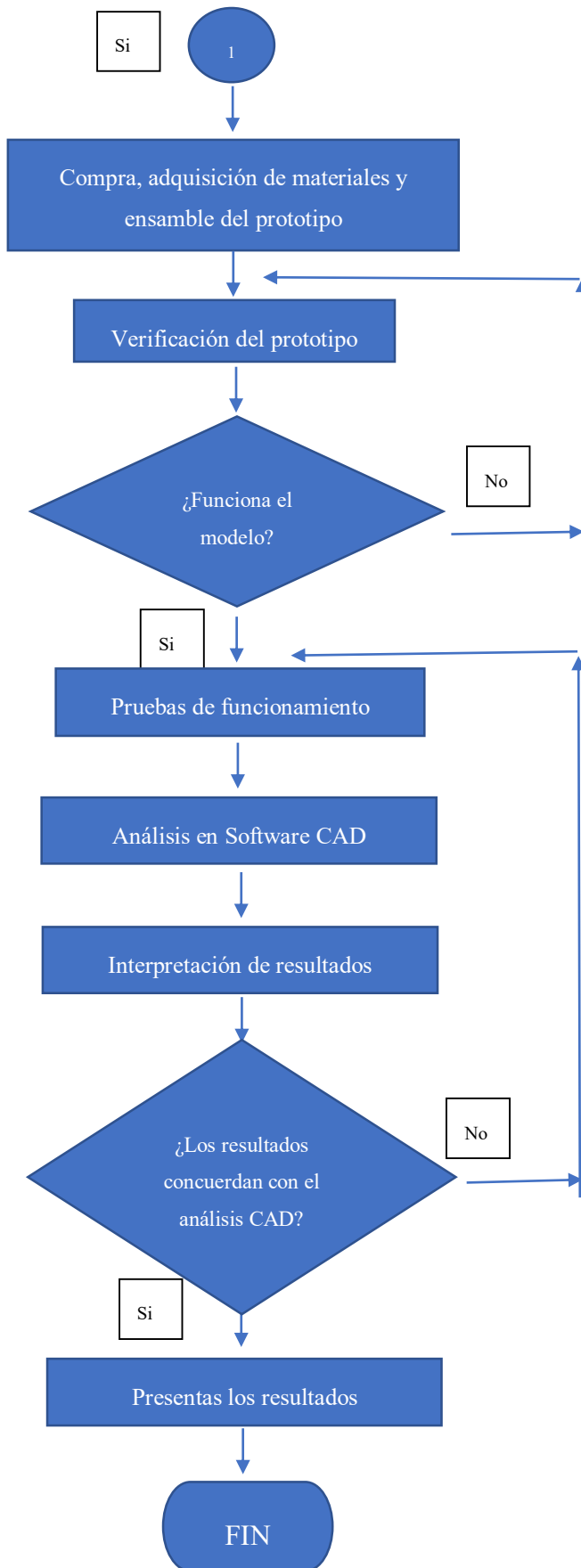
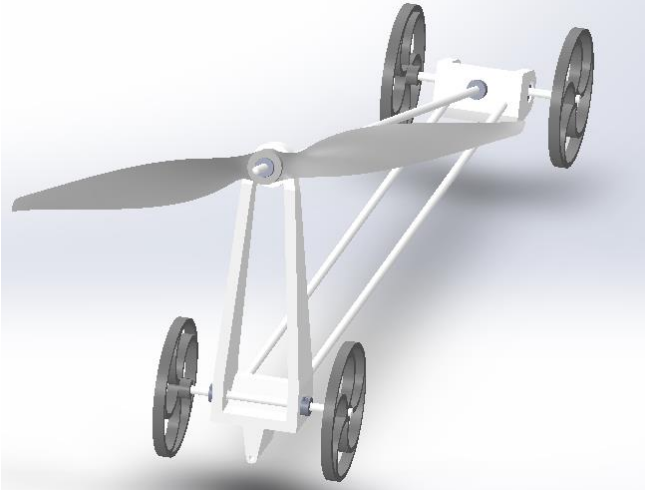
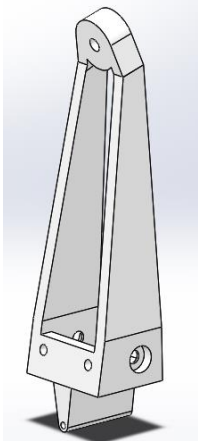


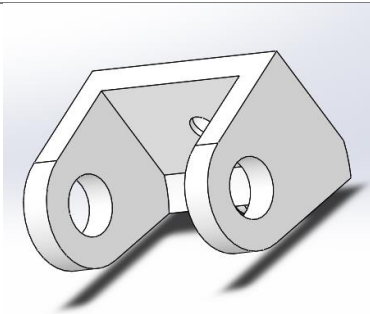

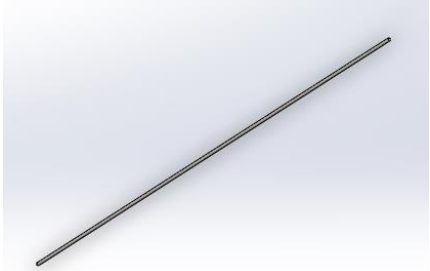
Figura 12.- Diagrama para el desarrollo del proyecto de investigación

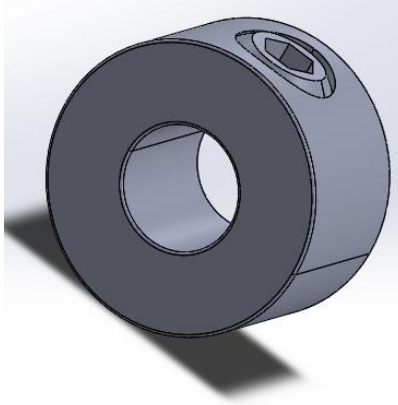
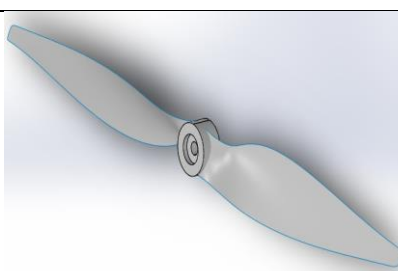
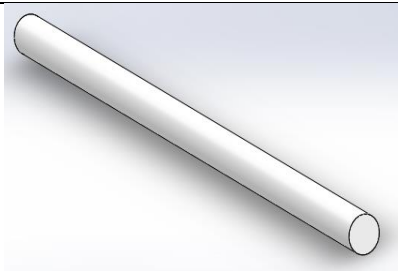
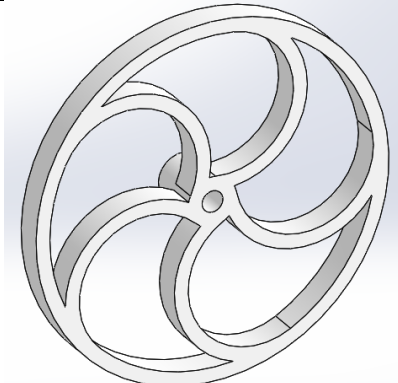
3.1. Materiales

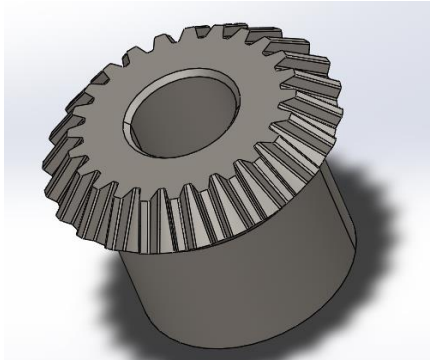
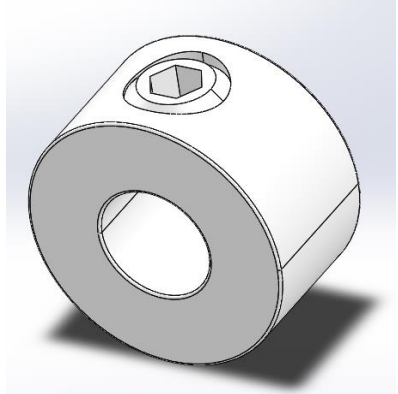

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación fue necesario emplear los siguientes elementos; los cuales se enlistan a continuación. Sin embargo, se plantea un rediseño al modelo original con el propósito de mantener la velocidad del prototipo.

Tabla 1.- Elementos empleados para el diseño del Blackbird

#	Elemento	Imagen	Detalle	Cantidad
PROTOTIPO BLACKBIRD				
				
1	Cuerpo		Plástico ABS Impresión 3D	1

#	Elemento	Imagen	Detalle	Cantidad
PROTOTIPO BLACKBIRD				
2	Gearbox		Plástico ABS Impresión 3D	2
3	Largueros		Aluminio EN AW 2011	2
4	Larguero Aspa		Aluminio EN AW 2011	1

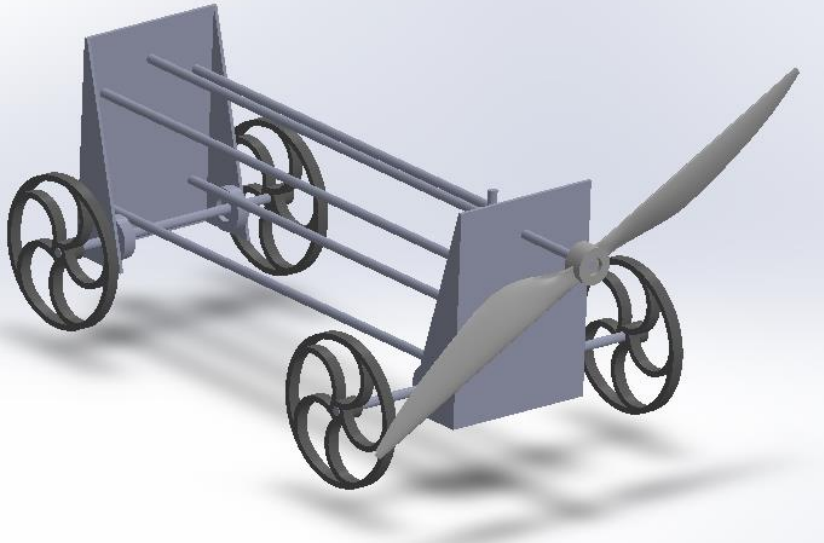
#	Elemento	Imagen	Detalle	Cantidad
PROTOTIPO BLACKBIRD				
5	Buje		Plástico ABS Impresión 3D	6
6	Aspa		Plástico ABS Impresión 3D	1
7	Lateral Ruedas		Aluminio EN AW 2011	2
8	Ruedas		Caucho	4

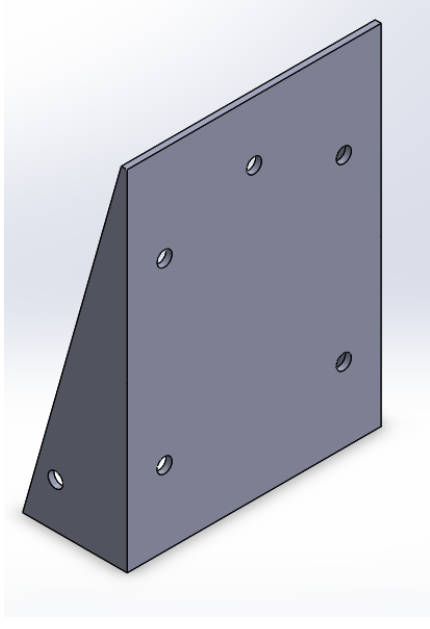
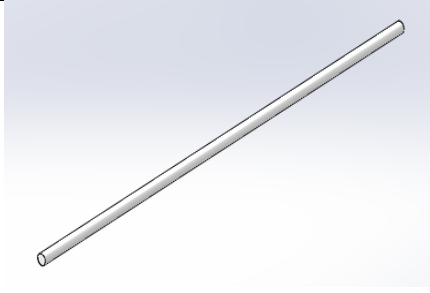
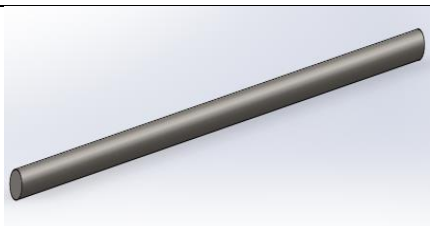
#	Elemento	Imagen	Detalle	Cantidad
PROTOTIPO BLACKBIRD				
9	Engrane		Plástico ABS Impresión 3D	2
10	Buje Ruedas		Plástico ABS Impresión 3D	1
Elementos de puesta en Marcha				
11	Caminadora		Varios	1

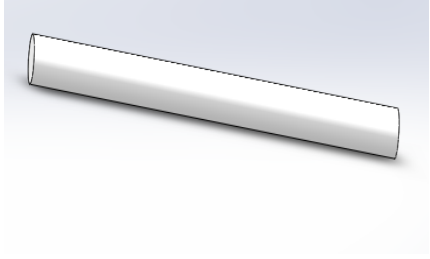
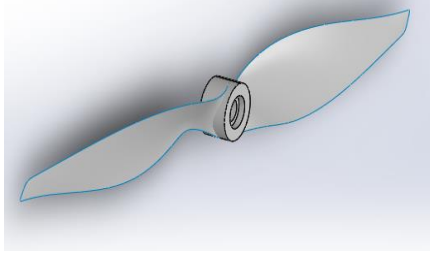
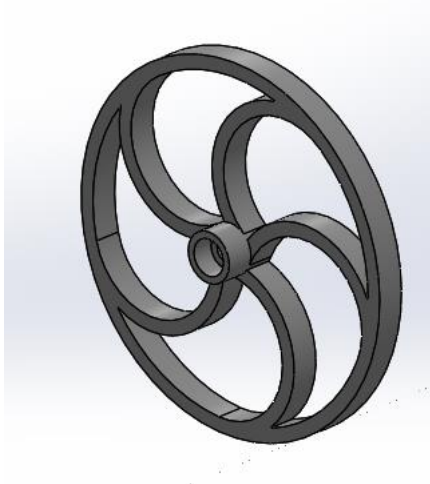
#	Elemento	Imagen	Detalle	Cantidad
PROTOTIPO BLACKBIRD				
13	Pantalla Led de Visualización		Cable de comunicación RS422	1

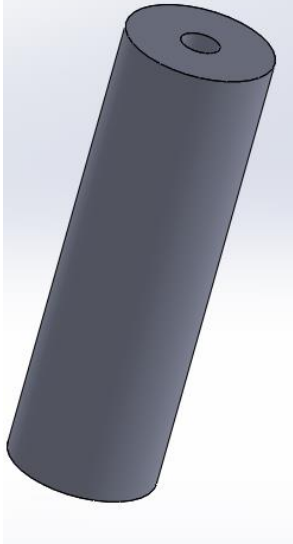
A continuación, se muestra el modelo rediseñado del presente trabajo de investigación:

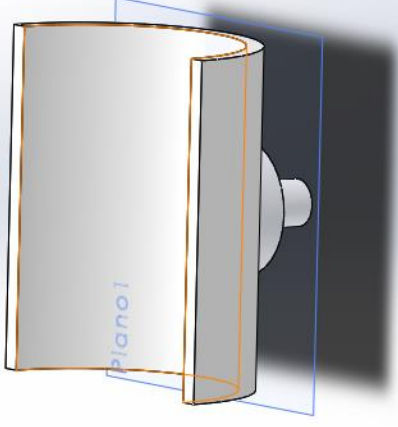


Tabla 2.- Elementos empleados para el rediseño del Blackbird

#	Elemento	Imagen	Detalle	Cantidad
PROTOTIPO BLACKBIRD				
				

#	Elemento	Imagen	Detalle	Cantidad
PROTOTIPO BLACKBIRD				
1	Pieza Cuerpo		Aluminio EN AW 2011	1
2	Barras Longitudinales		Aluminio EN AW 2011	2
3	Barra Aspa		Aluminio EN AW 2011	1

#	Elemento	Imagen	Detalle	Cantidad
PROTOTIPO BLACKBIRD				
4	Barra Lateral Trasera		Aluminio EN AW 2011	2
5	Aspa		Madera	6
6	Ruedas		Caucho Teflón	4

#	Elemento	Imagen	Detalle	Cantidad
PROTOTIPO BLACKBIRD				
7	Eje Engranés		Aluminio EN AW 2011	1
8	Engranés		Acero A36 Manufacturado	4

#	Elemento	Imagen	Detalle	Cantidad
PROTOTIPO BLACKBIRD				
9	Soporte Eje		Plástico ABS Impresión 3D	1
Elementos de puesta en Marcha				
11	Caminadora		Varios	1
12	Pantalla Led de Visualización		Cable de comunicación RS422	

3.2. Metodología

3.2.1. Bibliográfica

Esta investigación de igual manera se caracterizó por poseer un desarrollo enmarcado en el diseño documental-bibliográfico pues busca en primera instancia sustentar teóricamente las implicaciones que trae consigo el diseño y construcción de un prototipo de vehículo que es capaz de superar la velocidad de viento una vez este haya alcanzado un tiempo determinado. Es por este motivo que cada información debió ser documentada y obtenida de trabajos de índole científica. Lo que se buscó por medio de esta investigación documental fue determinar, la importancia de la energía, velocidad y sus respectivas consideraciones. Por lo tanto, es necesario determinar la conservación de la energía mecánica o en su defecto por qué esto no se produce. El abordaje de esta temática puede ser desarrollado por medio de ecuaciones cinéticas del movimiento y los conceptos de energía cinética y potencial [33].

3.2.2. Proceso experimental

De manera similar la investigación propuesta en este documento se orientó sobre un diseño experimental. La idea general fue determinar bajo qué circunstancias el diseño de prototipo puede operar como el original. Los parámetros a contemplar dentro de esta tipología de indagación son la geometría de las aspas, la velocidad alcanzada y el diseño de cuerpo o estructura base. Es necesario mencionar que el diseño del modelo en primera instancia fue un diseño triangular y su rediseño de orientará hacia un modelo rectangular.

3.2.3. Investigación de campo

El proceso y/o investigación de campo fue efectuado por medio de una serie de ensayos en los cuales se involucró al diseño propuestos con el propósito de obtener una medición exacta de su velocidad, misma que debió ser censada por medio de un elemento LDR fotorresistencia conectado a la máquina caminadora.

CAPITULO III

3 RESULTADOS

4.1. Analisis de resultados

Como es previsto, para determinar el comportamiento del vehículo es necesario emplear una serie de ecuaciones con el propósito de testear los parámetros de diseño y desde luego lograr establecer un arreglo eficiente entre los cálculos y los ensayos de campo. En primera instancia partiremos de la relación de transmisión entre los engranes para el rediseño. Estos valores y/o parámetros se enlistan a continuación:

4.1.1. Diseño de engranajes helicoidales de ejes oblicuos.

Para el diseño de los engranes es importante identificar una serie de valores iniciales, mismos que pueden haber sido empleados para el diseño del modelo y/o arreglo de engranes.

Datos

D_e = Diámetro exterior

D_i = Diámetro interior

D_{ev} = Diámetro base

d_p = diámetro de paso

Z = Numero de dientes

α_a = Ángulo de presión aparente

H = Paso de hélice

t_{ad} = espesor angular del diente

Υ = Angulo entre dientes

Para realizar los cálculos de los engranajes helicoidales de ejes oblicuos o cruzados se debe tener en cuenta los ángulos de hélice de los engranajes y para ellos debemos empezar seleccionando esos ángulos y para ello lo hacemos tomando los datos de ángulo de hélice 1 a 60° y el ángulo de hélice 2 tomamos de 30° , estos datos se toman para que los dientes se puedan cruzar y transmitir el movimiento de manera correcta.

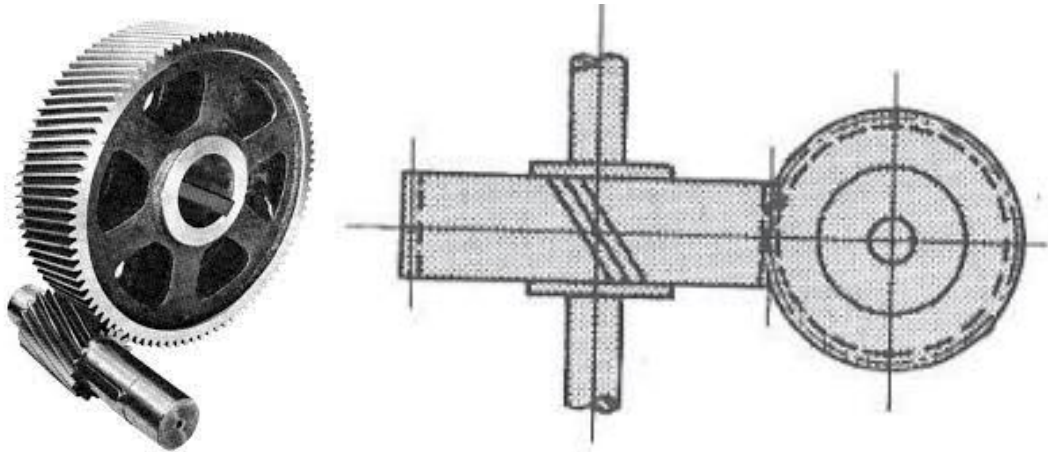


Figura 13.- Diseño del modelo de engrane a desarrollar

$$De = 18 \text{ mm} = 0.7087 \text{ in}$$

$$\text{Angulo de presion } \alpha = 20^\circ$$

$$\text{Angulo de helice } \beta = 60^\circ$$

En primera instancia consideramos que los ángulos de presión y hélice conciernen a los valores de 20 y 60 grados respectivamente. Por otro lado, empezamos por calcular el valor del diámetro exterior, sin embargo, para obtener dicha magnitud se calcula la relación de distribución de carga, misma que se hace referencia en la ecuación 22.

$$m_n = \frac{d_p}{Z} * \cos\beta \quad \phi = \beta - \alpha$$

$$De = \frac{m_n * Z}{\cos\beta} + 2m_n$$

$$m_n = \frac{De * \cos\beta}{Z + 2\cos\beta} \quad (\text{Ecu. 22})$$

$$m_n = \frac{18 * \cos 60}{11 + 2 * \cos 60}$$

$$m_n = 0.75$$

Obtenido el valor de la distribución de carga, se puede considerar el cálculo del diámetro de paso.

$$d_p = \frac{m_n * Z}{\cos\beta} \quad (\text{Ecu. 23})$$

$$d_p = 16.5\text{mm} = 0.6496\text{in}$$

$$\alpha_a = \tan^{-1} \left(\frac{\tan\alpha}{\cos\beta} \right)$$

$$\alpha_a = \tan^{-1} \left(\frac{\tan 20}{\cos 60} \right)$$

$$\alpha_a = 36.0523^\circ$$

A continuación, se determina el diámetro base para el arreglo de engranes, la ecuación se enlista como la ecuación 24 del presente trabajo de investigación.

$$Dev = d_p * \cos\beta \quad (\text{Ecu. 24})$$

$$Dev = 16.5 * \cos 60$$

$$Dev = 13.3399\text{mm}$$

De manera similar se procede al cálculo del diámetro interior, la ecuación se expresa a continuación:

$$Di = d_p - 2.5mn \quad (Ecu. 25)$$

$$Di = 16.5 - 2.5 * 0.75$$

$$Di = 14.625mm$$

Es necesario mencionar que como cálculo subsecuente se identifica el valor del ángulo entre dientes, espesor angular del diente y por último el espesor angular del diente del arreglo de engranes.

$$\text{Ángulo entre dientes } \gamma = \frac{360}{Z} \quad (Ecu. 26)$$

$$\gamma = \frac{360}{11}$$

$$\gamma = 32.7272^\circ$$

$$tad = \frac{\gamma}{2} \quad (Ecu. 27)$$

$$tad = \frac{32.7272}{2}$$

$$tad = 16.3636^\circ$$

$$H = \frac{d_p * \pi}{\tan\beta} \quad (Ecu. 28)$$

$$H = \frac{16.5 * \pi}{\tan 60}$$

$$H = 29.9277mm$$

Es menester acotar que cada uno de los valores identificados se encuentran en el sistema internacional. Sin embargo, la aplicabilidad es convertido a pulgadas para la simplicidad de fórmulas. Por último, procedemos a ingresar los valores determinados con antelación.

$$De = 9.5 mm = 0.3740 in$$

$$\text{Angulo de presion } \alpha = 20^\circ$$

$$\text{Angulo de helice } \beta = 30^\circ$$

$$m_n = \frac{d_p}{Z} * \cos\beta$$

$$De = \frac{m_n * Z}{\cos\beta} + 2m_n$$

$$m_n = \frac{De * \cos\beta}{Z + 2\cos\beta}$$

$$m_n = \frac{12 * \cos 30}{7 + 2 * \cos 30}$$

$$m_n = 0.9421$$

$$d_p = \frac{m_n * Z}{\cos\beta}$$

$$d_p = 7.6149mm = 0.2998in$$

De igual manera calculamos el valor del ángulo de presión aparente por medio de la ecuación 29 expuesta a continuación. En contraste con los cálculos anteriores, varias magnitudes son determinadas para el piñón.

$$\alpha_a = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \alpha}{\cos \beta} \right) \quad (\text{Ecu. 29})$$

$$\alpha_a = \tan^{-1} \left(\frac{\tan 20}{\cos 30} \right)$$

$$\alpha_a = 22.7959^\circ$$

$$Dev = d_p * \cos \beta \quad (\text{Ecu. 30})$$

$$Dev = 7.6149 * \cos 60$$

$$Dev = 7.0201 \text{mm}$$

$$Di = d_p - 2.5mn$$

$$Di = 7.6149 - 2.5 * 0.75$$

$$Di = 5.25965 \text{mm}$$

$$\text{Angulo entre dientes } \gamma = \frac{360}{Z}$$

$$\gamma = \frac{360}{8}$$

$$\gamma = 51.4286^\circ$$

Determinamos el valor del espesor angular del diente por medio de la ecuación 31.

$$tad = \frac{\gamma}{2} \quad (\text{Ecu. 31})$$

$$tad = \frac{51.4286}{2}$$

$$tad = 25.7143^\circ$$

$$H = \frac{d_p * \pi}{\tan\beta}$$

$$H = \frac{7.6149 * \pi}{\tan 30}$$

$$H = 41.4357mm$$

4.1.1.1. Diseño de los engranes

El diseño de engranes posee las siguientes consideraciones a la par de una nomenclatura específica.

W^t = carga transmitida

F = ancho del diente

Y = factor de forma de Lewis

P = Paso diametral

σ = esfuerzo

Q_v = Numero de nivel de exactitud de transmisión

K_v = Factor dinámico

K_o = factor de sobre carga

K_s = Factor de tamaño

K_B = factor del espesor del aro

K_m = Factor de distribución de la carga

J = Factor geométrico

K_r = Factor de confiabilidad

K_t = Factor de temperatura

Sc = Esfuerzos de contacto permisibles

ZN = Factor de vida

CH= factor de relación de dureza

SH = Factor de seguridad

El primer cálculo ejercido consiste en determinar la carga transmitida al conjunto de engranes en conjunto con el paso diametral. Ecuaciones 32 y 33; donde Z representa el número de dientes y dp el diámetro de paso.

$$W^t = \frac{\sigma * F * Y}{K_v * P} \quad (\text{Ecu. 32})$$

$$P = \frac{Z}{d_p} \quad (\text{Ecu. 33})$$

$$P = \frac{11}{0.6496in}$$

$$P = 16.93$$

En relación a los cálculos anteriores determinamos el factor de Lewis por medio de las ecuaciones mostradas a continuación:

$$Y = \frac{2}{3}x * P \quad (\text{Ecu. 34})$$

$$x = \frac{t^2}{4l} \quad (\text{Ecu. 35})$$

$$l = \frac{1}{P} + \frac{1.25}{P} \quad (\text{Ecu. 36})$$

A continuación, determinamos el factor geométrico de resistencia a la picadura con el propósito de concretar el factor de Lewis.

$$l = \frac{2.25}{16.96}$$

$$l = 0.1329 \text{ in}$$

$$x = \frac{0.07874^2}{4 * 0.1329}$$

$$x = 0.01166 \text{ in}$$

$$Y = \frac{2}{3} * 0.01166 * 16.93$$

$$Y = 0.1316$$

Una vez identificado el factor de Lewis procedemos a trabajar en la gráfica del factor dinámico de AGMA 2001-D04. En este punto tomamos la curva del número del nivel de precisión Q_v de 6 unidades debido al nivel de precisión que requerimos para el arreglo de engranes a la par de una velocidad en la línea de paso de 2000 pies/min.

$$Q_v = 6$$

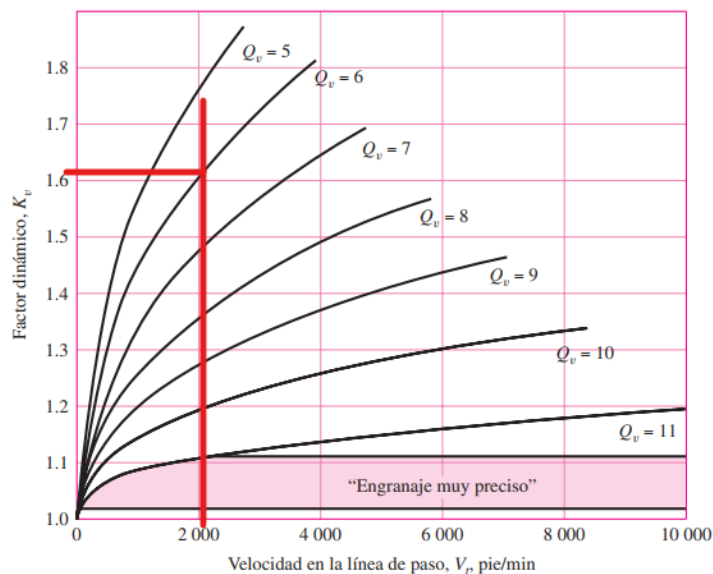


Figura 14.- Factor dinámico para el diseño de engranes. [34]

$$K_v = 1.6$$

Desde este punto reemplazamos los datos anteriormente obtenidos hasta determinar el valor de la carga transmitida.

$$W^t = \frac{12000 * 0.4724 * 0.1316}{1.6 * 16.93}$$

$$W^t = 27.54 \text{ lbf}$$

A continuación, procedemos a determinar el factor de distribución de carga, tomado las siguientes consideraciones.

- C_{mc} igual a la unidad para dientes sin coronar
- Factor de proporción el piñón c_{pf} siendo $F \leq 1$ pulg
- C_{pm} (modificador de proporción del piñón) igual a uno para piñón montado por separado.

$$K_m = C_{mf} = 1 + C_{mc}(C_{pf} * C_{pm} + C_{ma} * C_e) \quad (Ecu. 37)$$

$$C_{mc} = 1$$

$$C_{pf} = \frac{F}{10d_p} - 0.025 \quad (Ecu. 38)$$

$$C_{pf} = \frac{0.47244}{10 * 0.6496} - 0.025$$

$$C_{pf} = 0.0477$$

$$C_{pm} = 1$$

El cálculo del factor de alineación de acoplamiento es calculado por medio de la ecuación 39 a la par de las consideraciones de la figura mostrada a continuación.

$$C_{ma} = A + BF + CF^2 \quad (Ecu. 39)$$

Condición	A	B	C
Engranajes abiertos	0.247	0.0167	-0.765(10 ⁻⁴)
Unidades comerciales, cerradas	0.127	0.0158	-0.930(10 ⁻⁴)
Unidades de precisión, cerradas	0.0675	0.0128	-0.926(10 ⁻⁴)
Unidades de precisión extrema, cerradas	0.00360	0.0102	-0.822(10 ⁻⁴)

Figura 15.- Factor de alineación. [34]

$$A = 0.247 ; B = 0.0167; C = -0.765 * 10^{-4}$$

$$C_{ma} = 0.247 + 0.0167 * 0.47244 + (-0.765 * 10^{-4} * 0.47244^2)$$

$$C_{ma} = 0.2549$$

La consideración del C_e (Factor de corrección de la alineación del acoplamiento) viene dado por la siguiente consideración

$$C_e = \begin{cases} 0.8 & \text{para engranajes ajustados durante el ensamble o si la} \\ & \text{compatibilidad se mejora mediante lapeado, o ambos} \\ 1 & \text{para todas las otras condiciones} \end{cases}$$

Figura 16.- Factor de correlación [34]

Es necesario señalar que no se considera que la compatibilidad de los engranes será mejorada mediante un lapeado, por ende; consideramos para todas las consideraciones.

$$C_e = 1$$

$$K_m = 1 + 1(0.0477 * 1 + 0.2549 * 1)$$

Agregamos los valores anteriormente determinamos para concretar el resultado.

$$K_m = 1.3026$$

Por otro lado, procedemos a calcular el esfuerzo de flexión para los engranes. Es importante efectuar las siguientes consideraciones. El factor K_s (factor de tamaño) puede ser tomado como uno si al calcularlo con su ecuación este es inferior a la unidad.

En consecuencia, tomaremos este como uno. Además, el factor de sobrecarga K_o es igual a la unidad al considerar un impacto uniforme.

Máquina impulsada			
Fuente de potencia	Uniforme	Impacto moderado	Impacto pesado
Uniforme	1.00	1.25	1.75
Impacto ligero	1.25	1.50	2.00
Impacto medio	1.50	1.75	2.25

Figura 17.- Factor de sobrecarga [34]

$$K_s = 1$$

$$K_o = 1$$

El factor de confiabilidad K_R puede ser definido por medio de una ecuación características, sin embargo, al asimilar una confiabilidad del 99% el valor es igual a uno. De igual manera el factor de temperatura se considera para temperaturas de aceite hasta 120° C.

Confiabilidad	$K_R (Y_Z)$
0.9999	1.50
0.999	1.25
0.99	1.00
0.90	0.85
0.50	0.70

Figura 18.- Factor de confiabilidad [34]

$$K_R = 1$$

$$K_t = 1$$

A continuación, calculamos el valor del esfuerzo de contacto en los engranes. Partiendo del factor de condición superficial; siendo un valor constante de 1.

$$\sigma = C_p \left(\frac{W^t K_o K_v K_s K_m C_f}{d_p F I} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ecu. 40})$$

$$C_f = 1$$

Por otro lado, es necesario identificar la materia base de los engranes, mis mismo que acero comercial.

Coefficiente elástico C_p [Z_E], $\sqrt{\text{psi}}$ ($\sqrt{\text{MPa}}$) Fuente: AGMA 218.01.

Material y módulo de elasticidad de la corona E_c , lbf/pulg ² (MPa)*							
Material del piñón	Módulo de elasticidad del piñón E_p psi (MPa)*	Acero 30×10^6 (2×10^5)	Hierro maleable 25×10^6 (1.7×10^5)	Hierro nodular 24×10^6 (1.7×10^5)	Hierro fundido 22×10^6 (1.5×10^5)	Bronce al aluminio 17.5×10^6 (1.2×10^5)	Bronce al estaño 16×10^6 (1.1×10^5)
Acero	30×10^6 (2×10^5)	2 300 (177)	2 180 (161)	2 160 (167)	2 100 (164)	1 950 (152)	1 900 (150)
Hierro maleable	25×10^6 (1.7×10^5)	2 180 (181)	2 090 (174)	2 070 (172)	2 020 (168)	1 900 (158)	1 850 (154)
Hierro nodular	24×10^6 (1.7×10^5)	2 160 (179)	2 070 (172)	2 050 (170)	2 000 (166)	1 880 (156)	1 830 (152)
Hierro fundido	22×10^6 (1.5×10^5)	2 100 (174)	2 020 (168)	2 000 (166)	1 960 (163)	1 850 (154)	1 800 (149)
Bronce al aluminio	17.5×10^6 (1.2×10^5)	1 950 (162)	1 900 (158)	1 880 (156)	1 850 (154)	1 750 (145)	1 700 (141)
Bronce al estaño	16×10^6 (1.1×10^5)	1 900 (158)	1 850 (154)	1 830 (152)	1 800 (149)	1 700 (141)	1 650 (137)

Relación de Poisson = 0.30.

*Cuando se obtienen valores del módulo de elasticidad más exactos mediante pruebas de contacto con rodillo, se podrán utilizar.

Figura 19.- Material base de los engranes [34]

$$C_p = 2300$$

Procedemos a determinar el factor geométrico I de engranes helicoidales tomando en consideración que son engranes externos. De igual manera se evalúa el paso base normal.

$$I = \frac{\cos \alpha_a \operatorname{sen} \alpha_a}{2m_N} + \frac{m_G}{m_G + 1} \quad (\text{Ecu. 41})$$

$$m_G = \frac{Z_1}{Z_2}$$

$$m_G = \frac{11}{7}$$

$$m_G = 1.57$$

$$p_N = \frac{\pi}{P} * \cos\alpha \quad (\text{Ecu. 42})$$

$$p_N = \frac{\pi}{16.93} * \cos 20$$

$$p_N = 0.1743$$

$$m_N = \frac{p_N}{0.95Z_r}$$

$$Z_r = [(r_2 + a)^2 - r_{b2}^2]^{1/2} + [(r_1 + a)^2 - r_{b1}^2]^{1/2} \quad (\text{Ecu. 43})$$

$$+ (r_2 + r_1)\text{sen}\alpha_a$$

$$r_b = r * \cos\alpha_a$$

$$r_{b1} = 0.2362 * \cos 22.7959$$

$$r_{b1} = 0.2177$$

$$r_{b2} = 0.35435 * \cos 36.0523$$

$$r_{b2} = 0.2865$$

$$a = \frac{1}{P} \quad (\text{Ecu. 44})$$

$$a = \frac{1}{16.93}$$

$$a = 0.059$$

$$Z_r = [(0.2362 + 0.059)^2 - 0.2177]^{1/2} + [(0.3544 + 0.059)^2 - 0.2865]^{1/2}$$

$$+ (0.2362 + 0.3544)\text{sen}36.0523$$

$$Z_r = 0.1498$$

$$m_N = \frac{0.1743}{0.95 * 0.1498}$$

$$m_N = 1.22$$

$$I = \frac{\cos 36.0523 \sin 36.0523}{2 * 1.22} * \frac{1.57}{1.57 + 1}$$

$$I = 0.1191$$

$$\sigma = 2300 \left(\frac{27.54 * 1 * 1.6 * 1 * 1.3026 * 1}{0.6496 * 0.4724 * 0.1191} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma = 71956.00381 \text{ psi}$$

En este punto se consideran los valores anteriormente mencionados con el propósito de identificar el esfuerzo permisible y el factor de seguridad de desgaste. Siendo necesario describir que S_c (resistencia a la fatiga superficial). H_b ; dureza Brinell.

$$S_H = \frac{\left(\frac{S_c Z_n C_H}{K_T K_R} \right)}{\sigma} \quad (\text{Ecu. 45})$$

$$S_c = 349 H_B + 34300 \quad (\text{Ecu. 46})$$

$$S_c = 349 * 131 + 34300$$

$$S_c = 80019$$

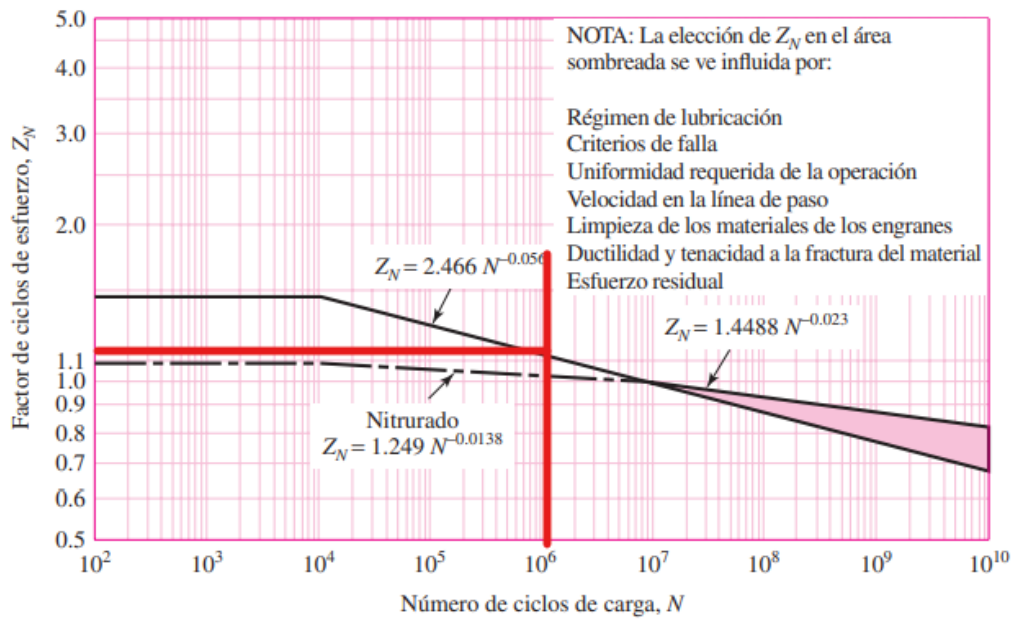


Figura 20.- Factor de vida para el diseño de engranes. [34]

Para detallar el valor de Z_n , consideramos que los engranes son diseñados de considerando 10^6 ciclos.

$$Z_N = 1.2$$

Reemplazos los valores calculados hasta este punto y se determina que el factor de seguridad a la picadura o desgaste es igual a 1,57.

$$S_H = \frac{\left(\frac{S_c Z_n C_H}{K_T K_R}\right)}{\sigma} \quad (\text{Ecu. 47})$$

$$S_H = \frac{\left(\frac{80019 * 1.2 * 1}{1 * 0.85}\right)}{71956.0038}$$

$$S_H = 1.57$$

$$\sigma = \frac{W^t K_o K_v K_s P K_m K_B}{FJ} \quad (\text{Ecu. 48})$$

$$\sigma = \frac{27.54 * 1 * 1.6 * 1 * 16.93 * 1.3026 * 1}{0.47244 * 0.4}$$

$$\sigma = 5142.156 \text{ psi}$$

$$S_F = \frac{\left(\frac{S_T Y_N}{K_T K_R}\right)}{\sigma} \quad (\text{Ecu. 49})$$

$$S_T = 108.6 H_B + 15890 \quad (\text{Ecu. 50})$$

$$S_T = 108.6 * 131 + 15890$$

$$S_T = 30116.6 \text{ psi}$$

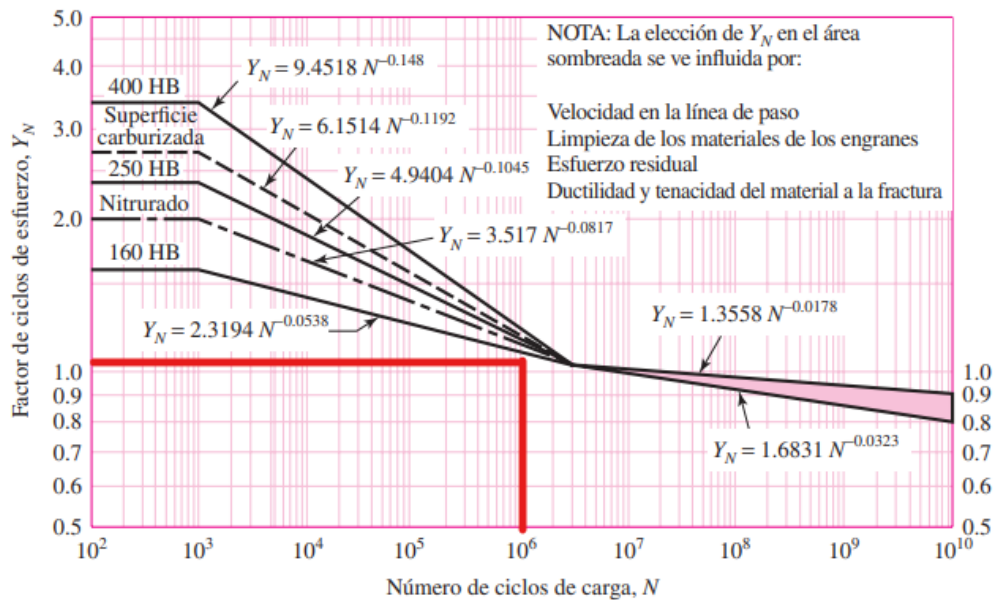


Figura 21.- Factor de ciclos de esfuerzo para el diseño de engranes. [34]

$$Y_N = 1.1$$

$$S_F = \frac{\left(\frac{30116.6 * 1.1}{1 * 0.85}\right)}{5142.156}$$

$$S_F = 7.579$$

Es importante señalar que por medio de cálculos anteriores se calcula el factor de seguridad a flexión.

Engrane 2

A continuación, se efectúa el mismo cálculo, pero en esta ocasión para el piñón

$$P = \frac{Z}{d_p} \quad (\text{Ecu. 51})$$

$$P = \frac{7}{0.2996 \text{ in}}$$

$$P = 23.36$$

$$Z_r = [(r_2 + a)^2 - r_{b2}^2]^{1/2} + [(r_1 + a)^2 - r_{b1}^2]^{1/2} \quad (\text{Ecu. 52}) \\ + (r_2 + r_1) \text{sen} \alpha_a$$

$$Z_r = [(0.2362 + 0.059)^2 - 0.2177]^{1/2} + [(0.3544 + 0.059)^2 - 0.2865]^{1/2} \\ + (0.2362 + 0.3544) \text{sen} 22.7959$$

$$Z_r = 0.2686$$

$$m_N = \frac{0.1743}{0.95 * 0.2686}$$

$$m_N = 0.6831$$

$$I = \frac{\cos 22.7959 \sin 22.7959}{2 * 0.6831} * \frac{1.57}{1.57 + 1}$$

$$I = 0.1596$$

$$\sigma = 2300 \left(\frac{27.54 * 1 * 1.6 * 1 * 1.3026 * 1}{0.1596 * 0.6692 * 0.2992} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma = 97476.545 \text{ psi}$$

$$S_H = \frac{\left(\frac{S_c Z_n C_H}{K_T K_R}\right)}{\sigma} \quad (\text{Ecu. 53})$$

$$S_H = \frac{\left(\frac{80019 * 1.2 * 1}{1 * 0.85}\right)}{97476.545}$$

$$S_H = 1.159$$

$$\sigma = \frac{27.54 * 1 * 1.6 * 1 * 16.93 * 1.3026 * 1.64}{0.6692 * 0.4}$$

$$\sigma = 5953.6 \text{ psi}$$

$$S_F = \frac{\left(\frac{S_T Y_n}{K_T K_R}\right)}{\sigma} \quad (\text{Ecu. 54})$$

$$S_F = \frac{\left(\frac{30116.6 * 1.1}{1 * 0.85}\right)}{5953.6}$$

$$S_F = 6.55$$

En este punto es necesario acotar que, con base en valores previamente calculados, el valor del factor de seguridad a flexión y picadura adquirieron los valores de 1,16 y 6.55 respectivamente. A continuación, se examinan los componentes por medio de un software CAD que permite identificar los esfuerzos a la par de los factores de seguridad.

4.1.1.2. Deformación

Al momento de analizar el modelo en el software ANSYS versión estudiantil fue imprescindible establecer una serie de contactos en todo el elemento para iniciar el análisis. El total de elementos empleados tuvo un conteo final de 22 componentes, previamente descritos en un apartado anterior (3.1). Por otro lado, se utilizaron contactos en las barras, rodamientos, eje de los engranes y por último en los engranes.

Las propiedades del material empleado se muestran a continuación, resaltando que la elección más obvia fue PLA para las piezas impresas y aluminio AW 201 para los componentes principales. Las características de los materiales se muestran a continuación:

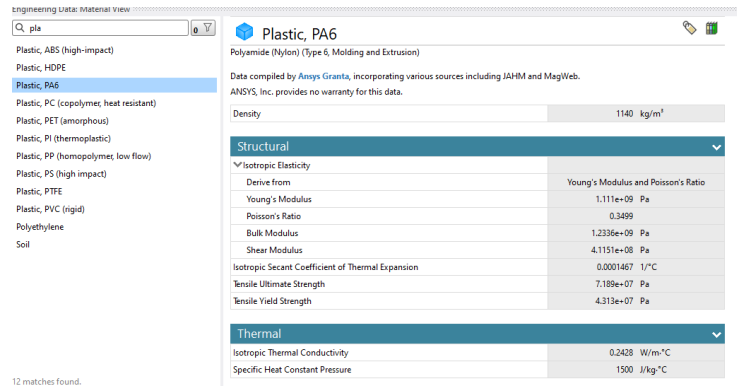


Figura 22.- Propiedades de material de las piezas impresas (PLA-PA6)

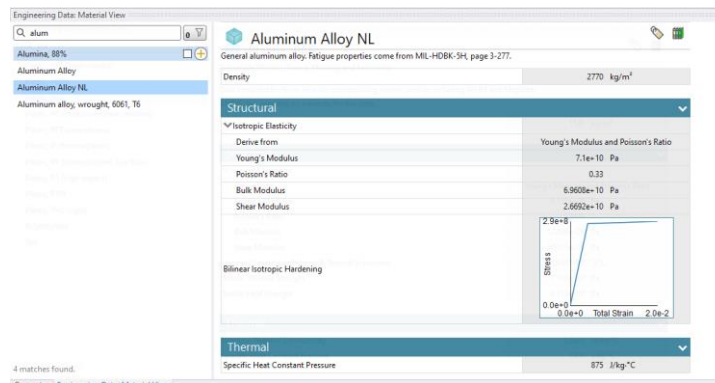


Figura 23.- Propiedades de material de las piezas impresas (Aleación de Aluminio)

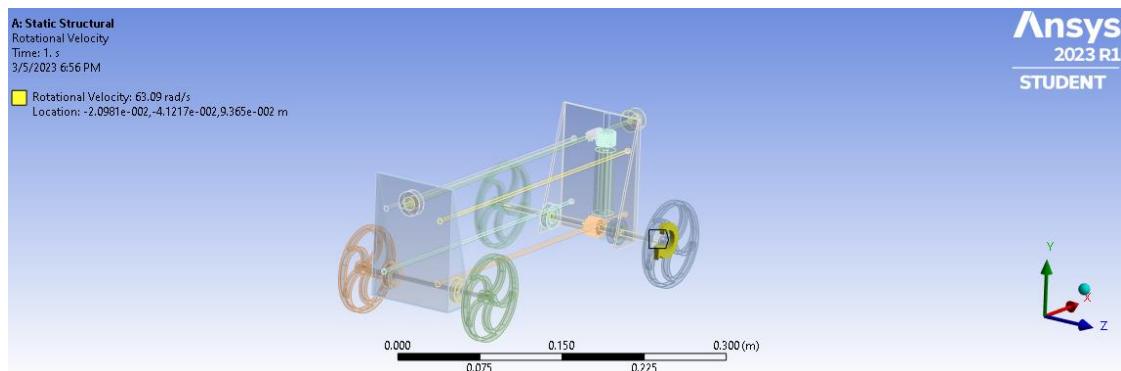


Figura 24.- Fuerzas aplicadas al modelo

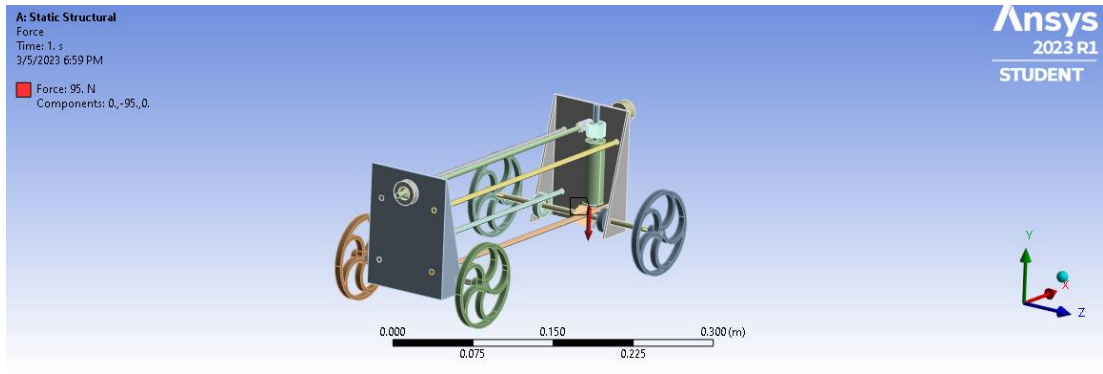


Figura 25.- Fuerzas aplicadas al modelo

De manera similar se muestran las cargas empleadas para el análisis como en el caso de un momento con magnitud 63,09 rad/s y una fuerza de 95 N. Por último, el mallado de los elementos fue de un tamaño (0.25-0.5) denominada como mallado “BUENO”.

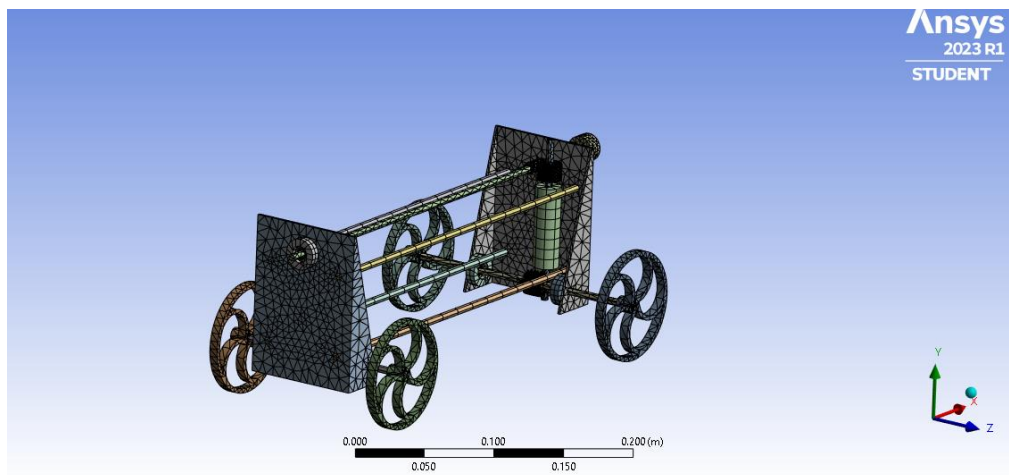


Figura 26.- Mallado del modelo

Una vez generado el modelo, el mismo es puesto bajo en análisis de elementos finitos con el propósito de identificar los esfuerzos permisibles principales a la par de factores de seguridad del modelo.

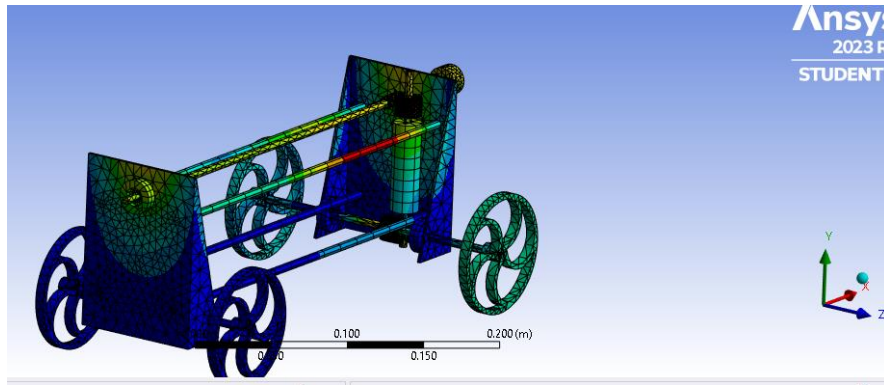


Figura 27.- Análisis estructural del modelo

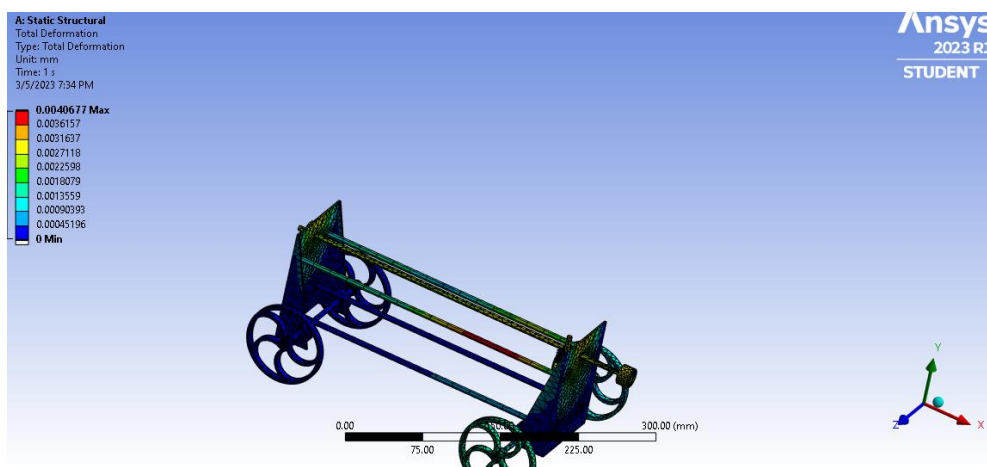


Figura 28.- Análisis estructural del modelo

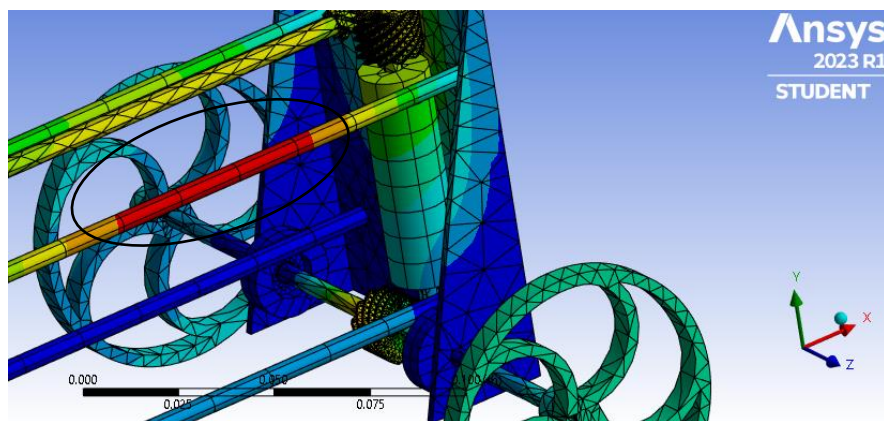


Figura 29.- Esfuerzo máximo del modelo

Como se puede observar en la figura 29 se realiza el análisis de la deformación que presenta el modelo mientras el mismo realiza el trabajo. La deformación máxima que presenta el carro es de 0.004 mm que se presenta en un tubo superior de la estructura del prototipo. El valor de la deformación no es totalmente elevado por lo que no

representa un problema en el modelo. A continuación, se efectúa un análisis del arreglo de engranes tomando en cuenta el material como acero y denotando el equivalent strain.

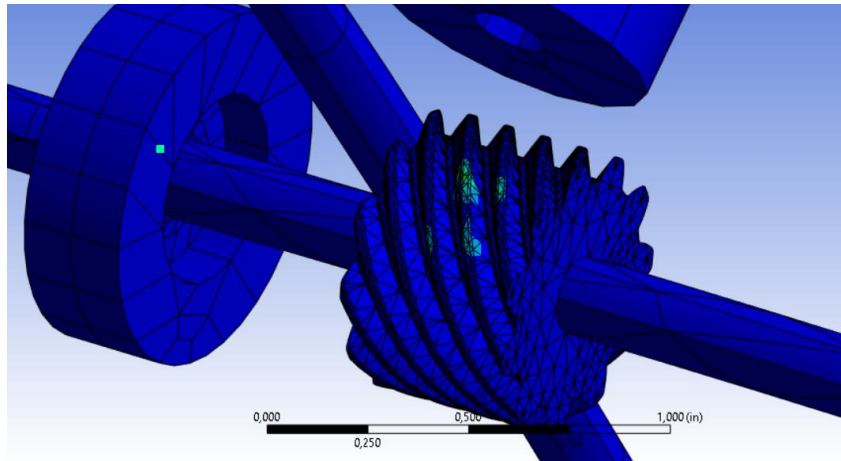
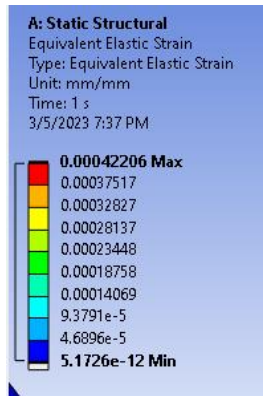


Figura 30.- Análisis estructural de los engranes

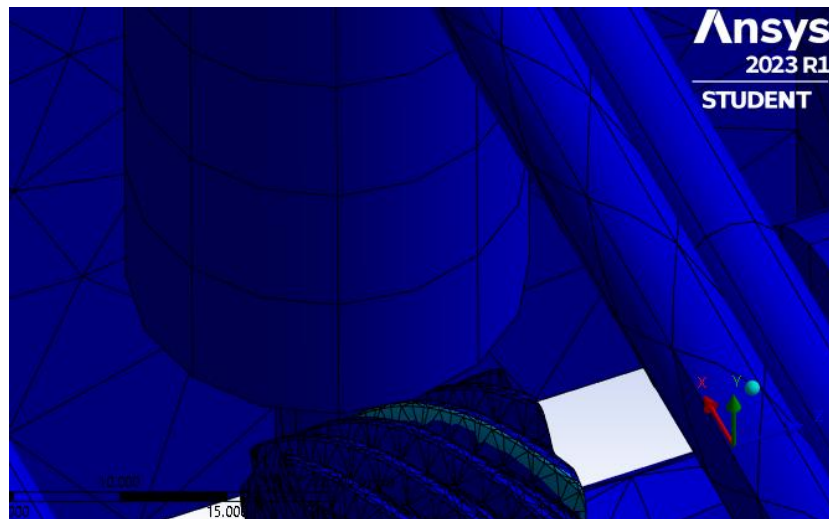


Figura 31.- Análisis estructural de los engranes

Es necesario señalar que como es lógico las deformaciones se evidencian en los dientes del modelo. Por otro lado, el esfuerzo de Von Mises muestra que el mayor esfuerzo evidenciado en el modelo se muestra en los engranes con un valor de 6.94×10^{-5} Mpa y un valor de 0.61Mpa en promedio.

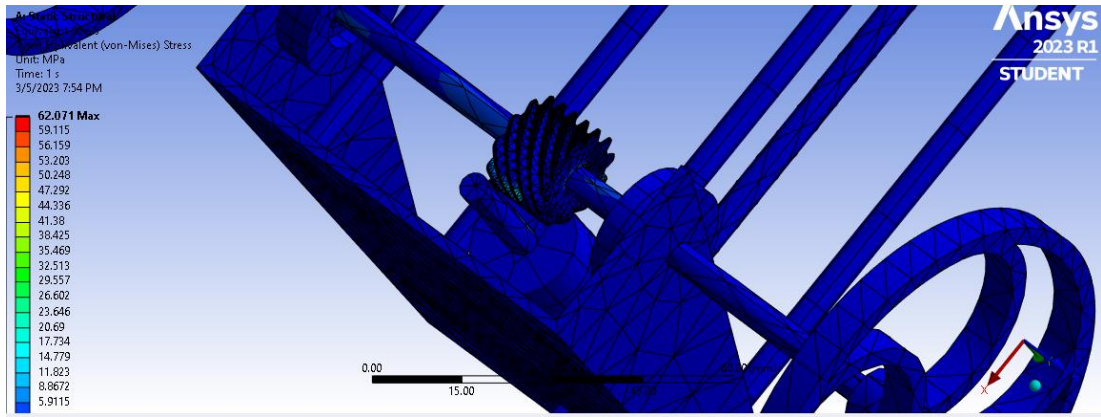


Figura 32.- Esfuerzo equivalente

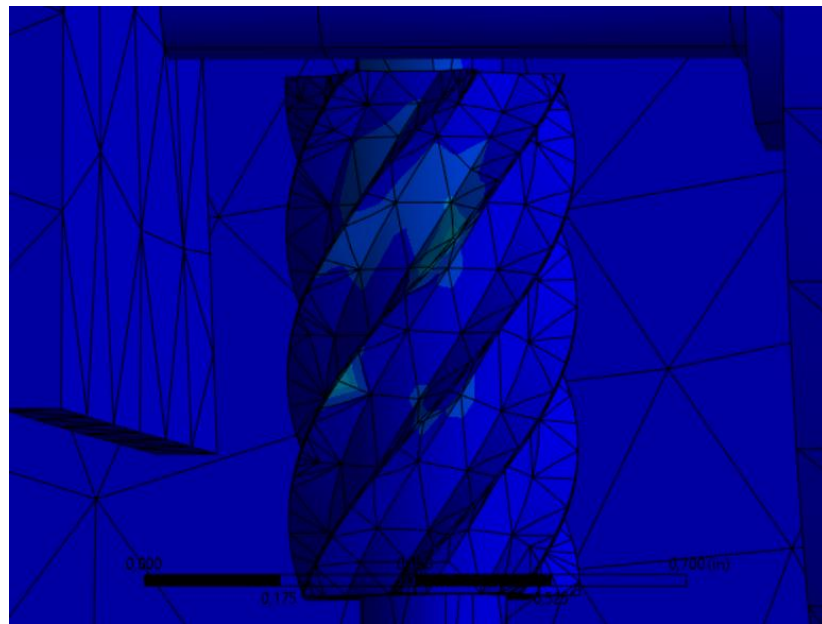


Figura 33.- Analisis del esfuerzo (esfuerzo máximo)

Por último, es fundamental efectuar un análisis más específico orientado a las ruedas del modelo. El material predominante de las ruedas es de teflón reforzado.

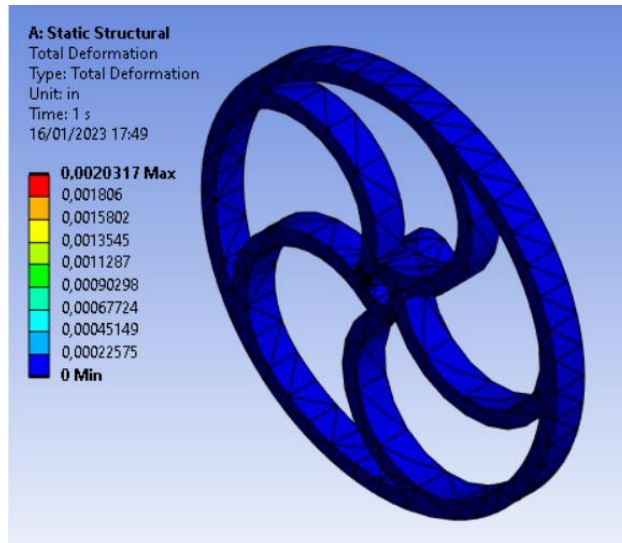


Figura 34.- Análisis de las ruedas

La deformación que se encuentra en las llantas con las cargas que soporta es de $0,000225 \text{ in}$ ($5,715 \times 10^{-3} \text{ mm}$).

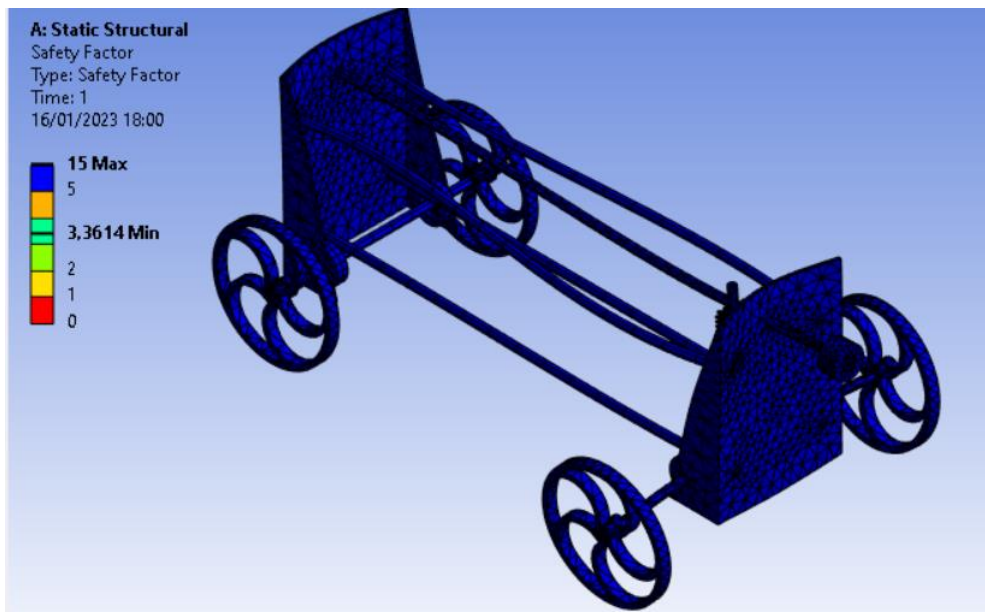


Figura 35.- Factor de seguridad del modelo

En el análisis realizado sobre el carro se puede observar que el factor de seguridad es de 3.36 el cual se encuentra en los engranajes que son los que mayor esfuerzo deben soportar. Por otro lado, el factor de seguridad para el prototipo es de 5.

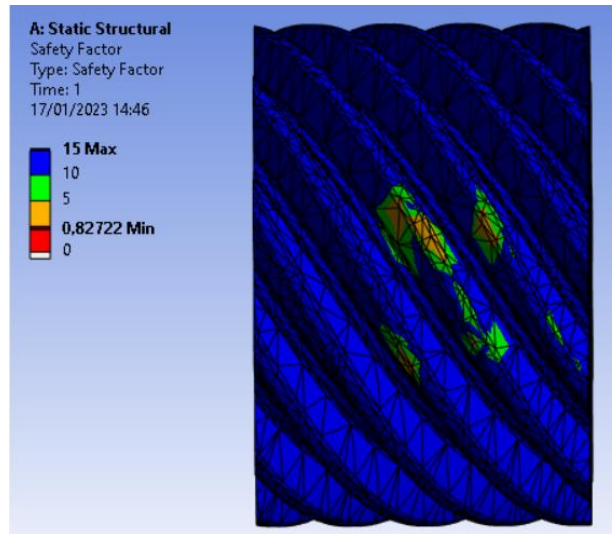


Figura 36.- Factor de seguridad del modelo

En el análisis realizado sobre el carro y especialmente sobre los engranajes se obtuvo que el factor de seguridad de los engranes se puede observar que es de 15 con ciertas partes del perfil del diente (factor de seguridad de cero). En consecuencia, es necesario efectuar un tratamiento térmico a los engranes como es el caso de templado o nitrurado. Como es notorio los esfuerzos a la par del factor de seguridad difieren en magnitud por el análisis por elementos finitos a la par del calculado. Por ende, a continuación, se muestra la tabla 3 que permite comprender de mejor manera los esfuerzos, deformación y factor de seguridad del prototipo.

Tabla 3.- Resumen de esfuerzos, factor de seguridad y deformación

TABLA DE ESFUERZO Y FACTOR DE SEGURIDAD		
MAGNITUD	ELEMENTOS FINITOS	MODELO MATEMÁTICO
Esfuerzo de Contacto (rueda)		71956.00 psi (496.11 Mpa)
Esfuerzo de flexión (rueda)		5142.15 Psi (35.45Mpa)
	N/A	
Esfuerzo de Contacto (piñón)		97476.54 Psi (672.07 Mpa)

TABLA DE ESFUERZO Y FACTOR DE SEGURIDAD		
MAGNITUD	ELEMENTOS FINITOS	MODELO MATEMÁTICO
Esfuerzo de flexión (piñón)		5953.6 Psi (410.4 Mpa)
Esfuerzo del modelo	6.94×10^{-5} Mpa	N/A
Factor de Seguridad (conjunto de engranes)	Max: 5 Min: 3.36	N/A
Factor de Seguridad de Picadura (rueda)		1.57
Factor de Seguridad a flexión (rueda)		7.57
Factor de Seguridad de Picadura (piñón)	N/A	1.16
Factor de Seguridad a flexión (piñón)		5.55
Deformación del modelo	$4 * 10^{-3}$ mm	N/A
Deformación de Ruedas (llantas)	$5,715 * 10^{-3}$ mm	N/A

4.1.2. Análisis de eficiencia

En primera instancia se calculó la tasa de velocidad del vehículo teniendo en consideración la distancia transitada por las ruedas y la hélice del modelo.

$$TVV = \frac{\text{distancia de la hélice}}{\# * \text{distancia de ruedas}} \quad (\text{Ecu. 55})$$

$$=< 0.7$$

$$TVV = \frac{220}{(4 * 80,85)} = < 0.7$$

$$TVV = \frac{220}{(4 * 80,85)} = 0.68 < 0.7$$

$$TVV = 0.68 < 0.7$$

Por otro lado, para el cálculo de la eficiencia del modelo es necesario tener las siguientes consideraciones. Es importante destacar que dos valores en particular son tomados de un trabajo anterior desarrollado en la universidad de Stanford.

Ct: coeficiente de empuje

Cp: coeficiente de potencia

n: número de revoluciones

Q: Torque

V: 25 km/h o 6,94 m/s velocidad máxima

Fh: 1,112 N o 0,25 lbf

$$P = 2\pi * n * Q \quad (Ecu. 56)$$

$$V = W * r \quad (Ecu. 57)$$

$$\frac{V}{r} = W$$

$$W = \frac{6,94 \text{ m/s}}{0,11}$$

$$W = 63,09 \frac{rad}{s}$$

$$W_1 = \frac{6,94 * 60}{2\pi rad} = 602,46 rpm$$

$$Pe = 2\pi * n * Q \quad (Ecu. 58)$$

$$Pe = 2\pi * 602,46 * 1,12 = 4209,32 W$$

$$T_{motriz} = \frac{Pe}{w} \quad (Ecu. 59)$$

$$T_{motriz} = \frac{4209,32}{63,09} = 66,71 N * m$$

$$C_t = \frac{F_p}{\rho * n^2 * D^4} \quad (Ecu. 60)$$

$$C_p = \frac{P}{\rho * n^3 * D^5} \quad (Ecu. 61)$$

Densidad del aire: 1,225 Kg/m²

$$C_p = \frac{4209,32}{1,225 * 602,46^2 * 0,22^5}$$

$$C_p = 0,0304$$

Cálculo del área

$$A = D * paso * \# de aletas \quad (Ecu. 62)$$

$$A = 0,22 * \left(\frac{7 * 2,54}{100}\right) * 2$$

$$A = 0,078 m^2$$

$$F = \sqrt[3]{\frac{\rho * A * W^2}{2}} \quad (\text{Ecu. 63})$$

$$F = \sqrt[3]{\frac{1,225 * 0,078 * 4209,32^2}{2}} = 94,59 \text{ N}$$

$$Ct = \frac{94,59}{1,225 * 602,46^2 * 0,22^4} = 0,0009$$

Cálculo del paso de avance

$$J = \frac{V}{n * D} \quad (\text{Ecu. 64})$$

$$J = \frac{6,94}{602,46 * 0,22} = 0,052$$

Considerar la eficiencia del 100%

$$\frac{\% * Cp}{Ct} = J = \frac{V}{n * D} \quad (\text{Ecu. 65})$$

$$J * n * D = V \quad (\text{Ecu. 66})$$

$$V = 0,052 * (602,46) * (0,22)$$

$$V = 6,89 \frac{m}{s} = 24,80 \frac{Km}{h}$$

Recálculo del paso de avance, considerando una velocidad tomando el pico más alto de la velocidad del viento de 7,22 m/s y un paso de avance de 25 km/h

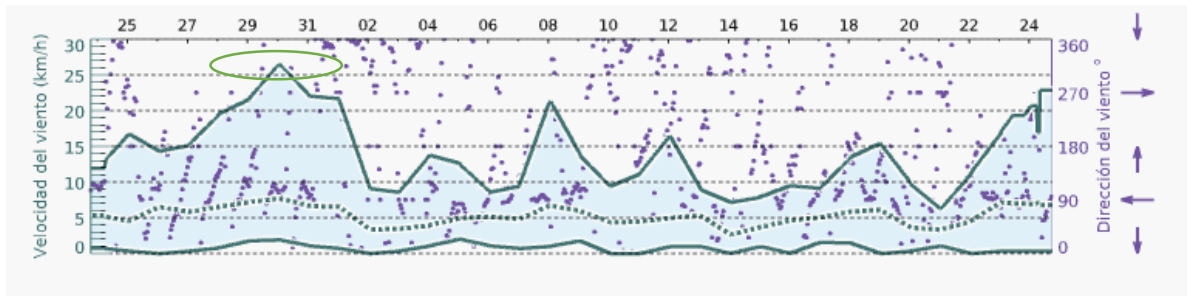


Figura 37.- Velocidad máxima del viento en Ambato. [35]

4.1.2.1. Cálculo de la eficiencia

$$\Pi = \frac{Ct * J}{Cp} \quad (\text{Ecu. 67})$$

$$\Pi = \frac{0,0009 * 25}{0,0304} = 74,01 \%$$

Conclusión:

El sistema tiene una eficiencia considerable al momento de calcular su valor matemático. Sin embargo, es necesario efectuar pruebas de ensayo experimentales con el propósito de comprobar si el modelo desarrollado rompe la velocidad margen de estudio. Por ende, su aplicación se efectuó en una caminadora con el propósito de establecer un margen de error permisible. Es necesario resaltar que la hélice del modelo no funciona como la mayoría cree no funciona, se prevé que la hélice trabaja como un molino que no gira en la dirección en la que el viento la empuja. En cambio, gira en la dirección opuesta funcionando como un ventilador que estimula el aire hacia atrás, de este modo se obtiene energía de las ruedas conectadas a la hélice, lo que impulsa el prototipo. Es por este motivo que a la velocidad del viento el vehículo puede seguir acelerando. Las ruedas mueven al ventilador que empuja aire hacia atrás generando el empuje hacia adelante.

La verdadera pregunta es que para accionar el ventilador debe haber una fuerza hacia atrás en las ruedas que tiene que hacerlas desacelerar; entonces porque esta fuerza no es mayor que el empuje de la hélice, lo que causaría que desacelere. Por ende, es

necesario acotar que las ruedas se mueven más rápido sobre el suelo de lo que la hélice se mueve a través del aire, generando una fuerza de empuje que logra ser mayor e impulsar el vehículo.

Para comprender lo anteriormente acotado es fundamental comprender que la potencia es igual a fuerza por velocidad. En las ruedas la potencia ingresa al sistema mediante el suelo que se mueve debajo del vehículo, esta potencia generada es la fuerza del suelo bajo las ruedas multiplicada por la velocidad del vehículo. En la hélice el trabajo se ejerce sobre el aire lo que empuja hacia atrás la potencia. Esta potencia es igual a la fuerza de la hélice en el aire multiplicada por la velocidad del vehículo menos la velocidad del viento.

Esto significa que la hélice está yendo más lentamente a través del aire gracias al viento a favor y de esta manera se asume que no hay pérdida la potencia; en consecuencia la fuerza en la hélice será mayor que la fuerza en las ruedas y ya que la hélice está empujando aire hacia atrás, el aire aplica una fuerza equivalente y opuesta hacia adelante sobre la hélice (fuerza de empuje) que será mayor que la fuerza hacia atrás de las ruedas (fuerza de potencia) entonces este vehículo funciona como una palanca o polea. Al aplicar una pequeña fuerza en las ruedas por una distancia mayor la hélice puede aplicar una mayor fuerza por una distancia más corta.

4.1.3. Pruebas de funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento se efectuaron con base en una prueba y error por parte del modelo. La idea fue colocar el prototipo en la caminadora hasta lograr un equilibrio entre el movimiento del modelo y la distancia recorrida por el mismo. Para las pruebas de funcionamiento es necesario recordar que el viento empuja el vehículo, y a medida que alcanza la velocidad del viento, las ruedas mueven la hélice tan rápido que la hélice impulsa hacia adelante, como un ventilador. Si consideramos el impulso adicional de la hélice, excedemos la velocidad del viento. El problema es que en realidad hace falta un método exacto para hacerlo funcionar.

El concepto de ingeniería para que el modelo funcione es la tasa de inclinación de la hélice en relación con la circunferencia de las ruedas. Técnicamente, es entre la inclinación de hélice, y el engranaje de transmisión y la circunferencia de rueda, pero

lo más fácil es hacer todo el engranaje uno a uno, así se lo puede eliminar de la ecuación. Sin embargo, en el desarrollo del documento un punto fundamental fue abordar un arreglo de engranes de eje oblicuo. Dicho esto, los cálculos se centran en diseñar el conjunto de engranes, el juego ruedas-hélice y la geometría; teniendo en cuenta en sobremedida la inclinación, diámetro y los engranes (diseñados de acero). Al analizar la inclinación de la hélice, en cada rotación completa, viaja cierta distancia a través de su material. Para un giro de la rueda, se mueve la circunferencia de la rueda; sin embargo, pero cómo la hélice está diseñada directamente proporcional a la rueda, genera un movimiento de eje que impulsa al vehículo. Es decir, se analiza la distancia de la hélice y la distancia de la rueda, es algo que el inventor de esto llama tasa de velocidad de vehículo. Para que un vehículo como este funcione, la TVV debe ser 0,7 o menos, lo que significa que el diámetro de la rueda debe ser bastante grande con respecto a la hélice. La TVV será básicamente la inclinación de la hélice. Para el vehículo diseñado, se usó 0,7 de TVV, una inclinación de hélice de 7 pulgadas. La tabla de los resultados obtenidos se muestra a continuación.

Tabla 4.- Ensayo de avance

Tiempo	Velocidad	Distancia
10	1 m/s	-0,10 cm
60	2 m/s	-0,05 cm
90	3 m/s	0,00 cm
100	3.5 m/s	0.00 cm
110	4 m/s	0.00 cm
120	5 m/s	+ 0,15 cm
125	5,6 m/s	+ 0,21 cm

Nota: Es necesario señalar que hasta no alcanzar un desplazamiento positivo el sistema no funciona como debería por lo cual la velocidad debe incrementarse.

CAPITULO IV

Una vez culminado el presente trabajo de investigación se puede efectuar las siguientes afirmaciones:

5.1. Conclusiones

- El desarrollo del presente trabajo de investigación implicó ejercer una serie de consideraciones puntuales al momento de abordar la temática inherente al diseño y manufactura de un modelo impulsado por viento. Algunas de las fuerzas que inciden en un cuerpo impulsado por viento conciernen a la fuerza de tracción y reacción en las ruedas; y por último la resistencia aerodinámica. Por otro lado, un factor a la par de importante consiste en un elemento que permite la propulsión del modelo. Dentro de este trabajo experimental, este componente fue una hélice de 4 pulgadas de paso y 0,35 metros de diámetro. La hélice por su parte requiere del análisis de coeficientes de sustentación y arrastre lo que se conoce como el perfil aerodinámico. La eficiencia del perfil es directamente proporcional al número de Reynolds; mismos que definieron una inclinación de hélice de 7 pulgadas.
- El modelo geométrico desarrollado requirió una modificación en el sistema de engranes para la impulsión del modelo original (blackbird). El diseño original desarrollado es impulsado por un ensamble tipo triangulo impulsado por un juego piñón-engranado de relación 1:1. Por su parte el rediseño presenta un modelo geométrico rectangular de peso limitado a 1000 gramos con el propósito de incrementar su eficiencia. El arreglo diseñado para su impulsión consistió de engranes helicoidales de ejes oblicuos de ángulo de hélice 30° , presión de 20° y hélice 60° . El material para su diseño y manufactura consistió de una máquina de fresado para acero endurecido 1040.
- Con respecto al análisis estructural del modelo rediseñado, su deformación máxima 0,004 mm en el tubo superior del diseño. Sin embargo, el análisis fundamental se dio en el arreglo de engranes; el esfuerzo máximo que soporta el conjunto fue de 168,92 Mpa. Otro punto que requiere de acotación es el análisis de las cuatro ruedas, la deformación máxima que soporta es de 0,0057 mm. Es importante resaltar también que el factor de seguridad es de 3,36 para las ruedas

mientras que para el conjunto completo es de 5 unidades. La eficiencia de todo el sistema es del 78% tras analizar el coeficiente de empuje y potencia.

5.2. Recomendaciones

De manera similar se pueden acotar las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda que con el propósito de recrear el modelo los parámetros de análisis sean investigados en trabajos únicamente de origen académico con es el caso de revistas científicas a la par de artículos de alto impacto. Es por este motivo que se recomienda ejercer un modelo que supere una inclinación de hélice superior a 7. Y desde luego una tasa de velocidad de vehículo inferior a 0.7 unidades.
- El diseño del modelo implicó la utilización de un software para análisis por elementos finitos, por ende; con el propósito de generar un modelo apropiado es necesario generar y emplear un software intuitivo que permita un análisis completo. De igual manera la constatación de resultados puede ser efectuada por medio de la combinación de programas con el propósito de coordinar los valores calculados.
- El tema de los resultados debe ser debidamente analizado con el propósito que los cálculos no se desvíen de los arrojados por el software, por ende, se recomienda coordinar materiales, valor de magnitudes y unidades de trabajo.

Referencias

- [1] B. Blackford , «The physics of a push-me pull-you boat,» Dalhousie University, Canada, 1978.
- [2] O. Gur, «Practical Propeller Efficiency Model,» Israel Aerospace Industries, Israel, 2013.
- [3] A. Sadak, S. Syed Ali, G. Jibu y A. Nizamuddin, «Analysis of Down-Wind Propeller Vehicle,» *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 3, nº 4, Abril 2013.
- [4] H. Isshiki, «Mechanical Model and Design Guideline of Wind Powered Car and Ship Using Rotary Wings Advancing at Super Wind velocity in Tailwind,» *Engineering & Technology*, vol. 03, nº 1, pp. 1-16, 2015.
- [5] M. Sudin , M. Abdullah , S. Anuar , F. Ramli y M. Mohd , «Review of Research on Vehicles Aerodynamic Drag Reduction Methods,» *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, vol. 14, nº 2, 2014.
- [6] «Blackbird (wind-powered vehicle),» 12 Julio 1015. [En línea]. Available: http://www.owlapps.net/owlapps_apps/articles?id=28557445&lang=en. [Último acceso: 10 Febrero 2023].
- [7] PHYS.ORG, «Blackbird cart runs with wind only twice as fast,» Julio 12 2012. [En línea]. Available: <https://phys.org/news/2012-07-blackbird-cart-fast.html>. [Último acceso: 11 Febrero 2023].

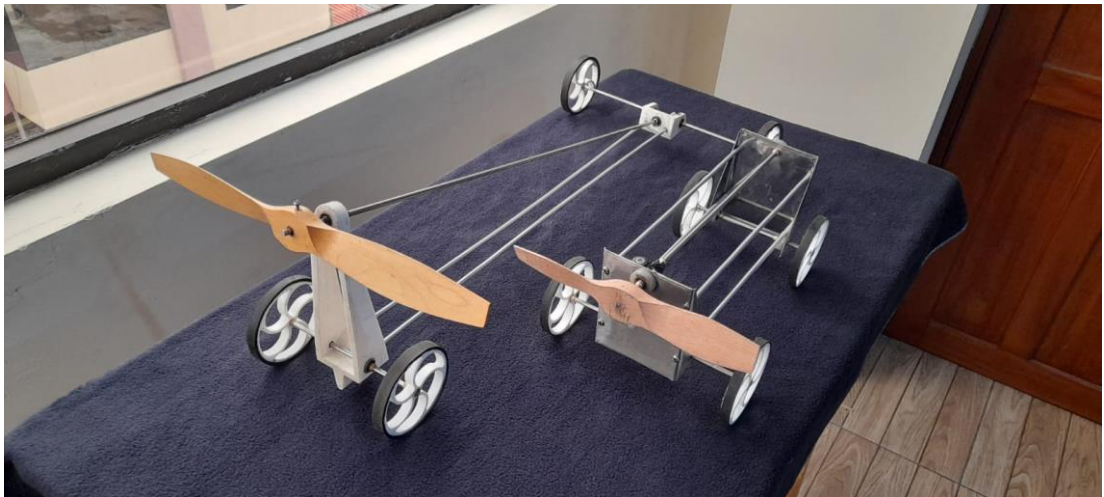
- [8] E. Campos , «Diseño de un alerón de un vehículo de competición: comparación de la simulación aerodinámica numérica y la simulación aerodinámica experimental,» Escuela Politécnica Superior, 2008.
- [9] P. Tacuri y M. Zambrano , «Análisis y Optimización del comportamiento Aerodinámico de la Carrocería de un Bus Categoría M3,» Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2019.
- [10] J. Gómez , «Diseño, estudio y validación técnica del sistema de anclaje de un espejo retrovisor de un vehículo con el empleo de materiales poliméricos,» Universitat Politècnica de Valencia, Valencia-España, 2021.
- [11] J. Alegre , «Análisis CFD de la influencia de la aerodinámica en el consumo energético de vehículos en formación,» UNiversitat Politècnica de Valencia, Valencia-España, 2021.
- [12] E. Brugarolas , «Estudio de un sistema aerodinámico activo en automóviles. Elementos aerodinámicos,» Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2018.
- [13] J. Pérez , «Estudio aerodinámico de carrocerías de autobuses intermunicipales utilizando herramientas CFD,» Universidad Militar de Nueva Granada, 2020.
- [14] A. Witwer , J. Marighetti, M. De Bortoli y J. Aguirre , «Estudio Aerodinámico mediante ensayos en Tunel de Viento,» UNNE, 2021.
- [15] A. Morales , «Ecuaciones de Navier Stokes y Atractores,» Universidad de Sevilla, Sevilla-España, 2020.
- [16] C. Hanser Verlag, «Taschenbuch der Physik,» Leseprobe, 1996.

- [17] I. Romero y D. Jara , «Identificación de las barreras que obstaculizan la expansión de la energía eólica y solar fotovoltaica como fuentes de generación eléctrica en el Ecuador,» Universidad Politécnica Salesiana, 2020.
- [18] M. Aguilar , «Incidencia de los proyectos emblemáticos de generación eléctrica ejecutados en el periodo 2007-2016 en la oferta eléctrica del país y su prospectiva al año 2030,» Pontifica Universidad Católica del Ecuador, 2018.
- [19] A. León , «Análisis de curvas de velocidad de viento y altura: propuesta de identificación de patrones,» Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, 2018.
- [20] L. Tolentino , O. Gonzáles , C. Campos , S. Figueroa y J. Toledo , «Simulación numérica del flujo de aire en una brida de admisión de un vehículo de competición,» *Tecnia*, vol. 30, nº 2, 2020.
- [21] D. Cordero y R. Barahona , «Medición del viento y su aplicación en la ingeniería estructural,» *UNiversidad de Costa Rica*, pp. 23-33, 2016.
- [22] J. De la Rosa , R. Estrada y C. Varela , «Método numérico para determinar el ángulo adecuado en estructuras con cubiertas ligeras,» *Revista de Investigación Latinoamericana en Competitividad Organizacional*, nº 3, pp. 1-5, 2019.
- [23] D. Figueroa , «Experimentación Aerodinámica en tunel de Viento de modelo físico a escala de vehículo tipo Hatchback,» Universidad de los Andes, 2022.
- [24] E. Noriega , *Caracterización cualitativa y cuantitativa de perfiles aerodinámicos recortados a bajos números de reynolds*, Colombia, 2021.
- [25] C. Cáceres, *Diseño de un perfil aerodinámico para bajos números de Reynolds mediante herramientas computacionales.*, Universidad de Pamplona, 2022.

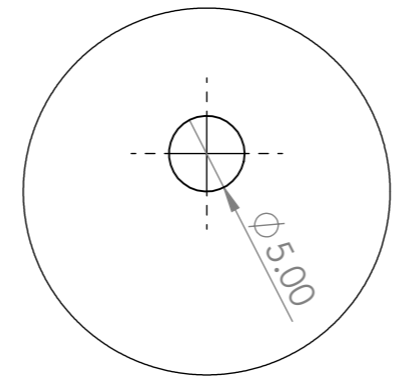
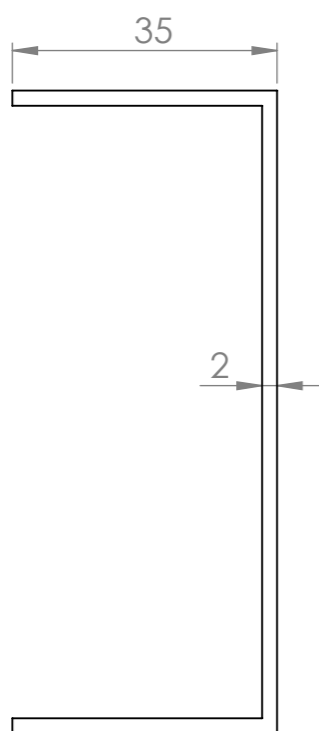
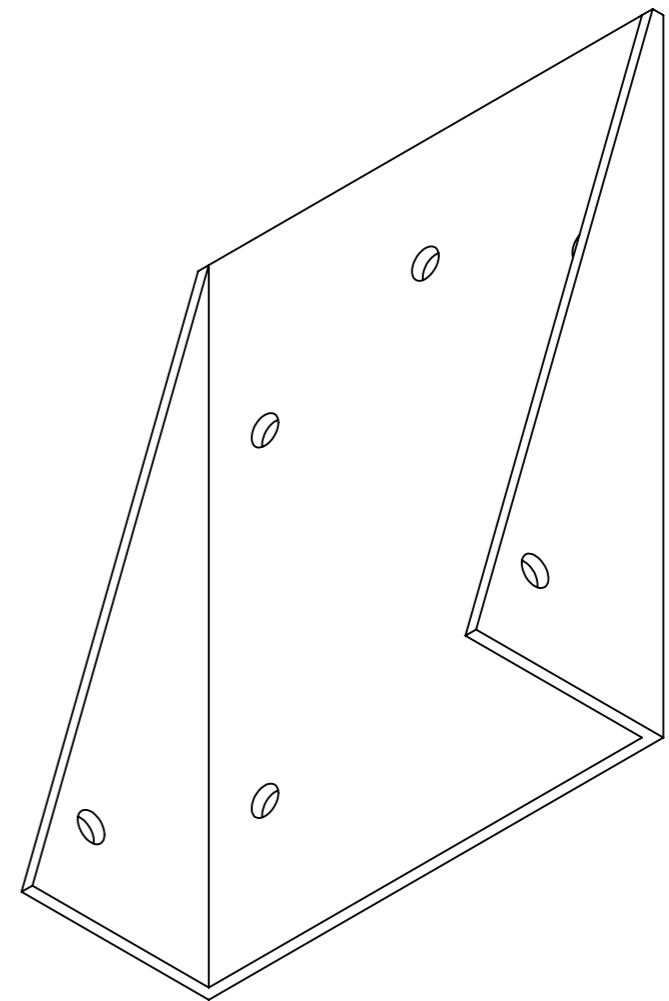
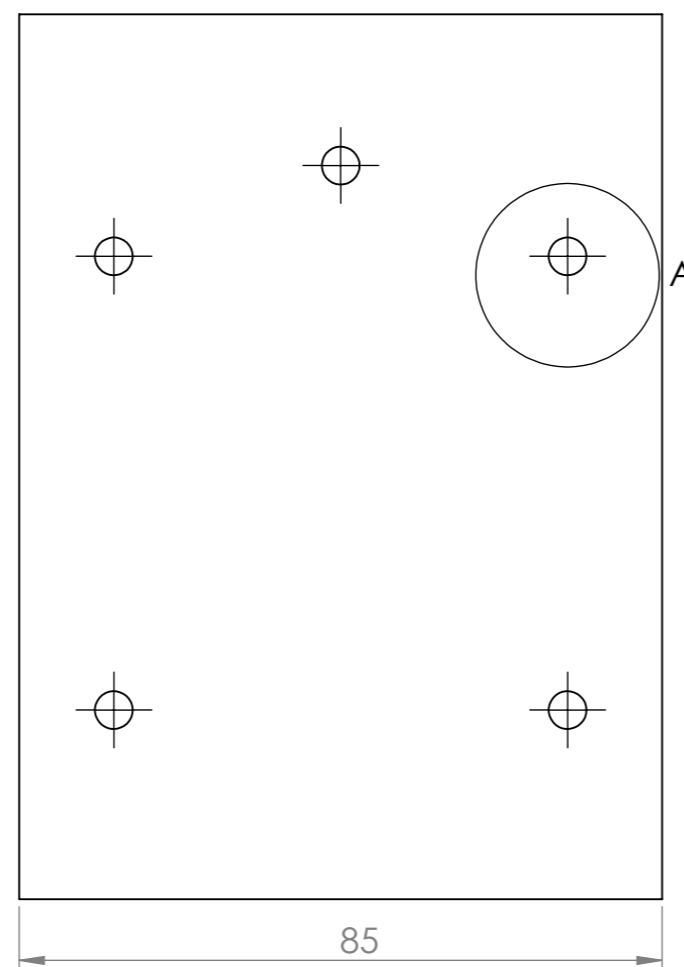
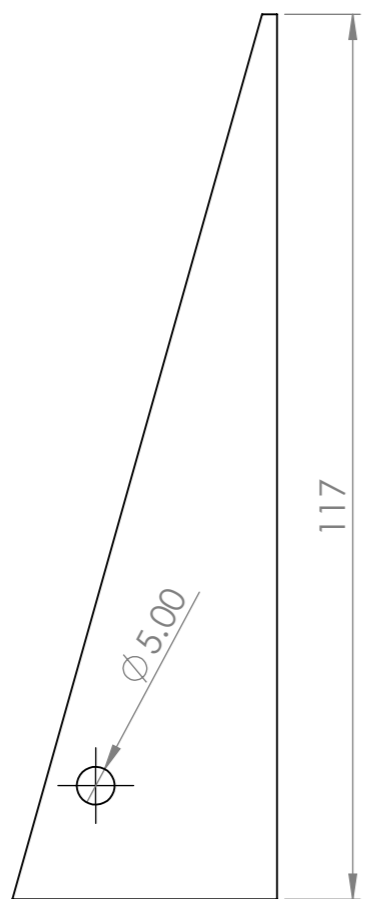
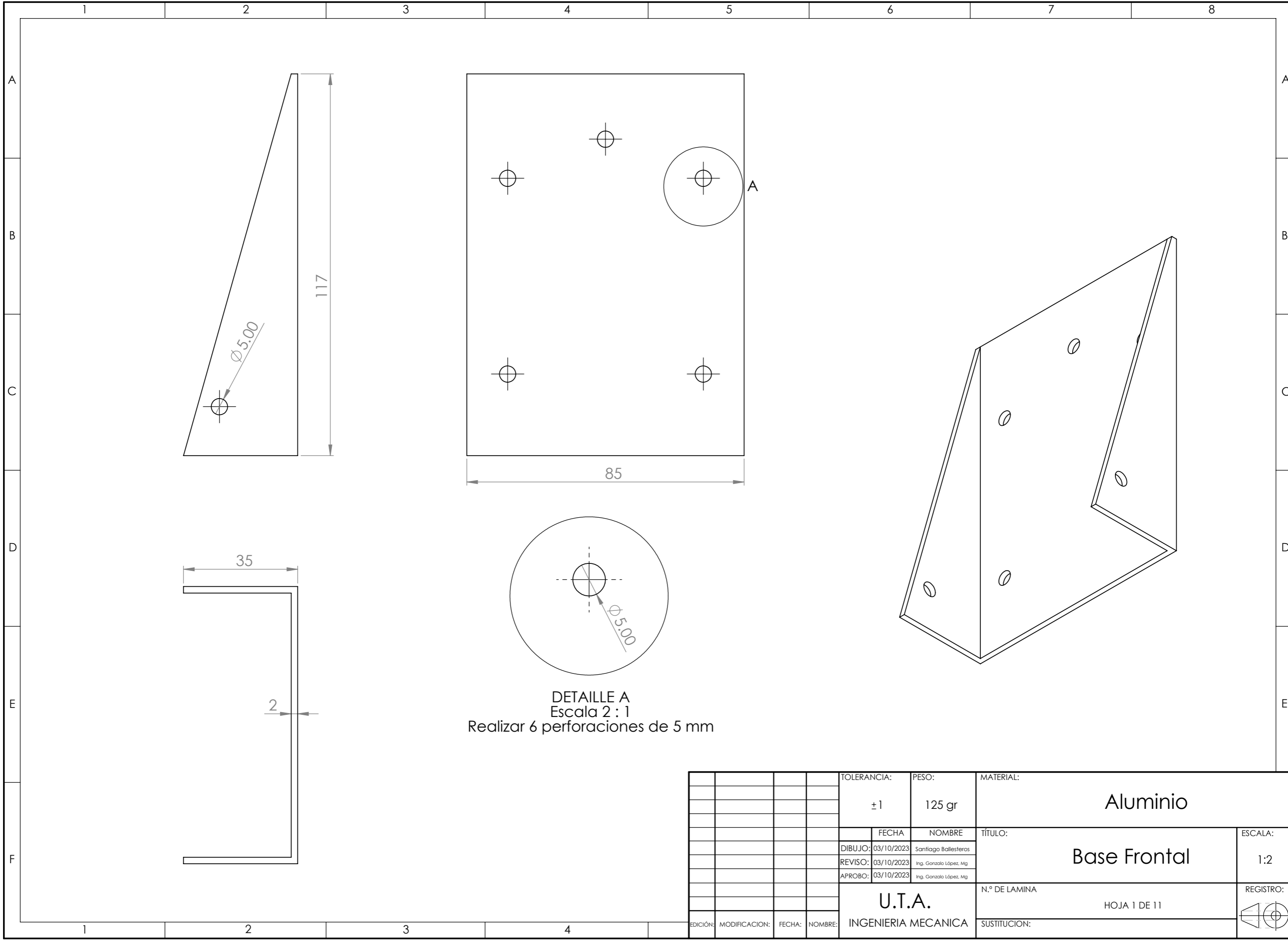
- [26] C. Moreales, *Mecánica de Fluidos*, Perú: Universidad Nacional Agraria, 2018.
- [27] M. Zang , *Análisis de la presentación de los temas energía, trabajo y principio de conservación de la energía en libros de texto de Física universitaria*, Universidad Nacional del Comahue, 2019.
- [28] P. Liu, M. Islam y B. Veitch, *Some Unsteady Propulsive Characteristics of a Podded Propeller Unit under Maneuvering Operation*, Canada, 2019.
- [29] T. Sibona , *Desarrollo de modelo aeroelástico para el diseño de hélices*, 2018.
- [30] J. Centurion, *Análisis aerodinámico y simulación computacional de un elemento álabes de una turbina eólica pequeña para el aprovechamiento eólico en Reque*, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, 2019.
- [31] D. Mogollón , *Mejora del rendimiento del álabes de un aerogenerador de baja potencia y velocidad mediante dispositivos de control de capa límite.*, Universidad de Pamplona, 2020.
- [32] . E. Angarita , *Control de ángulo de calaje para una turbina eólica*, Universidad Piloto de Colombia, 2018.
- [33] K. Hanle , «Principio de Conservación de la Energía,» 2013.
- [34] R. Budynas y K. Nisbett , *Diseño en Ingeniería mecánica de Shigley*.
- [35] Meteoblue, «Archivo meteorológico Ambato,» 25 Enero 2023. [En línea]. Available:
https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/weatherarchive/ambato_ecuador_3660689.

ANEXOS

Figuras del prototipo y modelo original







DETALLE A
Escala 2 : 1
Realizar 6 perforaciones de 5 mm

				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:		
				±1	125 gr	Aluminio		
				FECHA	NOMBRE	TÍTULO:		ESCALA:
				DIBUJO: 03/10/2023	Santiago Ballesteros	Base Frontal		1:2
				REVISO: 03/10/2023	Ing. Gonzalo López, Mg			
				APROBO: 03/10/2023	Ing. Gonzalo López, Mg			
				U.T.A.		N.º DE LAMINA		REGISTRO:
				INGENIERIA MECANICA		HOJA 1 DE 11		
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:			SUSTITUCION:		

1

2

3

4

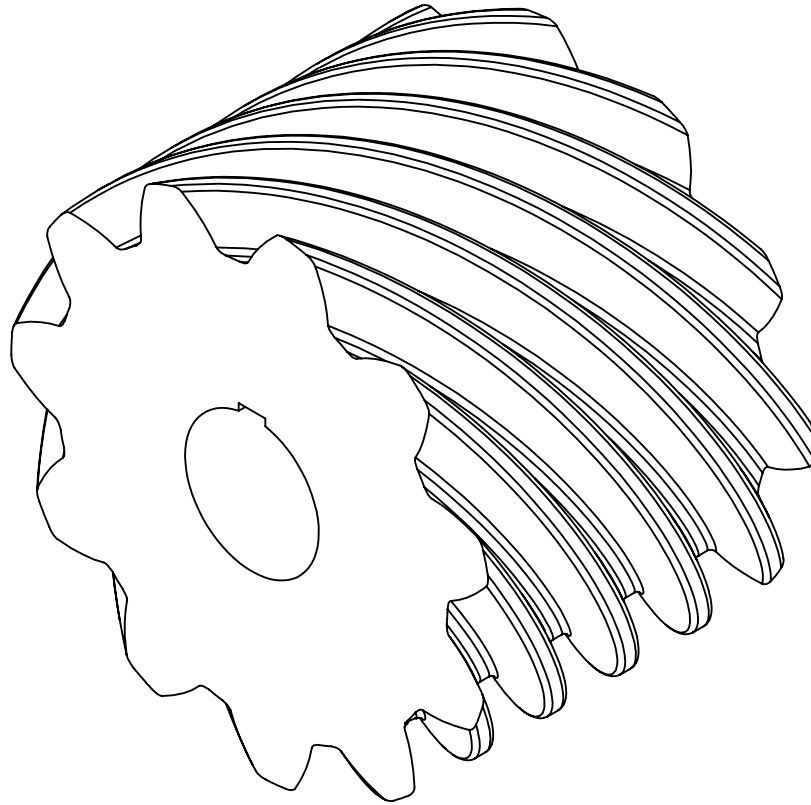
A

B

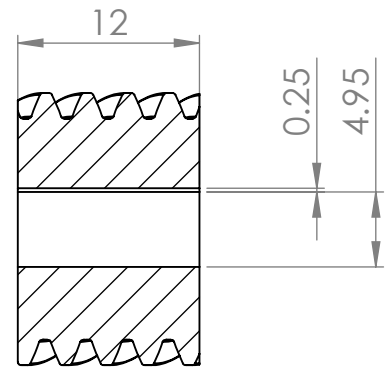
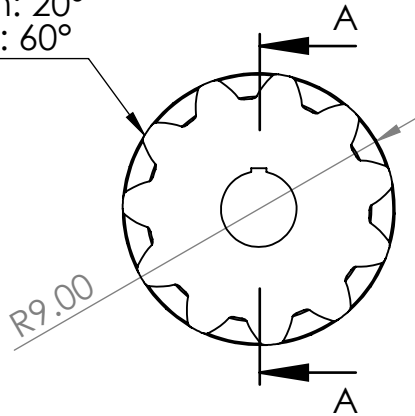
C

D

E



N: 11
 Presión: 20°
 Hélice: 60°



Corte A-A

				TOLERANCIA: ± 0.1	PESO: 30 gr	MATERIAL: Aleación de Cobre	
						TÍTULO: Engrane Helicoidal	ESCALA: 2:1
				DIBUJO: 03/10/2023	Santiago Ballesteros		
				REVISO: 03/10/2023	Ing. Gonzalo López, Mg		
				APROBO: 03/10/2023	Ing. Gonzalo López, Mg		
				U.T.A. INGENIERIA MECANICA		N.º DE LAMINA HOJA 2 DE 11	REGISTRO:
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:			SUSTITUCION:	

1

2

3

4

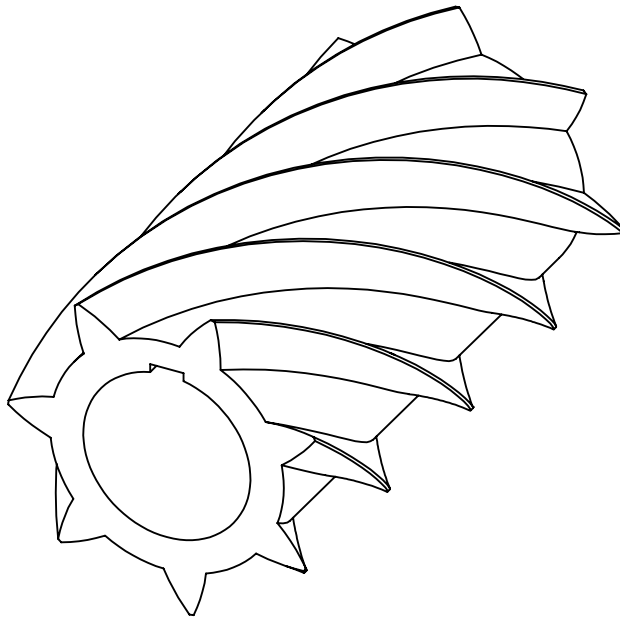
A

B

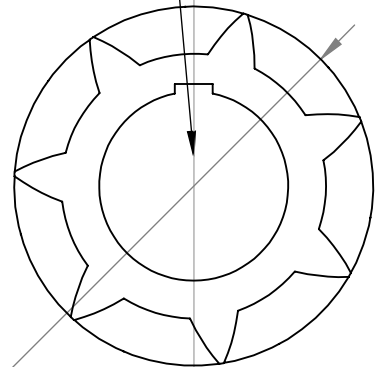
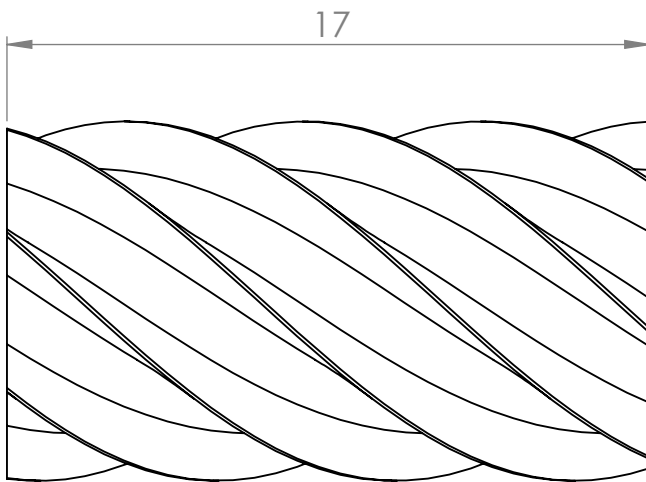
C

D

E



N: 7
 Presión: 20°
 Hélice: 60°



R4.75

				TOLERANCIA: ± 0.1	PESO: 20 gr	MATERIAL: Aleación de Cobre		
						TÍTULO: Engrane Helicoidal	ESCALA: 2:1	
				DIBUJO: 03/10/2023	Santiago Ballesteros		N.º DE LAMINA HOJA 3 DE 11	REGISTRO:
				REVISO: 03/10/2023	Ing. Gonzalo López, Mg			
				APROBO: 03/10/2023	Ing. Gonzalo López, Mg			
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:	U.T.A. INGENIERIA MECANICA		SUSTITUCION:		

1

2

3

4

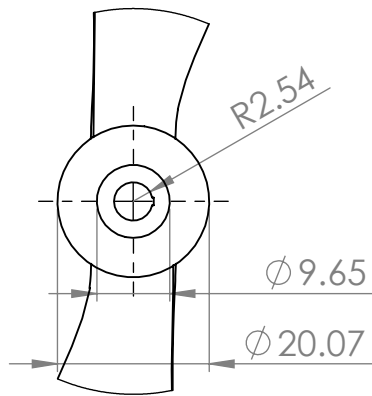
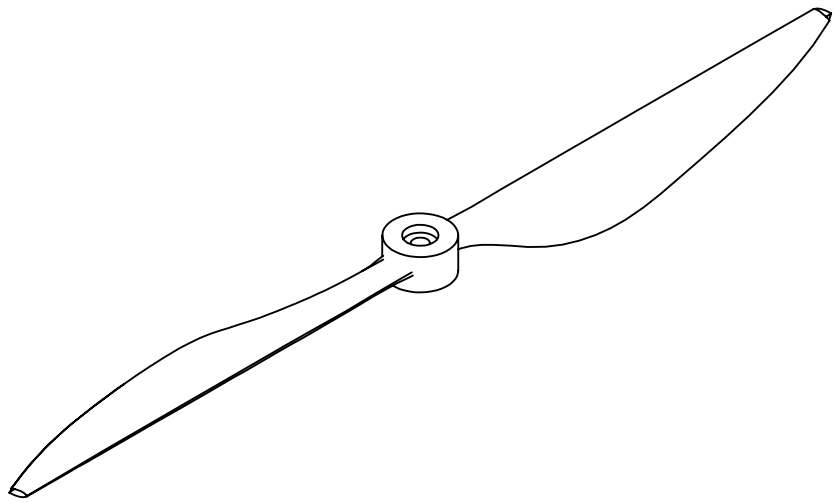
A

B

C

D

E

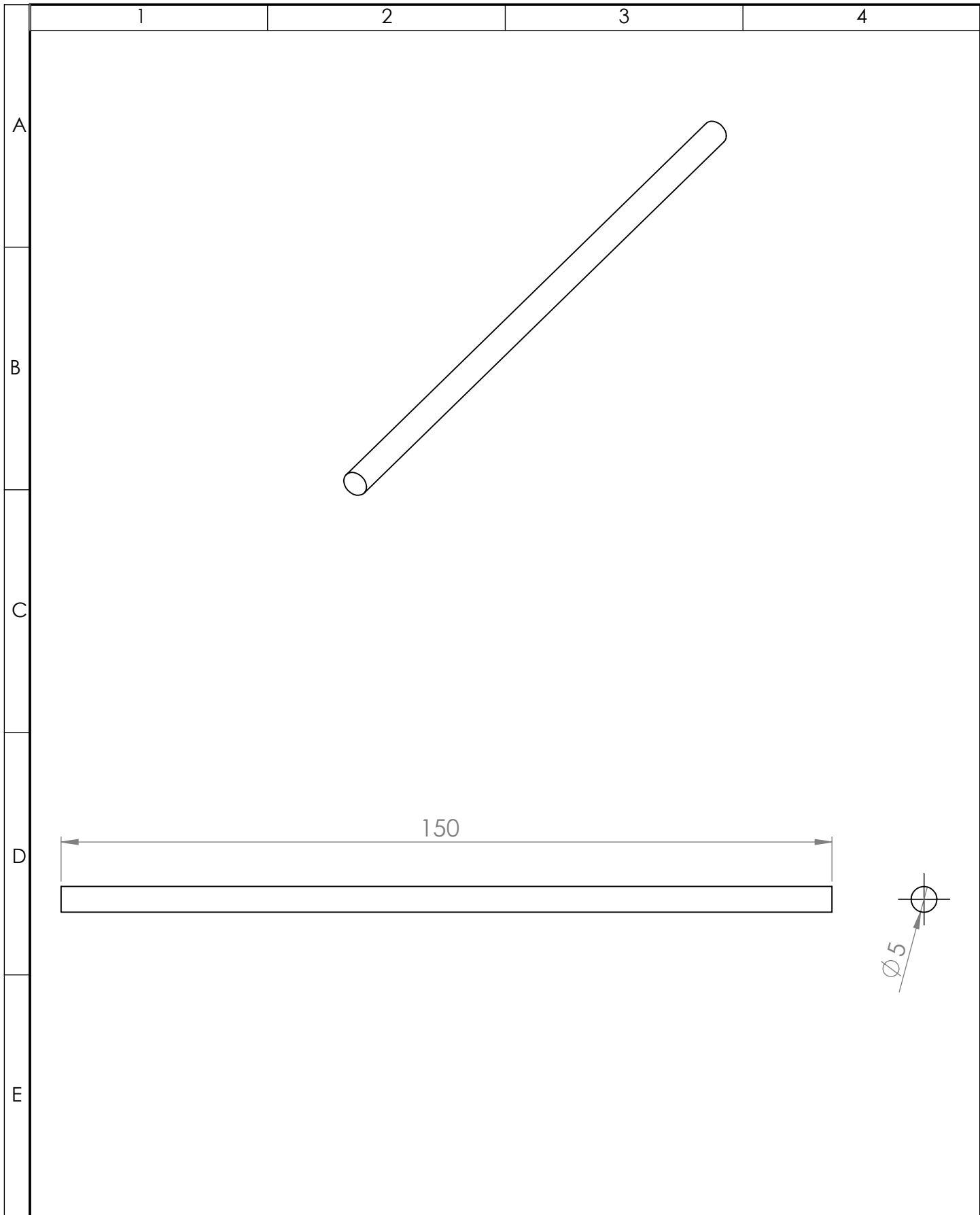


DETALLE A
ESCALA 1 : 1

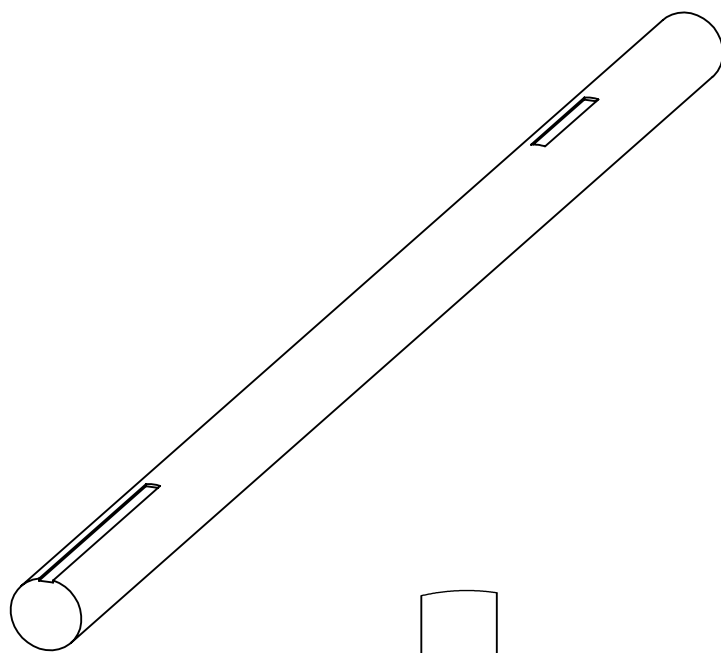
Hélice de modelo DS1 spark 47305



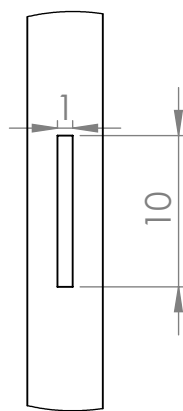
				TOLERANCIA: ±1	PESO: 55 gr	MATERIAL: Madera	
						TÍTULO: 4.- Hélice	ESCALA: 1:5
				FECHA	NOMBRE		
				DIBUJO: 03/10/2023	Santiago Ballesteros		
				REVISO: 03/10/2023	Ing. Gonzalo López, Mg		
				APROBO: 03/10/2023	Ing. Gonzalo López, Mg		
				U.T.A.		N.º DE LAMINA	REGISTRO:
				INGENIERIA MECANICA		HOJA 4 DE 11	
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:			SUSTITUCION:	



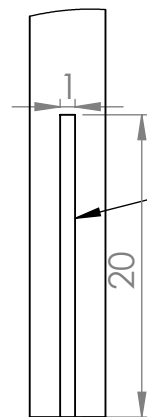
				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:			
				±1	25 gr	Acero 1018			
					FECHA	NOMBRE	Eje 150 x 5 mm		ESCALA:
				DIBUJO:	03/10/2023	Santiago Ballesteros			1:2
				REVISO:	03/10/2023	Ing. Gonzalo López			
				APROBO:	03/10/2023	Ing. Gonzalo López	N.º DE LAMINA		REGISTRO:
				U.T.A.			HOJA 5 DE 11		
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:	INGENIERIA MECANICA			SUSTITUCION:		



R2.50

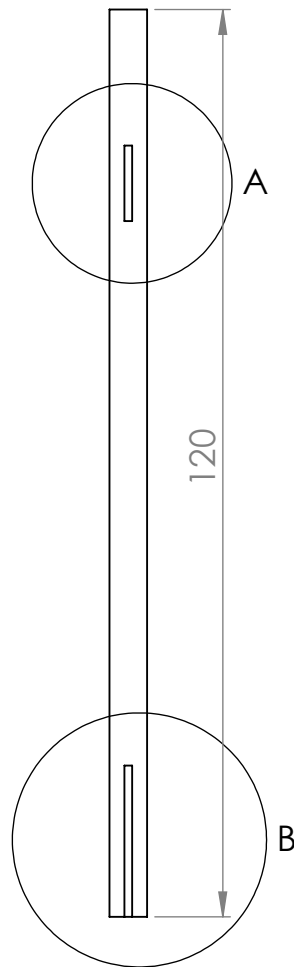


Detalle A
Escala 2:1



Detalle B
Escala 2:1

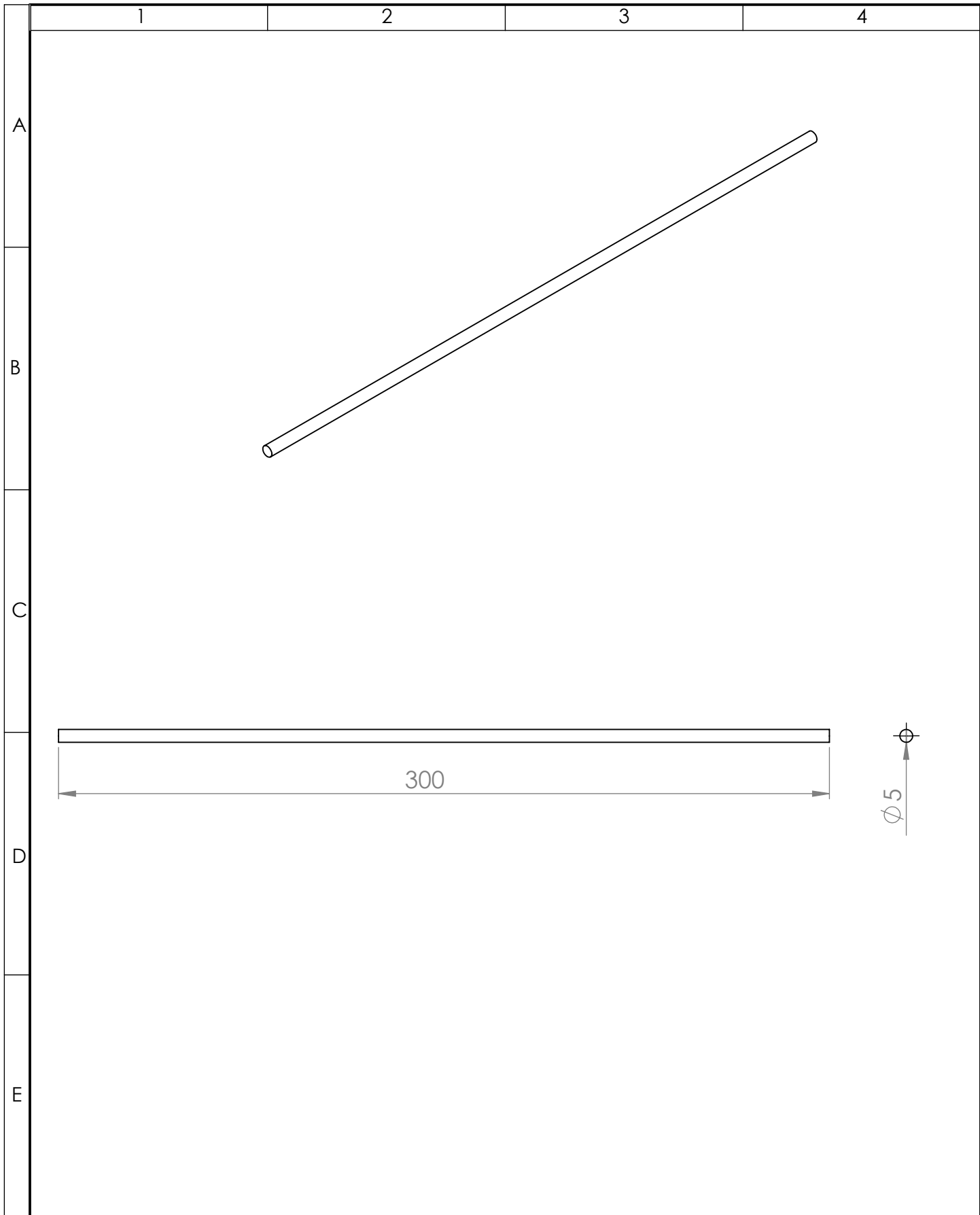
La profundidad de los dos detalles es igual a 1 mm



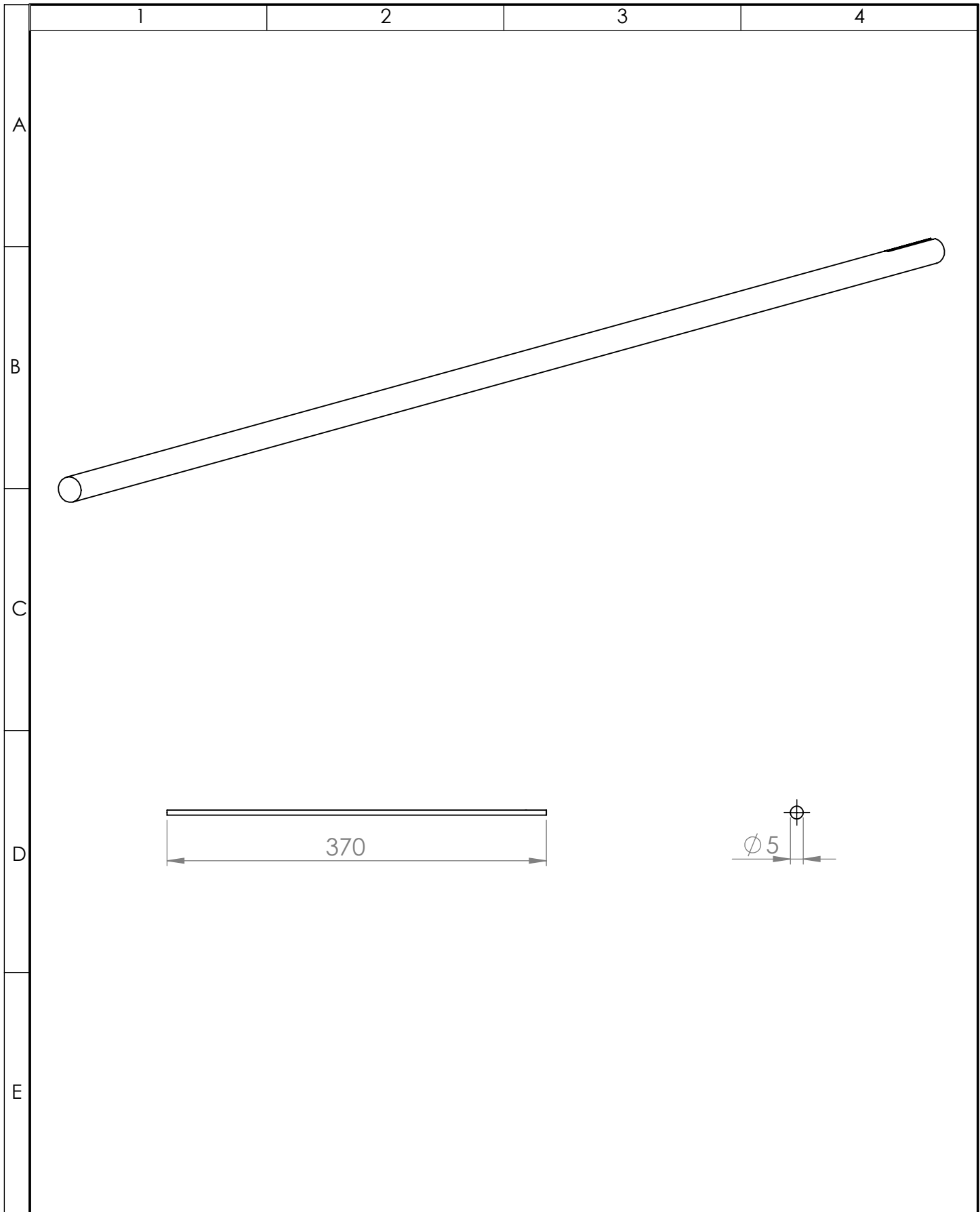
A
B
C
D
E

1 2 3 4

				TOLERANCIA: ± 0.1	PESO: 35 gr	MATERIAL: Acero 1018	
						TÍTULO: Eje 120 x 5 mm	ESCALA: 1:2
				DIBUJO: 03/10/2023	Santiago Ballesteros		
				REVISO: 03/10/2023	Ing. Gonzalo López, Mg		
				APROBO: 03/10/2023	Ing. Gonzalo López, Mg		
				U.T.A.		N.º DE LAMINA HOJA 6 DE 11	REGISTRO:
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:	INGENIERIA MECANICA		SUSTITUCION:	



				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:		
				± 0.1	25 gr	Acero 1018		
				FECHA	NOMBRE	TÍTULO:	ESCALA:	
				DIBUJO: 03/10/2023	Santiago Ballesteros		Eje 300 x 5 mm	1:5
				REVISO: 03/10/2023	Ing. Gonzalo López, Mg			
				APROBO: 03/10/2023	Ing. Gonzalo López, Mg			
				U.T.A.		N.º DE LAMINA	REGISTRO:	
						INGENIERIA MECANICA		HOJA 7 DE 11
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:	SUSTITUCION:				



				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:			
				± 0.1	48 gr	Acero 1018			
					FECHA	NOMBRE	TÍTULO:		ESCALA:
				DIBUJO:	03/10/2023	Santiago Ballesteros	Eje 370 x 5 mm		1:5
				REVISO:	03/10/2023	Ing. Gonzalo López, Mg			
				APROBO:	03/10/2023	Ing. Gonzalo López, Mg			
				U.T.A.			N.º DE LAMINA		REGISTRO:
				INGENIERIA MECANICA			HOJA 8 DE 11		
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:				SUSTITUCION:		

1

2

3

4

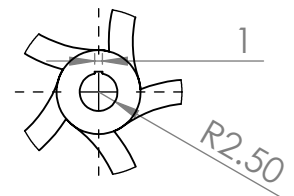
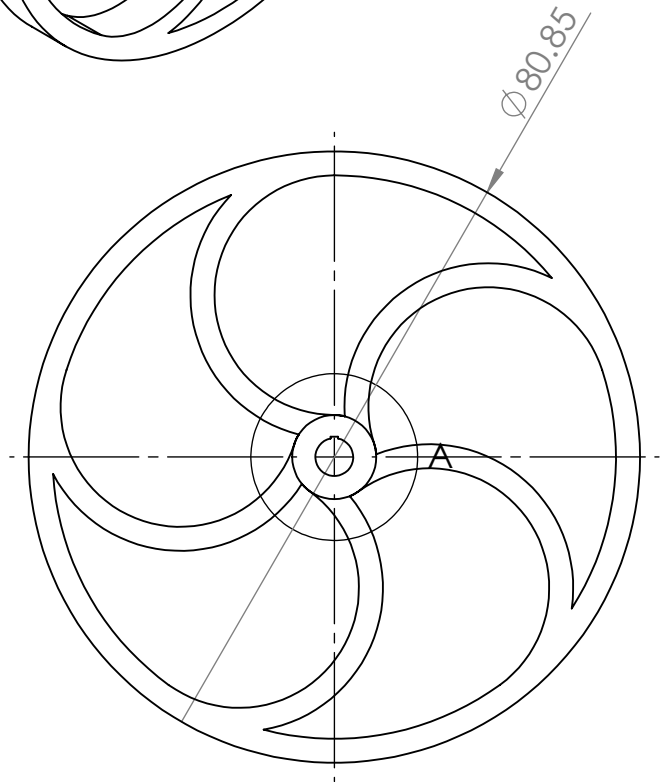
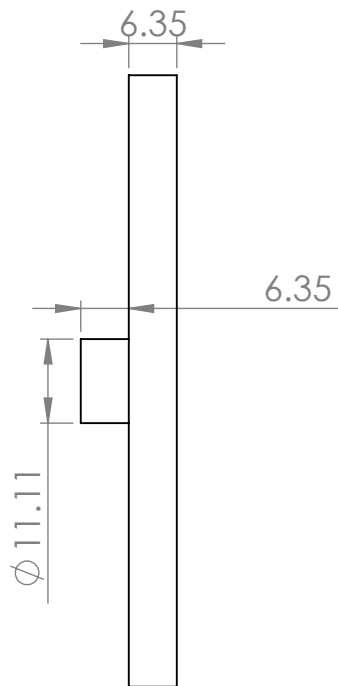
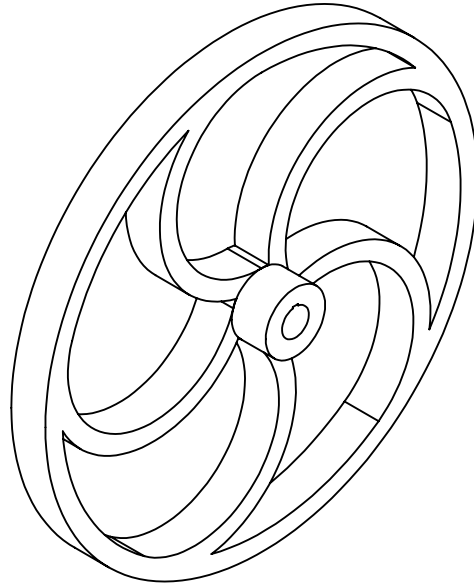
A

B

C

D

E



DETALLE A

				TOLERANCIA: ± 1	PESO: 25 gr	MATERIAL: Teflón	
						TÍTULO: Rueda	ESCALA: 1:1
				DIBUJO: 03/10/2023	Santiago Ballesteros		
				REVISO: 03/10/2023	Ing. Gonzalo López, Mg		
				APROBO: 03/10/2023	Ing. Gonzalo López, Mg		
				U.T.A. INGENIERIA MECANICA		N.º DE LAMINA HOJA 9 DE 11	REGISTRO:
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:			SUSTITUCION:	

1

2

3

4

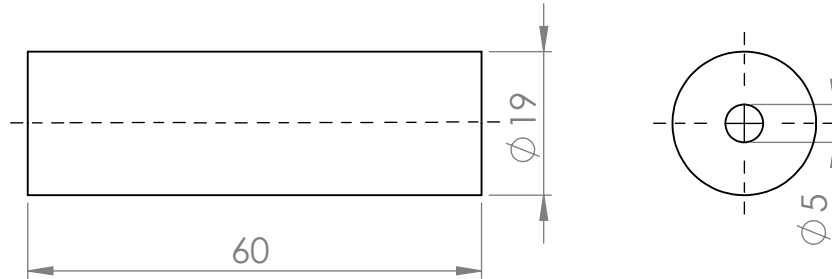
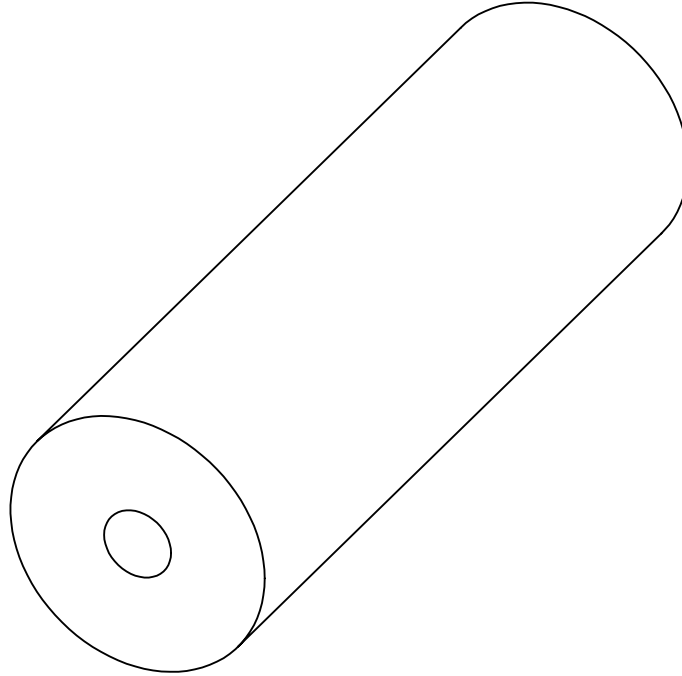
A

B

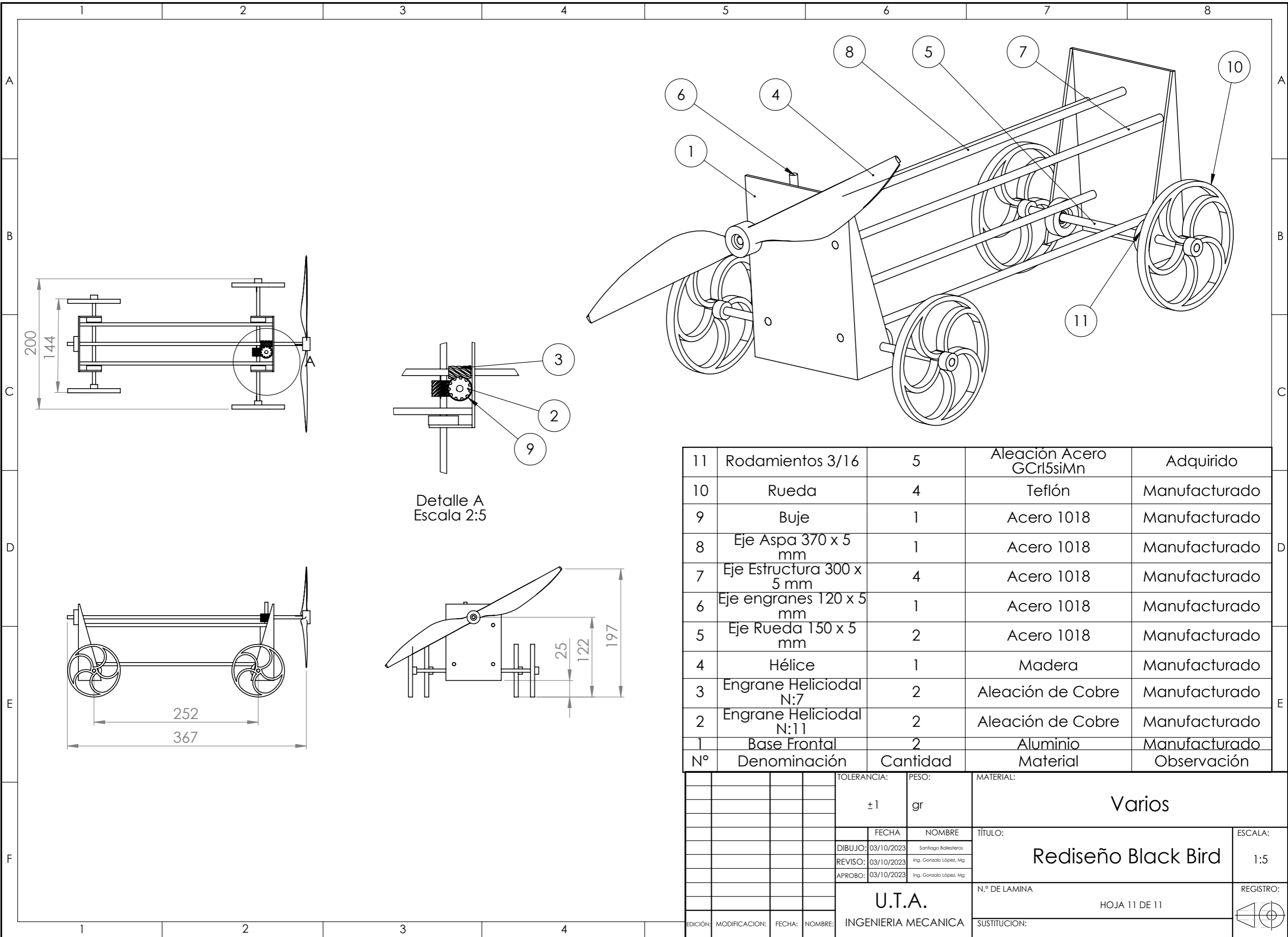
C

D

E



				TOLERANCIA: ± 0.1	PESO: 40 gr	MATERIAL: Acero 1018	
						TÍTULO: Buje	ESCALA: 1:1
				DIBUJO: 03/10/2023	Santiago Ballesteros		
				REVISO: 03/10/2023	Ing. Gonzalo López, Mg		
				APROBO: 03/10/2023	Ing. Gonzalo López, Mg		
				U.T.A. INGENIERIA MECANICA		N.º DE LAMINA HOJA 1 DE 1	REGISTRO:
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:			SUSTITUCION:	



Detalle A
Escala 2:5

11	Rodamientos 3/16	5	Aleación Acero GCr15siMn	Adquirido
10	Rueda	4	Teflón	Manufacturado
9	Buje	1	Acero 1018	Manufacturado
8	Eje Aspa 370 x 5 mm	1	Acero 1018	Manufacturado
7	Eje Estructura 300 x 5 mm	4	Acero 1018	Manufacturado
6	Eje engranes 120 x 5 mm	1	Acero 1018	Manufacturado
5	Eje Rueda 150 x 5 mm	2	Acero 1018	Manufacturado
4	Hélice	1	Madera	Manufacturado
3	Engrane Helicoidal N:7	2	Aleación de Cobre	Manufacturado
2	Engrane Helicoidal N:11	2	Aleación de Cobre	Manufacturado
1	Base Frontal	2	Aluminio	Manufacturado
N°	Denominación	Cantidad	Material	Observación

TOLERANCIA:		PESO:		MATERIAL:	
±1		gr		Varios	
FECHA		NOMBRE		TÍTULO:	
DIBUJO: 03/10/2023		Santiago Ballesteros		Rediseño Black Bird	
REVISO: 03/10/2023		Ing. Gonzalo López, Mg		ESCALA: 1:5	
APROBO: 03/10/2023		Ing. Gonzalo López, Mg		REGISTRO:	
U.T.A.				N.º DE LAMINA	
INGENIERIA MECANICA				HOJA 11 DE 11	
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:	SUSTITUCION:	

The physics of a push-me pull-you boat

B. L. Blackford

Department of Physics, Dalhousie University, Halifax, Canada
(Received 20 March 1978; accepted 17 May 1978)

The basic laws of mass, energy, and momentum conservation are applied to a novel wind-driven water craft. The resulting analysis is an instructive application of these laws, suitable as an undergraduate physics exercise. We find a critical condition which must be met before the boat will accelerate against the wind, and we also obtain expressions for calculating the final speed.

I. INTRODUCTION

A novel wind-driven water craft was recently reported in the literature.¹ In this boat a windmill-type propeller is connected via a straight shaft to an underwater propeller, as shown in Fig. 1. Kinetic energy extracted from the wind by the air propeller is used by the water propeller to **move the boat directly against the wind**. We have demonstrated such a boat at recent public displays in our junior level physics laboratory. A typical nonphysicist is suitably impressed by the novelty of the boat, whereas the initial response of people with some physics background is often one of disbelief. Being familiar with the laws of energy and momentum conservation, they feel that somehow these laws are being violated. Indeed, a detailed analysis of the device is an instructive application of these laws, suitable as an undergraduate physics exercise. (The topic also aroused considerable interest when given to a graduate physics problems class.) We present such an analysis here. **It is found that there is a critical condition on the relative sizes of the two propellers which must be met before the boat will move against the wind, even for ideal propellers.** It is also found that the maximum speed attainable under ideal conditions is **twice the wind speed**. The performance of an actual boat is expected to be considerably less than this.

II. THEORY

A. Energy from the wind (efficiency of an ideal windmill) (Ref. 2)

Figure 2 shows a propeller of swept out area A_1 immersed in a fluid flow field (density ρ_1) whose undisturbed speed and pressure are W and P_∞ , respectively. The air speed at the propeller is $W(1-a)$ where $0 < a < 1$, and the downstream speed is W_∞ . If we assume incompressible flow along the streamlines, shown in Fig. 2, then **mass conservation** requires that

$$AW = A_1W(1-a) = A_\infty W_\infty, \quad (1)$$

where A and A_∞ are the cross-sectional areas of the streamtube far upstream and far downstream, respectively. The factor $1-a$ is simply a convenient way of expressing the decrease in wind speed at the propeller. Now apply **Bernoulli's theorem**, in the form $P + (1/2)\rho v^2 = \text{const}$, to the regions upstream and downstream of the propeller. Upstream of the propeller we have

$$P_\infty + (1/2)\rho_1 W^2 = P_u + (1/2)\rho[W(1-a)]^2, \quad (2)$$

where P_u is the pressure immediately upstream of the propeller. On the downstream side

$$P_\infty + (1/2)\rho_1 W_\infty^2 = P_d + (1/2)\rho_1[W(1-a)]^2, \quad (3)$$

where P_d is the pressure immediately downstream of the propeller.

Combining Eqs. (2) and (3) one finds a pressure discontinuity at the propeller, given by $P_u - P_d \equiv \Delta P = (1/2) \times \rho_1(W^2 - W_\infty^2)$. The **force** exerted on the propeller by the stream is therefore given by

$$F_W \equiv A_1 \Delta P = (1/2)\rho_1 A_1 (W^2 - W_\infty^2). \quad (4)$$

From momentum conservation, the force on the propeller can also be written

$$F_W = \rho_1 A W^2 - \rho_1 A_\infty W_\infty^2, \quad (5)$$

where the two terms represent the rates at which momentum enters and leaves the streamtube, respectively. Combining Eqs. (1), (4), and (5) one obtains $W_\infty = W(1-2a)$, which gives

$$F_W = 2\rho_1 A_1 W^2 a(1-a) \quad (6)$$

when substituted in Eq. (4). The **power** extracted from the wind is given by

$$P_W = F_W W(1-a) = 2\rho_1 A_1 a(1-a)^2 W^3. \quad (7)$$

Maximizing the power P_W with respect to the parameter a , gives $a_{\text{max}} = 1/3$. Using this optimum value of a , one finds that the efficiency of the propeller, as defined by $P_W/(1/2)\rho_1 A_1 W^3$, is equal to 16/27. This is **the maximum efficiency of an ideal windmill**. Real windmills of modern design^{2,3} are capable of reaching 60%-70% of this value.

B. Net forward thrust

Assume that the boat is held fixed with respect to the undisturbed water and focus attention on the water propeller A_2 , Fig. 1. By using arguments identical to those used above in obtaining Eqs. (1)-(6), one finds that the thrust delivered by the propeller A_2 is given by

$$F_2 = 2\rho_2 A_2 V^2. \quad (8)$$

In this case, it is helpful to note that the speed of the water in the streamtube far upstream of A_2 is zero while that far downstream is $V_\infty = 2V$, where V is the water speed at the propeller.

The rate of **increase of the kinetic energy of the water** is given by $F_2 V$ and if this is **equated to P_W** , as given by Eq. (7), one finds that

$$F_2 = 0.56 \rho_2 A_2 (\rho_1 A_1 / \rho_2 A_2)^{2/3} W^2, \quad (9)$$

where $a = 1/3$ was used. In obtaining Eq. (9), the propeller A_2 was assumed to be capable of converting the shaft energy

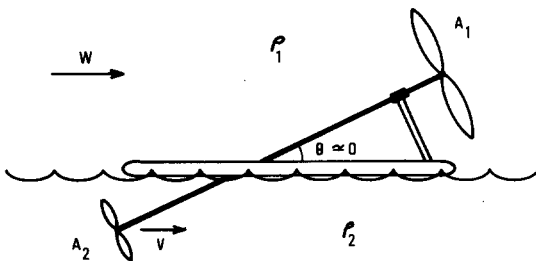


Fig. 1. Sketch of a boat which supports a shaft with a propeller on each end. One propeller, of swept-out area A_1 , is located in the air and the other propeller, of area A_2 , is located below the water surface. Both propellers are assumed to be far enough from the water surface so that its effect can be ignored. The speed of the air far upstream of the boat is W . The speed of the water immediately downstream of A_2 is V , where V is due to the effects of A_2 . ρ_1 and ρ_2 are the densities of air and water, respectively.

to kinetic energy of the water with 100% efficiency. This is *not* inconsistent with the 59% efficiency of an ideal windmill, as it refers to a different problem.

The net forward thrust $F_2 - F_W$ is given by subtracting Eq. (6) from Eq. (9) and rearranging the resulting expression, that is

$$F_{\text{net}} = \rho_1 A_1 W^2 [0.56(\rho_2 A_2 / \rho_1 A_1)^{1/3} - 4/9]. \quad (10)$$

This expression for F_{net} assumes that both propellers operate at their maximum possible efficiencies and that there are no energy losses in the coupling shaft. It also neglects wind-drag forces on the hull and superstructure of the boat. Even for these ideal conditions we see from Eq. (10) that the net force will be positive only if $\rho_2 A_2 / \rho_1 A_1 \geq 1/2$.

The essential qualitative explanation of why the boat moves forward can be seen from Eq. (10). It clearly depends on the way in which the kinetic energy extracted from the air is added to the water. If the streamtube is narrow ($\rho_2 A_2 \ll \rho_1 A_1$) the momentum in the water jet will be less than that extracted from the air and the boat would move backwards. On the other hand, if $\rho_2 A_2 \gg \rho_1 A_1$ the momentum in the water jet is larger than that extracted from the air and a net forward force results. This is analogous to the situation of two masses having the same kinetic energy, whereas the heavier mass has the largest momentum.

C. Ultimate speed

We now consider the situation where the boat is allowed to move forward, with the aim of calculating the ultimate speed u . It is convenient to use a reference frame attached to the boat. The power extracted from the wind by the propeller A_1 will then be given by

$$P'_W = (8/27)\rho_1 A_1 (W + u)^3, \quad (11)$$

where $a = 1/3$ was used in Eq. (7) and the effective wind felt by the boat is $W + u$ rather than W . Similarly, the force on the propeller A_1 is given by

$$F'_W = (4/9)\rho_1 A_1 (W + u)^2. \quad (12)$$

The water propeller A_2 now sees an effective upstream speed equal to u , a relative water speed at the propeller of $u + V$ and a downstream speed equal to $u + V_\infty$. Applying arguments similar to those in Sec. II A, one still finds that $V_\infty = 2V$. By analogy with Eq. (4), the thrust produced by A_2 can then be written

$$F'_2 = (1/2)\rho_2 A_2 [(V_\infty + u)^2 - u^2] = 2\rho_2 A_2 (u + V)V. \quad (13)$$

The force F'_2 adds kinetic energy to the water at the rate $F'_2(u + V)$ and if we again assume that the propeller A_2 is 100% efficient then we have, from Eqs. (11) and (13)

$$F'_2(u + V) = 2\rho_2 A_2 (u + V)^2 V = (8/27)\rho_1 A_1 (W + u)^3. \quad (14)$$

At the ultimate speed u all forces on the boat must balance, i.e.,

$$F'_2 - F'_W - F_D = 0, \quad (15)$$

where

$$F_D = (1/2)\rho_2 A_D C_D u^2 \quad (16)$$

is the drag force⁴ of the water against the hull. A_D is the effective frontal area of the hull and C_D is the drag coefficient. Substituting Eqs. (12), (14), and (16) into Eq. (15) then gives

$$\frac{(8/27)\rho_1 A_1 (W + u)^3}{(V + u)} - (4/9)\rho_1 A_1 (W + u)^2 - (1/2)\rho_2 A_D C_D u^2 = 0. \quad (17)$$

Equations (14) and (17) represent two equations for the unknowns u and V , which must be solved simultaneously. The general solution is very messy algebraically and it is perhaps more instructive to look at some particular cases.

First, consider the case where the drag coefficient C_D is zero, as this will yield the maximum possible value of u . With this assumption, Eqs. (14) and (17) yield

$$u = \left(\frac{2\rho_2 A_2 / \rho_1 A_1 - 1}{\rho_2 A_2 / \rho_1 A_1 + 1} \right) W \quad (18)$$

and

$$V = u / [2(\rho_2 A_2 / \rho_1 A_1) - 1]. \quad (19)$$

In the limit $\rho_2 A_2 / \rho_1 A_1 \gg 1$, $u = 2W$ and $V \ll u$. That is, the maximum possible upwind speed of the device is equal to twice the wind speed. On the other hand, the maximum downwind speed under the same conditions would be equal to the wind speed, as one can easily show from Eqs. (14) and (17) with appropriate sign changes.

The performance of an actual device will be reduced below the maximum value, $u = 2W$, by (a) nonzero drag coefficients, (b) smaller values of the parameter $\rho_2 A_2 / \rho_1 A_1$, and (c) propeller inefficiency. For example, if one chooses $A_1 = \pi \text{ m}^2$, $A_2 = 0.2 \text{ m}^2$, $A_D = 0.1 \text{ m}^2$, $C_D = 0.2$, $\rho_2 = 1000 \text{ kg/m}^3$, and $\rho_1 = 1.20 \text{ kg/m}^3$, then one finds from Eqs. (14) and (17), that $u = 0.56W$ and $V = 0.034W$. If propeller

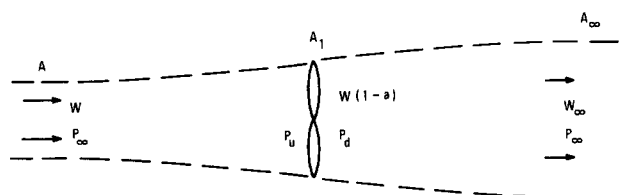


Fig. 2. Sketch of a propeller of swept-out area A_1 , immersed in a flowing fluid. The dashed lines depict the streamtube of the fluid which is actually intercepted by the propeller disk. The labeled quantities are defined in the text as needed.

inefficiency is taken into account the value of u will be further reduced, by 50% or more.

D. Energy considerations

In the above derivation of Eq. (14) it was assumed that all of the kinetic energy extracted from the wind is added to the water by the propeller A_2 . But, what about the work done by the drag force F_D ? Have we violated energy conservation? To answer this question it is best to work in a reference frame at rest with respect to the undisturbed water. In this frame the force F_D moves at speed u and therefore dissipates energy in the water at a rate $F_D u$. If we are to conserve energy then the power extracted from the wind must supply this dissipation as well as the kinetic energy increase in the water passing through the propeller A_2 .

First we note that, in the rest frame, the kinetic energy extracted from the wind by A_1 and that added to the water by A_2 will not be the same as in the boat frame. Recall that when a mass m has a speed change $v_f - v_i \equiv \Delta v$ in the rest frame, then the change in kinetic energy is

$$\Delta KE = (1/2)m(v_f^2 - v_i^2). \quad (19')$$

The corresponding kinetic energy change in a reference frame moving with speed u is given by

$$\Delta KE' = \Delta KE + m\Delta vu. \quad (20)$$

Applying this relation to the propellers, in the rest frame, we find that the power extracted from the wind is

$$P_W = P'_W - (4/9)\rho_1 A_1 (u + W)^2 u = P'_W - F_W u, \quad (21)$$

where P'_W is the power from the wind in the moving frame, as given by Eq. (11). F_W is the force of the wind against propeller A_1 and is the same in both frames. Similarly, the power added to the water by A_2 is given by

$$P_2 = P'_2 - 2\rho_2 A_2 (u + V) V u = P'_2 - F_2 u, \quad (22)$$

where P'_2 is the power added to the water by A_2 in the moving frame and F_2 is the force produced by A_2 . The energy balance in the rest frame therefore takes the form

$$P_W - P_2 = (P'_W - P'_2) + (F_2 - F_W)u. \quad (23)$$

Recalling that $P'_W = P'_2$ in the moving frame and using Eq. (15), Eq. (23) becomes

$$P_W - P_2 = F_D u. \quad (24)$$

Therefore a satisfactory energy balance does exist in the rest frame.

III. CONCLUDING REMARKS

A successful demonstration boat used a 36-cm-diam model airplane propeller for A_1 and a 10-cm one for A_2 . These were connected by a 65 cm \times 3.2 mm stainless-steel shaft mounted (shaft inclined at 22° to the horizontal) on a catamaran-type hull made from two thin-walled aluminum tubes (41 \times 2.5 cm) separated by 22 cm. Performance can be optimized by trying propellers of various pitch. This unit produced a net forward thrust of nearly 1 N in a windspeed of 5 m/s provided by a household fan.

We note that a vertical-axis windmill³ could easily be utilized with the above type of boat. The omnidirectional nature of such windmills should give them a practical advantage in this application. We also note that a wheeled vehicle could also be driven against the wind by coupling the propeller shaft to the wheels. The maximum attainable speed, under ideal conditions, is expected to be twice the wind speed in this case also.

ACKNOWLEDGMENT

This work benefited from numerous discussions with students and colleagues.

¹S. Martin, *Sci. Am.* 233 (No. 12), 125 (1975).

²*Standard Handbook for Mechanical Engineers*, edited by T. Baumeister and L. S. Marks (McGraw-Hill, New York, 1967), p. 9-8. *Handbook of the Engineering Sciences*, edited by J. H. Potter (Van Nostrand, Princeton, NJ, 1967), Vol. 2, p. 298.

³P. South and R. S. Rangi, NAE-LTR-LA-74, National Research Council of Canada, Ottawa, 1972.

⁴*Handbook of Tables for Applied Engineering Science*, edited by R. E. Bolz and G. L. Tuve (Chemical Rubber, Cleveland, 1973), p. 516.

Analysis of Down-Wind Propeller Vehicle

Md. Sadak Ali Khan*, Syed Ali Sufiyan**, Jibu Thomas George**, Md. Nizamuddin Ahmed**

*Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, M. J. C. E. T., Hyderabad.

**Students of B. E. IV/IV Mechanical Engineering, M. J. C. E. T., Hyderabad.

Abstract – In the last decade many researches have been carried out on wind driven vehicle; a large number of academic publications have been presented. There have been many “Down Wind Faster Than The Wind (DWFTTW)” arguments based on energy flow. Wind driven vehicle systems travel faster than the wind along its direction. This paper deals with energy conversion mechanism of a vehicle driven by wind. The Downwind vehicle is designed with a propeller that pushes it along like an aircraft's propeller does. The propeller is connected to the wheels of the vehicle through a chain/belt drive, so that when the vehicle moves forward, the propeller spins in such a way to provide a thrust that will speed up the vehicle if there is energy available from a tailwind, which explains the energy conversion mechanism. Specifically, focus is on the horizontal axis propeller of a downwind vehicle to make it have a relative motion with the wind at a speed greater than the speed of the wind. The simulations of the analysis are carried out in JavaProp software.

Index Terms – Aerofoil, DWFTTW, Momentum, Propeller, Thrust Force

I. INTRODUCTION

The energy crisis, environmental concerns and scarcity of conventional fuel have increased interest in green engineering. Using wind-power to produce energy in order to propel a vehicle is one such application of green engineering.

If a uniform wind is available over a level surface, is it possible to construct a man-carrying vehicle which by use of wind energy alone can accelerate in the wind direction from zero speed up to a speed larger than the wind speed? The work described in the paper has been carried out for the purpose of answering this problem.

The first downwind vehicle was created by Andrew Bauer [1] in 1969 which went downwind at a speed of 1.2 times the wind speed. In 1978, B. L. Blackford [2] applied the basic laws of mass, energy and momentum conservation to this novel wind-craft. Later in 2002, a wind test apparatus was introduced by Frank Bailey [3] which offered a means of testing a model of the downwind vehicle. The apparatus basically consisted of a wind tunnel erected over a towing tank so that velocity could be measured along the course of the model.

In 2003, a suggestion was made by Theo Schmidt [4] to use either an ogival or an un-cambered profile propeller in combination with a swiveling drive so that the thrust produced by it pushes the vehicle forward. In addition to it, Victor Korepanov [5] in 2004 explained the analysis behind achieving a speed of four times the wind speed. Also there has been an unofficial claim of going 4.2 times faster downwind, but there has been no authentic tests run of it.

John C. Wilson [6] in 2005 demonstrated that the appropriate principle to get forward thrust in a downwind vehicle is that the propulsion mechanism must be moving at a speed less than the wind speed. The same year, in July, Peter A. Sharp [7] proposed a simplified demonstration model of a Bauer air propeller vehicle that was relatively easy to construct.

In 2006, Jack Goodman [8] explained that the correct gearing of the propeller to the wheels of the car will speed up the car if energy is available from a tailwind. Again John C. Wilson [9] in 2007 conducted a study of the gear-ratio between the speed of the propeller and the speed of the wheels for a Bauer vehicle.

In 2009, Mark Drela [10], [11] formulated the Velocity as well as the Power analysis for the downwind vehicle. Later, the same year, a simple optimization method for both the wind turbine and propeller rotor, based on the Blade Element Momentum Theory was presented by Mac Gaunaa, Stig Øye and Robert Mikkelsen [12].

A comparison of the various aerofoil profiles was made by Shethal Thomas Kodyattu [13] in 2010 while designing the propeller of a downwind vehicle. The latest explanation was given by S. Morris [14] in the same year, in June, which compared the propeller of a downwind vehicle to that of an aircraft.

The most successful and the latest wind-driven vehicle was the Blackbird [15] built by thin Air Designs Team in July 2010 which travelled downwind upto 2.8 times the wind speed, according to the NALSA speed regulations [16].

Nomenclature

V	Vehicle Speed
W	Wind Speed
F_t	Drag Force on Vehicle
F_p	Thrust Force on air Propeller
F_{net}	Net Thrust of the Vehicle
C_t	Coefficient of Thrust
C_p	Coefficient of Power
C_r	Coefficient of Rolling Resistance
P_t	shaft Power of Vehicle wheels
P_p	shaft Power of air Propeller
P_{net}	Net Power developed
A_d	Air Drag Area
A_p	Area of air Propeller disk
N	rpm of Propeller
D	Diameter of Propeller
D_{sp}	Diameter of Spinner or hub
ρ	Density of Air
η_g	Gearing/transmission Efficiency
η_p	Total Efficiency of air Propeller
η_{swirl}	Swirl Efficiency of air Propeller
ΔV	Change in Velocity of Vehicle
ΔW	Change in Velocity of air Propeller

II. RESEARCH AND ANALYSIS

A. Force and Power Analysis

Considering the forces acting on the vehicle as shown in the Figure 1,

$$F_{net} = F_p - F_t$$

Since we know that $P_p = P_t \eta_g$ or

$$F_p \frac{V-W}{\eta_p} = F_t V \eta_g$$

$$\text{Therefore } F_{net} = F_t \cdot \left(\frac{V}{V-W} \cdot \eta_g \cdot \eta_p - 1 \right)$$

which is positive only as long as

$$\frac{V}{V-W} \cdot \eta_g \cdot \eta_p > 1 \quad (\text{requirement of DWFTTW})$$

Applying energy conversion principle, the net power developed by the vehicle could be written as the sum of power produced by propeller thrust and power lost by drag force on the vehicle and kinetic energy deposited in vehicle and air,

$$\begin{aligned} P_{net} &= P_t - P_p \\ &= F_p W - F_{net} V - \frac{F_t \Delta V}{2} - \frac{F_p \Delta V}{2} \end{aligned}$$

In steady-state operation, P_{net} must be sufficiently positive to balance the remaining power losses in the system. A positive P_{net} indicates that the power delivered by wind energy could be used to accelerate the vehicle beyond the wind speed. The other losses not accounted for were power-transmission losses, profile-drag losses on the propeller and turbine blades, and swirl losses in the propeller and turbine slipstreams.

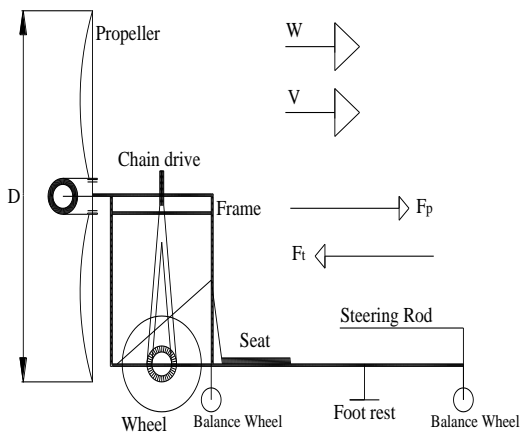


Figure 1: Side view of the air propeller vehicle

For optimization purposes, the following dimensionless parameters were introduced which characterize the operation of any Downwind vehicle.

$$\text{Excess Thrust Ratio: } F = \frac{F_{net}}{F_p}$$

$$\text{Apparent Velocity Ratio: } Z = \frac{V-W}{W}$$

$$\text{Air Propeller Thrust Coefficient: } C_t = \frac{2F_p}{\rho V^2 A_p}$$

Using the above relations, the equation could be rewritten as

$$\frac{W}{F_p} C_r + Z^2 \frac{1}{C_t A_p} = \left\{ 1 + \left[\frac{2\eta_g \eta_p}{z + \sqrt{z^2 + \frac{C_t}{\eta_{swirl}}}} - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1}$$

Z could be replaced here by $\frac{V-W}{V}$ to obtain the $\frac{V}{W}$ ratio.

B. Analysis using JavaProp

For a quick and accurate analysis of the various forces acting on the propeller, JavaProp software was used.

The input parameters of the propeller required to be given in this software were Propeller name, Propeller Diameter, Spinner (or Hub) Diameter, Speed of rotation, axial inflow Speed, Number of blades and Thrust/power/torque required. For these input parameters as shown in Table I, the output obtained in JavaProp are as shown in Table II.

The basic equations used for the analysis were

$$C_t = \frac{F_p}{\rho n^2 D^4}$$

$$C_p = \frac{P}{\rho n^3 D^5}$$

$$\text{Advance Ratio, } J = \frac{V}{nD}$$

$$\text{Efficiency, } \eta = \frac{V}{nD} \frac{C_t}{C_p}$$

Table I: Input values in design tab of JavaProp

Propeller Name	NACA 6412
Propeller Diameter, D	4 m
Spinner Diameter, D_{sp}	0.15 m
Revolutions per minute (rpm)	120 rpm
Velocity, V	4 m/s
Number of Blades, B	2
Thrust	100 N

The output given by JavaProp included Advance Ratio, Efficiency, Thrust, Power, Coefficient of Thrust, Coefficient of Power and Pitch.

Table II: Output result in design tab of JavaProp

$\frac{V}{nD}$	0.5	$\frac{V}{\Omega R}$	0.159
Efficiency, η	70.47%	loading	medium
Thrust, T	100 N	C_t	0.08
Power, P	567.65 W	C_p	0.0568
β at 75% R	18°	Pitch H	3.05 m

Solving for $\frac{V}{W}$ using $\eta_{swirl} = 0.95$, $\frac{W}{Fp} C_r = 0.02$, $\frac{A_d}{A_p} = 0.04$ and with the result obtained from Table II, it was obtained that $\frac{V}{W} = 2.525$ which indicates that the velocity of vehicle is 2.525 times faster than the velocity of wind. Correspondingly, $\frac{V}{W}$ Vs C_t graphs have been drawn for various values of η_{net} as shown in Figure 2 which confirms that $\frac{V}{W} > 1$.

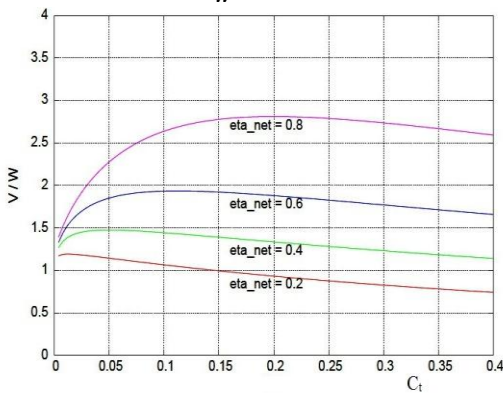


Figure 2: $\frac{V}{W}$ ratio vs. propeller thrust coefficient (C_t)

III. RESULTS OF SIMULATION

The results shown in this paper are for NACA 6412 aerofoil profile which was chosen after comparison between CLARK Y, NACA 6412, NACA 9412 and MH 114 profiles since it has a better L/D ratio, less camber and is comparatively easier to construct. The profile and geometry for NACA 6412 are shown in Table III and Figure 3.

Table III: Aerofoil profile characteristics

Propeller Profile Name	NACA 6412
Thickness	0.12c
Camber	0.06c
Trailing edge angle	14.2°
Lower flatness	0.812c
Leading edge radius	0.17c
Max CL	1.785
Max CL angle	12.0°
Max L/D	60.34
Max L/D angle	4.0°
Max L/D CL	1.268
Stall angle	4°
Zero lift angle	-6.0°

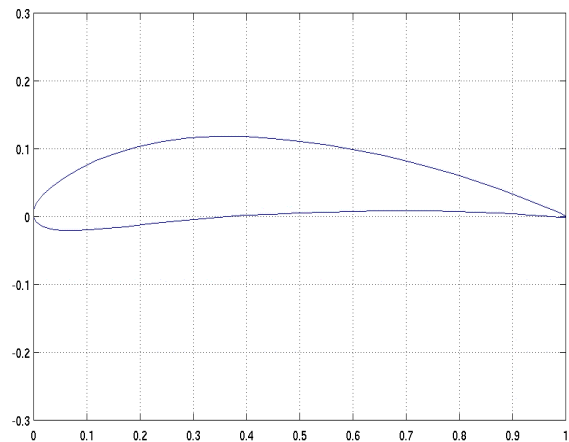


Figure 3: Geometry of NACA 6412 aerofoil profile

When analyzed using JavaProp for 4m and 8m diameters of the propeller, it was seen that the thrust and power coefficients decreased as the diameter was doubled (Figure 4) and the efficiency remained approximately the same but for a smaller advance ratio (Figure 5) of the propeller.

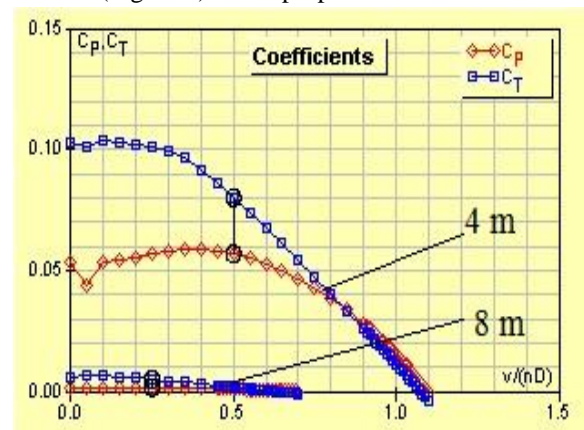


Figure 4: C_t, C_p vs. advance ratio $\frac{V}{nD}$ for NACA 6412 aerofoil for different diameters

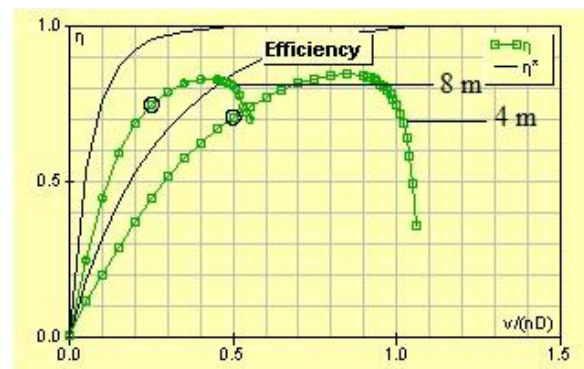


Figure 5: Efficiency (η) Vs advance ratio $\frac{V}{nD}$ for NACA 6412 aerofoil for different diameters

IV. CONCLUSION

It is theoretically possible to build a wind driven vehicle that can go in the downwind direction faster than the free stream wind speed (using a propeller in the air). There does not exist a definite upper limit for vehicles of this kind. As long as efficiencies are improved, the velocities would also increase un asymptotically. The calculations above show that it was possible to go downwind even 2.5 times the speed of wind in a wind propelled vehicle.

A variable pitch propeller is suggested so that by varying pitch angle we can maintain an optimal angle of attack (maximum lift to drag ratio) on the propeller blades as vehicle speed varies. Further analysis using computational software is suggested to understand the velocity and pressure changes that occur around the propeller in order to get a better design to travel faster downwind.

REFERENCES

- [1] Andrew B. Bauer, The ancient interface – faster than the wind, *Bauer and Associates, Orange, California*, 1969.
- [2] B. L. Blackford, The physics of a push-me pull-you boat, *American Journal of Physics, Volume 46*, 1978, pp. 1-3.
- [3] Frank Bailey, A downwind faster than the wind test apparatus, *Catalyst Journal of A.Y.R.S., No.1*, 2002, pp. 30-31.
- [4] Theo Schmidt, Down wind faster than the wind, *Catalyst Journal of A.Y.R.S., No.12*, 2003, pp. 22-26.
- [5] Victor Korepanov, Four times faster than the wind, *Catalyst Journal of A.Y.R.S., No.18*, 2004, pp. 21-27.
- [6] John C. Wilson, Downwind as fast as you like, *Catalyst Journal of A.Y.R.S., No.19*, 2005, pp. 21-24.
- [7] Peter A. Sharp, A Bauer string yacht demonstration, *Catalyst Journal of A.Y.R.S., No.21*, 2005, pp. 18-21.
- [8] Jack Goodman, Down wind faster than the wind, *Catalyst Journal of A.Y.R.S., No.23*, 2006, pp. 5.
- [9] John C. Wilson, Speed downwind vs. gear ratio in a Bauer vehicle, *Catalyst Journal of A.Y.R.S., No.28*, 2007, pp. 18-19.
- [10] Mark Drela, DDWFTW analysis, 2009.
- [11] Mark Drela, DDWFTW power analysis, 2009.
- [12] Mac Gaunaa, Stig Øye and Robert Mikkelsen, Theory and design of flow driven vehicles using rotors for energy conversion, *Proc. EWEC, Marseille, France*, 2009, pp. 1-10.

- [13] Shethal Thomas Kodiyattu, Design of a propeller for downwind faster than the wind vehicle, San Jose State University, 2010.
- [14] S. Morris, Downwind car explanation, 2010.
- [15] Rick Cavallaro, The little cart that did, *MAKE magazine*, July 2010.
- [16] NALSA speed record regulations (including Directly Up Wind and Directly Down Wind), revision 4, 2012.

AUTHORS

First Author – Md. Sadak Ali Khan, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Muffakham Jah College of Engineering and Technology, Road No.3, Banjara Hills, Hyderabad, Andhra Pradesh, India – 500034.

Email: salikhanmm@gmail.com

Second Author – Syed Ali Sufiyan, Student of B. E. IV/IV Mechanical Engineering, Muffakham Jah College of Engineering and Technology, Road No.3, Banjara Hills, Hyderabad, Andhra Pradesh, India – 500034.

Email: alisufiyan.64@gmail.com

Third Author – Jibu Thomas George, Student of B.E. IV/IV Mechanical Engineering, Muffakham Jah College of Engineering and Technology, Road No.3, Banjara Hills, Hyderabad, Andhra Pradesh, India – 500034.

Email: jibug121@gmail.com

Fourth Author – Md. Nizamuddin Ahmed, Student of B. E. IV/IV Mechanical Engineering, Muffakham Jah College of Engineering and Technology, Road No.3, Banjara Hills, Hyderabad, Andhra Pradesh, India – 500034.

Email: nizamuddin8019@gmail.com

Correspondence Author – Jibu Thomas George

Email: jibug121@gmail.com

Alternate Email: geothomasfng@yahoo.com

Contact Number: 0091-9985248582

[Alternate Contact Numbers: 0091-9959450688, 0091-9849578546,

0091-9160012256,

0091-9985114886]