



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA**



**DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN BANCO DE PRUEBA DE TURBINA  
EÓLICA BASADA EN IMPRESIÓN 3D**

POR

**Matías Benjamín Gato Esparza**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para  
optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:  
Dr. Enrique Ignacio Wagemann Herrera

Junio 2024  
Concepción (Chile)

© 2024 Matías Benjamín Gato Esparza

© 2024 Matías Benjamín Gato Esparza

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o  
procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

### **Agradecimientos**

**A mi profesor guía, que ha estado presente cuando se le necesitaba.**

**A don Mario, que ha sido muy amable ayudándome con la fabricación en el taller.**

**A Scarlett, que me ayudó con las impresiones en 3D que necesitaba en el laboratorio.**

**A mi amigo Tomás, que estuvo disponible cuando necesité su apoyo en el proyecto.**

*Esta memoria está dedicada*

*A mi gato Ébano, que ha sido mi compañero por estos siete largos años de ingeniería.*

*A mi querida mamá Blanca, que ha sido un pilar en todos mis periodos de estudio.*

*A mis tíos José Manuel y Marcela, cuyo cariño y atención siempre encuentro.*

*A mi amor Florencia, cuya compañía enternecen mi espíritu y mi corazón.*

*A mi mejor amiga Anasol, que me aguanta continuamente.*

## Resumen

En la presente memoria de título, se elabora el diseño de un banco de ensayos para turbinas eólicas basado en impresión 3D, esto con el fin de confeccionar un prototipo que sirva para visualizar y comprender los principios básicos que rigen el funcionamiento de un aerogenerador. Lo cual es útil para su uso en un entorno educativo que busca acercar los conceptos de la energía eólica a los estudiantes de cursos de ingeniería.

El proceso de diseño ha seguido una metodología que consiste en la selección del tipo de filamento a utilizar y determinar las partes esenciales que componen un aerogenerador, para luego realizar un dimensionamiento de aspas, transmisión y otros elementos, considerando las limitaciones que puedan existir en cada caso. Luego se prosiguió con el modelado 3D de todos los componentes necesarios del aerogenerador o en su defecto, el plano de fabricación requerido, siempre tomando en cuenta tolerancias dimensionales. Posteriormente se procede con la fabricación del prototipo, una vez todas las piezas se hayan disponibles, se ensambla el modelo y se realizan distintas pruebas sobre su funcionamiento.

Siguiendo el proceso descrito se logra obtener un prototipo de un banco de ensayos funcional que satisface los requisitos planteados. Luego de un análisis preliminar al mismo se detectan diversos problemas y dificultades que afectan al funcionamiento óptimo del aerogenerador, por lo que se plantean recomendaciones y mejoras a futuro con tal de contribuir a desarrollar un modelo sofisticado al cual se le realicen mediciones precisas para su caracterización.

## **Abstract**

In the present thesis, the design of a test bench for wind turbines based on 3D printing is developed. The aim is to create a prototype that helps visualize and understand the basic principles governing the operation of a wind turbine. This is useful for educational environments that seek to introduce wind energy concepts to engineering students.

The design process followed a methodology that includes selecting the type of filament to use and determining the essential parts that make up a wind turbine. Then, the blades, transmission, and other elements are dimensioned, considering the limitations that may exist in each case. Next, a 3D model of all the necessary components of the wind turbine is created, or alternatively, the required blueprints are made, always considering dimensional tolerances. The prototype is then manufactured, and once all the pieces are available, the model is assembled, and various tests are conducted on its operation.

Following the described process, a functional test bench prototype that meets the stated requirements is obtained. After a preliminary analysis, various problems and difficulties affecting the optimal operation of the wind turbine are detected, leading to recommendations and future improvements to help develop a sophisticated model for precise measurements and characterization.

## Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos .....	iii
Lista de Tablas .....	v
Lista de Figuras .....	vi
Glosario .....	ix
<b>1 CAPÍTULO 1: Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del problema .....	1
1.2 Alcances del proyecto.....	3
1.3 Objetivo general .....	3
1.4 Objetivos específicos .....	3
1.5 Consideraciones de diseño.....	3
1.6 Metodología.....	5
<b>2 CAPÍTULO 2: Marco Teórico .....</b>	<b>6</b>
2.1 Materialidad.....	6
2.2 Tipo de turbina.....	9
2.3 Elementos del banco de ensayo .....	11
2.4 Disposición de los elementos en el banco de ensayos.....	12
2.5 Análisis dimensional por el teorema de Pi-Buckingham.....	13
2.6 Dimensionamiento de las aspas .....	16
2.7 Método BEM (blade element momentum).....	21
2.8 Dimensionamiento de la transmisión .....	24
2.9 Selección del elemento de salida.....	28
2.10 Evaluación del freno magnético .....	29
2.11 Evaluación del generador .....	31
2.12 Selección de rodamientos .....	32
2.13 Dimensionamiento de los ejes del aerogenerador .....	33
<b>3 CAPÍTULO 3: Diseño de materialización .....</b>	<b>35</b>
3.1 Modelo 3D del rotor .....	35
3.2 Modelo 3D de la transmisión.....	37
3.3 Modelo 3D de la cupla para el elemento de salida .....	43
3.4 Diseño de los ejes del aerogenerador .....	44
3.5 Diseño y modelo 3D de la góndola .....	46
<b>4 CAPÍTULO 4: Fabricación del prototipo.....</b>	<b>53</b>

4.1 Fabricación de las piezas .....	53
4.2 Fabricación de los ejes de la transmisión .....	54
4.3 Pernos, tuercas y rodamientos .....	55
4.4 Montaje del prototipo .....	56
4.5 Pruebas de funcionamiento del prototipo .....	56
5 CAPÍTULO 5: Ensayos de funcionamiento.....	59
5.1 Montaje en el túnel de viento .....	59
5.2 Mediciones del ensayo de funcionamiento.....	60
5.3 Características del aerogenerador .....	61
5.4 Mejoras del prototipo.....	62
6 CAPÍTULO 6: Conclusiones .....	63
Referencias .....	64
Anexo A: Especificaciones de los rodamientos .....	69
Anexo B: Planos de fabricación de los ejes de la transmisión .....	70
Anexo C: Plano de fabricación del disco de freno .....	74
Anexo D: Script de Matlab.....	75
Anexo E: Guía de ensamblaje .....	78

## Lista de Tablas

Tabla 1: Propiedades mecánicas de los materiales.....	8
Tabla 2: Evaluación de materiales .....	9
Tabla 3: Datos técnicos del aerogenerador Bonus B44/600 .....	11
Tabla 4: Parámetros expresados en magnitudes básicas .....	13
Tabla 5: Perfiles NREL seleccionados para las aspas.....	17
Tabla 6: Propiedades aerodinámicas de los perfiles NREL.....	17
Tabla 7: Distribución del chord y el ángulo óptimo a lo largo del radio del aspa. ....	20
Tabla 8: Resultados del método BEM.....	23
Tabla 9: Número de dientes y diámetro de los engranajes planetarios. ....	26
Tabla 10: Número de dientes y diámetro primitivo de los engranajes paralelos. ....	27
Tabla 11: Características del micro generador.....	32
Tabla 12: Listado de elementos fabricados por medio de impresión 3D.....	53
Tabla 13: Listado de pernos y tuercas.....	55
Tabla 14: Primera medición del banco de ensayos.....	60

## Lista de Figuras

Figura 1: Principales componentes de un aerogenerador de eje horizontal (fuente: [4]).....	1
Figura 2: Túnel de viento en el Laboratorio de Termofluidos (fuente: [12]).....	4
Figura 3: Potencia de una turbina de 1 MW a función de la velocidad del viento (fuente: [16]).....	4
Figura 4: Elementos que forman un sistema mecánico (Fuente: elaboración propia). ....	11
Figura 5: Esquema de las partes del banco de ensayos (Fuente: elaboración propia). ....	13
Figura 6: Fotografía de un aerogenerador Bonus B44/600 (Fuente: [44]).....	16
Figura 7: Distribución del chord a lo largo del radio (Fuente: elaboración propia).....	18
Figura 8: Comparación entre la curva interpolada y ajustada (Fuente: elaboración propia). ....	19
Figura 9: Estructura interna de un aspa de turbina eólica (Fuente: [62]). ....	21
Figura 10: Velocidad relativa del viento en el perfil (Fuente: [63]) .....	21
Figura 11: Definición de una transmisión multietapa en una turbina eólica (Fuente: [71]). ....	24
Figura 12: Partes principales de un sistema de engranajes planetario (Fuente: [73]). ....	25
Figura 13: Modelo 3D del disco de frenado (Fuente: elaboración propia). ....	30
Figura 14: Esquema de un electroimán simple (Fuente: [67]). ....	30
Figura 15: Rodamiento 608 2RS (Fuente: elaboración propia). ....	33
Figura 16: Modelo 3D del aspa de la turbina (Fuente: elaboración propia). ....	36
Figura 17: Modelo 3D del cabezal de la turbina (Fuente: elaboración propia).....	36
Figura 18: Modelo 3D del rotor de la turbina (Fuente: elaboración propia).....	37
Figura 19: Modelo 3D del engranaje anillo del sistema planetario (Fuente: elaboración propia). ....	38
Figura 20: Detalle de las uniones tipo tarugo (Fuente: elaboración propia). ....	38
Figura 21: Modelo 3D del engranaje sol del sistema planetario (Fuente: elaboración propia). ....	39
Figura 22: Modelo 3D de engranaje planeta del sistema planetario (Fuente: elaboración propia)....	40

Figura 23: Modelo 3D del cuerpo del porta-planetas del sistema planetario (Fuente: elaboración propia) .....	41
Figura 24: Modelo 3D de la tapa del porta-planetas del sistema planetario (Fuente: elaboración propia). .....	41
Figura 25: Engranaje conductor de la etapa paralela (Fuente: elaboración propia).....	42
Figura 26: Engranaje conducido de la etapa paralela (Fuente: elaboración propia). .....	43
Figura 27: Modelo 3D de la cupla del eje de alta velocidad (Fuente: elaboración propia). .....	43
Figura 28: Modelo 3D de la cupla del eje del generador (Fuente: elaboración propia).....	44
Figura 29: Orificio perforado en un extremo de los ejes (Fuente: elaboración propia). .....	45
Figura 30: Modelo 3D de la transmisión del aerogenerador (Fuente: elaboración propia). .....	46
Figura 31: Esquema de las partes de la góndola (Fuente: elaboración propia). .....	47
Figura 32: Modelo 3D del extremo frontal de la góndola (Fuente: elaboración propia). .....	48
Figura 33: Agujero para la inserción de clips sujetadores (Fuente: elaboración propia). .....	48
Figura 34: Modelo 3D del cuerpo 1 de la góndola (Fuente: elaboración propia). .....	49
Figura 35: Modelo 3D del cuerpo 2 de la góndola (Fuente: elaboración propia). .....	50
Figura 36: Modelo 3D del extremo posterior de la góndola (Fuente: elaboración propia).....	50
Figura 37: Modelo 3D de los clips sujetadores (Fuente: elaboración propia). .....	51
Figura 38: Modelo 3D de la base de la góndola (Fuente: elaboración propia). .....	52
Figura 39: Piezas fabricadas por impresión 3D (Fuente: elaboración propia).....	54
Figura 40: Ejes de rotación del aerogenerador (Fuente: elaboración propia) .....	55
Figura 41: Aerogenerador parcialmente ensamblado (Fuente: elaboración propia). .....	56
Figura 42: Defecto en el engranaje conductor de la segunda etapa paralela (Fuente: elaboración propia). .....	58
Figura 43: Aerogenerador montado en el túnel de viento (Fuente: elaboración propia). .....	59
Figura 44: Anemómetro (Fuente: elaboración propia).....	60

Figura 45: Dimensiones del rodamiento SKF 608 2RS .....	69
Figura 46: Plano eje de baja velocidad.....	70
Figura 47: Plano eje medio 1.....	71
Figura 48: Plano eje medio 2.....	72
Figura 49: Plano eje de alta velocidad. ....	73
Figura 50: Plano de fabricación del disco de freno. ....	74

## Glosario

3D	:	Tridimensional
ABS	:	Acrilonitrilo butadieno estireno
ASTM	:	Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales
CAD	:	Computer-aided design
CF	:	Fibra de carbono
HAWT	:	Aerogeneradores de eje horizontal
ISO	:	Organización Internacional de Normalización
NACA	:	National Advisory Committee for Aeronautics
NASA	:	National Aeronautics and Space Administration
NREL	:	Laboratorio Nacional de Energías renovables
PA	:	Poliamida
PEEK	:	Poliéter éter cetona
PETG	:	Tereftalato de polietileno glicol
PLA	:	Ácido poliláctico
SAE	:	Society of Automotive Engineers
TSR	:	Tip-speed ratio
UdeC	:	Universidad de Concepción
VAWT	:	Aerogeneradores de eje vertical

## Símbolos

$A_m$	:	Área del polo de un electroimán
$B_m$	:	Campo magnético de un electroimán
$C_D$	:	Coefficiente de arrastre
$C_L$	:	Coefficiente de sustentación
$C_M$	:	Coefficiente de momento
$C_P$	:	Coefficiente de Betz de extracción de energía
$D_p$	:	Diámetro primitivo
$E_{c,w}$	:	Energía cinética del viento
$F_{freno}$	:	Fuerza de frenado
$F_l$	:	Fuerza de sustentación
$F_{t,prototipo}$	:	Fuerza de empuje del prototipo
$F_t$	:	Fuerza de empuje (thrust)
$H_d$	:	Altura de diente de los engranajes
$M_g$	:	Módulo de los engranajes
$N_p$	:	Cantidad de engranajes tipo planeta
$P_{prototipo}$	:	Potencia en el prototipo
$R_m$	:	Radio del rotor en el modelo
$R_p$	:	Radio del rotor en el prototipo
$R_r$	:	Radio del rotor

$S_y$	:	Esfuerzo de fluencia
$c_m$	:	Ancho del aspa promedio para el modelo
$c_p$	:	Ancho del aspa promedio para el prototipo
$i_1$	:	Relación de transmisión de la primera etapa
$i_2$	:	Relación de transmisión de la segunda y tercera etapa
$i_i$	:	Relación de transmisión
$l_n$	:	Longitud del núcleo de un electroimán
$r_d$	:	Radio del disco de freno
$r_{eje}$	:	Radio de un eje
$t_d$	:	Espesor del disco de freno
$v_d$	:	Velocidad del disco de freno
$v_m$	:	Velocidad del viento para el modelo
$v_p$	:	Velocidad del viento para el prototipo
$v_w$	:	Velocidad del viento
$v_{w,2}$	:	Velocidad del viento aprovechada por el rotor
$z_c$	:	Cantidad de dientes del engranaje corona
$z_{conducido}$	:	Cantidad de dientes del engranaje conducido
$z_{conductor}$	:	Cantidad de dientes del engranaje conductor
$z_i$	:	Cantidad de dientes del engranaje
$z_p$	:	Cantidad de dientes del engranaje planeta
$z_s$	:	Cantidad de dientes del engranaje sol
$A$	:	Área barrida por el rotor
$I$	:	Corriente
$J$	:	Momento polar de inercia
$L$	:	Longitud
$M$	:	Masa
$N$	:	Número de vueltas del bobinado
$P$	:	Potencia
$Re_m$	:	Número de Reynolds para el modelo
$Re_p$	:	Número de Reynolds para el prototipo
$Re$	:	Número de Reynolds
$T$	:	Tiempo
$Z$	:	Número de aspas del aerogenerador
$a$	:	Primer factor de momento
$a'$	:	Segundo factor de momento
$c$	:	Ancho del aspa en función del radio
$j$	:	Cantidad de dimensiones primarias
$k$	:	Cantidad de números adimensionales
$l$	:	Largo característico del aspa
$m_w$	:	Masa de viento
$n$	:	Cantidad de variables del análisis adimensional
$r$	:	Radio relativo del rotor
$x$	:	Punto de alineación de los perfiles aerodinámicos

## Letras griegas

$\Pi_i$	:	Número adimensional
$\lambda_r$	:	Speed ratio
$\mu_0$	:	Permeabilidad magnética del vacío
$\mu_{aire}$	:	Permeabilidad magnética del aire
$\mu_m$	:	Viscosidad dinámica del aire en el modelo
$\mu_p$	:	Viscosidad dinámica del aire en el prototipo
$\mu_w$	:	Viscosidad dinámica del aire
$\rho_m$	:	Densidad del aire en el modelo
$\rho_p$	:	Densidad del aire en el prototipo
$\rho_w$	:	Densidad del aire
$\sigma_d$	:	Conductividad del disco
$\tau_1$	:	Torque salida en la primera etapa
$\tau_2$	:	Torque salida en la segunda etapa
$\tau_3$	:	Torque salida en la tercera etapa
$\tau_{max}$	:	Torque máximo sobre un eje
$\tau_{r,prototipo}$	:	Torque en el rotor del prototipo
$\tau_r$	:	Torque en el rotor
$\omega_m$	:	Velocidad angular del rotor en el modelo
$\omega_p$	:	Velocidad angular del rotor en el prototipo
$\omega_r$	:	Velocidad angular del rotor
$\alpha$	:	Ángulo de ataque de las aspas
$\beta$	:	Ángulo de rotación óptimo respecto al plano del rotor
$\lambda$	:	Tip-speed ratio
$\phi$	:	Ángulo relativo entre el plano de rotor y el ancho del perfil

## CAPÍTULO 1: Introducción

### 1.1 Planteamiento del problema

La energía eólica es aquella que aprovecha la fuerza del viento, esto por medio del uso de aerogeneradores, también conocidos como turbinas eólicas, que son capaces de transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica [1]. En el contexto actual de las energías renovables, la optimización de los sistemas de energía eólica es fundamental para aumentar la eficiencia y la viabilidad económica de futuros proyectos en esta rama de la industria.

Los aerogeneradores que se encuentran instalados actualmente en los parques eólicos del país destacan por su forma y tamaño. Existen dos tipos de turbinas eólicas según la orientación de su eje de rotación, ya sea horizontal o vertical. Las primeras se muestran en la figura 1 e infunden especial interés para el desarrollo de casos de estudio debido a que son el tipo más común comercialmente y están compuestas, en general, por una torre, una góndola y un rotor [2]. Si bien este modelo es habitual en la industria, el diseño y la fabricación de turbinas eólicas convencionales enfrentan desafíos en términos de costos de producción, tiempos de entrega y personalización de los componentes [3].



**Figura 1: Principales componentes de un aerogenerador de eje horizontal (fuente: [4])**

La necesidad en el país y el mundo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover la sostenibilidad ambiental ha impulsado la búsqueda de métodos de fabricación más eficientes y respetuosos con el medio ambiente en el ámbito de las energías renovables [5]. Por lo anterior, estudiar diferentes opciones de aerogeneradores mediante la creación de un banco de ensayos asoma como una opción razonable. Al ser necesario este para evaluar prototipos experimentales hechos con diferentes procesos de fabricación y distintos materiales como la impresión 3D y su gran variedad de filamentos.

La tecnología de impresión 3D ofrece oportunidades significativas para mejorar el proceso de diseño y fabricación de turbinas eólicas a pequeña escala [6]. Esto se logra al permitir la creación de componentes complejos, modelados en computador con mayor precisión y menor desperdicio de material que otros métodos de fabricación convencionalmente utilizados en los elementos de los aerogeneradores [7]. Otra virtud que brinda es una amplia gama de filamentos que abarcan desde plásticos estándar hasta materiales avanzados como compuestos de fibra de carbono, destacando así su diversidad y versatilidad [8]. A pesar de estas ventajas, existen desafíos técnicos que limitan la adopción de la impresión 3D para elaborar un banco de ensayos. Estos desafíos incluyen la selección adecuada de materiales, la validación del rendimiento estructural y aerodinámico de los modelos de turbina impresos.

En la literatura se exploran diferentes casos de estudio, entre las cuales destaca un análisis hecho para turbinas de eje vertical respecto al diseño y manufactura por medio de impresión 3D. En este se concluye que existe gran potencial para este proceso de fabricación, pero se necesitan más y diferentes modelos de aerogenerador para ser validado [9]. La eficacia de la fabricación 3D también ha llevado a plantearse usos comerciales como lo es una instalación residencial. La cual muestra ser una buena idea por su simplicidad de fabricación, instalación y mantenimiento [10]. Por lo que se abren posibilidades nuevas aun por conocer.

En síntesis, la elaboración del proyecto se centra en la necesidad de desarrollar un enfoque integral que combine el diseño avanzado de turbinas eólicas, la fabricación aditiva mediante impresión 3D y la validación rigurosa del rendimiento. Todo con el fin de crear un modelo funcional y eficiente que pueda ser utilizado como banco de pruebas para investigaciones futuras en el campo de la energía eólica o como una herramienta de aprendizaje para quienes deseen adentrarse en los distintos tipos de energías renovables no convencionales.

## **1.2 Alcances del proyecto**

El presente proyecto tiene alcances como el uso de las tecnologías de impresión 3D como base en el diseño de las turbinas eólicas puede impulsar métodos de fabricación eficientes que sean personalizados para distintas necesidades. Además existe la posibilidad de reducir costos al utilizar la Impresión 3D para la producción de componentes, además de material y tiempos de producción.

Por otro lado, el carácter educativo del banco de ensayos fomenta el uso de energías renovables como la eólica, debido a que resulta una experiencia enriquecedora y visual sobre cómo funcionan este tipo de energías.

## **1.3 Objetivo general**

Diseñar y fabricar un modelo de banco de pruebas de turbina eólica utilizando técnicas de impresión 3D para sus componentes principales, con el fin de visualizar y comprender los principios básicos de funcionamiento de manera efectiva.

## **1.4 Objetivos específicos**

Se consideran los siguientes objetivos específicos en el proyecto:

1. Diseñar el modelo de la turbina eólica utilizando software de modelado 3D, considerando los principios aerodinámicos y estructurales para optimizar la eficiencia y la resistencia del dispositivo.
2. Fabricar y ensamblar el modelo de la turbina eólica utilizando técnicas de impresión 3D y asegurando la integridad estructural y la precisión dimensional de todas las partes.

## **1.5 Consideraciones de diseño**

Para la evolución del proyecto se necesitan realizar ciertas consideraciones de diseño. Primero se encuentra la ubicación, ya que el banco de ensayos está destinado al Laboratorio de Termofluidos del departamento de ingeniería mecánica de la Universidad de Concepción. En este lugar se encuentra un túnel de viento (18 in. Blower Tunnel) de la compañía Plint & Partners Ltd como se aprecia en la figura 2. Cuenta con una cámara de ensayos de largo 1651 mm (65 in) y perfil cuadrado 457 mm x 457 mm (18 in x 18 in), cuya velocidad máxima del aire dentro de la misma es de 30.5 m/s (100 ft/s) [11]. Resulta más práctico para el posterior diseño ubicar la turbina eólica fuera de la cámara de ensayos, es decir, aguas abajo del túnel de viento, aprovechando que el modelo de túnel lo permite.



Figura 2: Túnel de viento en el Laboratorio de Termofluidos (fuente: [12])

En aspectos ambientales, la presión de operación es cercana a la atmosférica y su temperatura de operación es aproximadamente la temperatura promedio de día en la ciudad de Concepción, Chile para los meses de invierno, la cual ronda los  $10^{\circ}\text{C}$  [13]. Además, se estima una velocidad de entrada (cut-in speed) del viento de  $3.3\text{ m/s}$ , considerando, de forma similar que con la temperatura, el promedio de velocidad del viento para los meses de invierno [14]. Por otro lado, se estima una velocidad de salida (cut-out speed) de  $25\text{ m/s}$ , ya que es un límite conservador entre modelos comerciales de turbinas eólicas, y una velocidad nominal (rated speed) de  $15\text{ m/s}$  [15]. Estas velocidades guardan relación con la potencia de la turbina eólica que se puede ver en su curva característica en la Figura 3. Todas las variables son necesarias para considerar en el dimensionamiento de una turbina eólica de forma directa o indirecta.

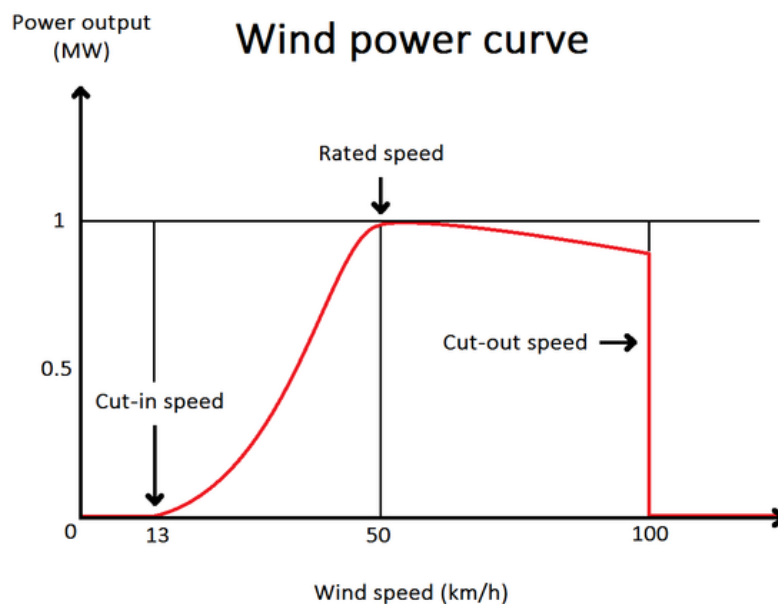


Figura 3: Potencia de una turbina de 1 MW a función de la velocidad del viento (fuente: [16])

Las dimensiones de las aspas y la caja reductora de la turbina no se encuentran limitados por el espacio dentro de la cámara de ensayos. Sin embargo, para efectos de la fabricación de las aspas en una sola pieza, se tiene que considerar el volumen máximo permitido por la impresora 3D que se va a utilizar, en este caso para una Creality Ender 3, que tiene disponible un volumen de impresión de 220 mm x 220 mm x 250 mm [17], por lo que el largo máximo debe rondar valores cercanos.

## **1.6 Metodología**

Para cumplir con los objetivos propuestos anteriormente, se debe comenzar con una fase de diseño, en la que se realizará una revisión bibliográfica sobre el dimensionamiento de turbinas eólicas y la materialidad con la que se planea fabricar, enfocándose principalmente en las aspas y el sistema de engranajes de la caja multiplicadora, además se implementa la retroalimentación acerca del diseño realizado preliminarmente como un proyecto de ingeniería, se utiliza el software de Inventor para realizar el modelado del banco de ensayos y planos detallados de fabricación.

En la segunda etapa, correspondiente a la fase de fabricación del banco de ensayos, se utiliza el laboratorio de Impresión 3D de la universidad para fabricar los componentes necesarios, mientras que aquellos que no puedan ser fabricados se cotizan y compran. Durante la fabricación además se hacen pruebas de calidad para detectar y corregir posibles defectos o errores en el diseño de las partes. Posteriormente se ensamblan todos los componentes, asegurando su compatibilidad en el banco de ensayos de turbina eólica.

## CAPÍTULO 2: Marco Teórico

En este capítulo se establecen las bases teóricas y definiciones críticas que son esenciales para comprender el proyecto y poder realizar un diseño fundamentado.

Entre los puntos clave que se esperan resolver están la materialidad del proyecto, el tipo de turbina eólica a diseñar, los elementos involucrados y el dimensionamiento de las partes fundamentales como lo son las aspas y la caja de engranajes.

### 2.1 Principio fundamental de la energía eólica

La física elemental para explicar la energía eólica tiene su base en el aprovechamiento de la energía cinética del viento que se puede definir como:

$$E_{c,w} = \frac{1}{2} m_w v_w^2$$

La potencia del viento es la energía cinética de un flujo de masa de aire que atraviesa un área  $A$  dado un cierto tiempo. Por lo que su potencia queda definida de la siguiente forma:

$$P_w = \dot{E}_{c,w} = \frac{1}{2} \dot{m}_w v_w^2 = \frac{1}{2} \rho_w A v_w^3$$

La energía cinética es convertida en energía mecánica a través del rotor al desacelerar el flujo del aire. Revisando los casos extremos se tiene que la energía no puede ser convertida completamente debido a que al disminuir el flujo de aire a cero, este bloquearía el área para seguir funcionando. Al contrario, en el caso de que no existiera desaceleración significaría que el rotor no está convirtiendo la energía. Por lo tanto debe existir un máximo de energía aprovechable dada una cierta velocidad del viento  $v_w$ , Betz y Lanchester [50] descubrieron que idealmente la velocidad del viento aprovechada por el rotor debiese ser  $v_{w,2} = \frac{2}{3} v_w$ , lo que se traduce como un coeficiente de Betz ( $C_p$ ):

$$P = P_w C_p = \frac{1}{2} \rho_w A v_w^3 C_p$$

Este coeficiente ( $C_p$ ) indica la cantidad de energía extraída por el rotor, siendo máximo alrededor de 0.59, este varía para los rotores propulsados por arrastre o por sustentación, siendo alrededor de 0.2 para los primeros y 0.5 para los segundos.

### 2.2 Materialidad

Dentro del mundo de la impresión 3D existen diversos tipos de filamentos para ser utilizados a la hora de llevar a cabo la manufactura de los diseños, por lo que definir este aspecto del proyecto considerando las propiedades mecánicas, ventajas y desventajas de cada uno de los materiales se convierte en una prioridad, ya que es un aspecto que puede afectar el diseño a largo plazo el proyecto.

Para elegir convenientemente un material se repasan las ventajas y desventajas de cada candidato disponible con el fin de elaborar un cuadro de propiedades mecánicas mostrado en la tabla 1. Los materiales que se barajan como opciones corresponden a Esun PLA, Esun PLA+, Esun PETG, Esun ABS, Esun PEEK, Esun Fibra de carbono y Creality Hyper PLA.

### **eSUN PLA (ácido poliláctico)**

Ventajas [18]: ofrece una buena resistencia a la tracción respecto al resto de materiales en la lista, fácil de usar en entornos domésticos y de oficina, permite la creación de piezas de alta resolución, es un material reciclable, no necesita cama caliente, es el filamento más utilizado en impresión 3D además de ser el más económico respecto al resto de candidatos.

Desventajas [18]: poca resistencia térmica (punto de transición vítrea bajo), es un material muy frágil (baja resistencia al impacto), sensibilidad a la humedad.

### **Creality Hyper PLA**

Ventajas [19]: aumenta la dureza y la adherencia entre capas con respecto al PLA común, permite mayores velocidades de impresión, acabado superficial suave.

Desventajas [19]: similares propiedades al PLA, poca resistencia térmica, sensibilidad a la humedad.

### **eSUN PLA+**

Ventajas [20]: aumenta la dureza y la adherencia entre capas con respecto al PLA.

Desventajas [20]: similares propiedades térmicas que el PLA, sensibilidad a la humedad.

### **eSUN ABS (acrilonitrilo butadieno estireno)**

Ventajas [21]: estable a temperaturas cercanas a los 100 °C, resiste mecanizado posterior a la impresión, presenta una resistencia al impacto respecto al PLA y es un material económico disponible comercialmente.

Desventajas [21]: es más complejo de utilizar debido a que libera humos nocivos, necesita ventilación, dañino para el medio ambiente, se puede resquebrajar a bajas temperaturas y es propicio al efecto warping (la superficie se despega de la base de impresión).

### **eSUN PETG (tereftalato de polietileno glicol)**

Ventajas [22]: mayor durabilidad y excelente adhesión entre capas respecto al PLA, no sufre warping, tiene un acabado superficial suave, no emite olores, es un material común comercialmente.

Desventajas [22]: se reblandece a partir de los 80 °C, es más denso que el PLA, higroscópico, no se degrada, se recomienda el uso de adhesivos para uniones posteriores.

### eSUN Fibra de carbono (PA6/66 CF 20%)

Ventajas [23]: ofrece grandes propiedades mecánicas por una densidad similar al resto de materiales, gran adhesión entre capas respecto al PLA, estable a altas temperaturas y es posible utilizarlo como aislante térmico.

Desventajas [23]: temperaturas de impresión muy elevadas (140 °C), material muy abrasivo (puede dañar los extrusores), difícil de reciclar, conductor de la electricidad y es el segundo filamento más caro de la lista.

### eSUN PEEK (poliéter éter cetona)

Ventajas [24]: ofrece grandes propiedades mecánicas por una densidad similar al resto de materiales, baja conductividad eléctrica y térmica, buena opción para reemplazar piezas metálicas.

Desventajas [24]: Se necesita equipo especializado debido a su alta temperatura de trabajo, higroscópico, sensible a los cambios de temperatura durante la impresión, es proclive al warping, es un material poco disponible y el más caro de los candidatos.

**Tabla 1: Propiedades mecánicas de los materiales**

Propiedades	Materiales							Norma
	eSUN PLA [25]	Creality Hyper PLA [26]	eSUN PLA+ [27]	eSUN ABS [28]	eSUN PETG [29]	eSUN Carbon Fiber [30]	eSUN PEEK [31]	
Densidad [ $g/cm^3$ ]	1.2	1.25	1.23	1.04	1.27	1.24	1.30	ASTM D792
Módulo de Young [ $MPa$ ]	-	1146	-	-	-	-	-	ISO 527
Resistencia a la tracción [ $MPa$ ]	72	53	63	43	52	140	100	ISO 527
Resistencia al impacto [ $kJ/m^2$ ]	5.4	8.8	9	29	4.7	19	6.5	ISO 179
Temperatura de transición vítrea [ $^{\circ}C$ ]	53	-	53	78	67	155	152	ISO 11357
Temperatura de impresión [ $^{\circ}C$ ]	190 230	190 230	210 230	230 270	230 250	260 300	380 400	
Precio [miles de pesos/kg]	13	20	15	15	16	57	150	-

A partir de la información recopilada anteriormente se decide evaluar cada material en la tabla 2 respecto a sus propiedades mecánicas, propiedades térmicas, facilidades de trabajo, precio y disponibilidad, utilizando una escala de valor con notas del 1 al 5 representando de pésimos a excelentes valores respectivamente [32].

**Tabla 2: Evaluación de materiales**

Filamento	eSUN PLA	Creality Hyper PLA	eSUN PLA+	eSUN ABS	eSUN PETG	eSUN Carbon Fiber	eSUN PEEK
Propiedades mecánicas	2	4	3	4	4	5	5
Propiedades térmicas	4	4	4	5	4	5	5
Facilidad de trabajo	5	5	4	1	3	2	3
Precio	5	5	5	5	5	2	1
Disponibilidad	5	5	5	5	5	2	1
Total	21	23	22	20	21	15	15

Como es apreciado en la tabla 2, existen varios candidatos con un buen desempeño, entre los cuales destacan los filamentos de PLA, especialmente Creality Hyper PLA, por lo que se considera preliminarmente este como material de impresión para los elementos por diseñar.

### 2.3 Tipo de turbina

Para elaborar un banco de ensayos de aerogenerador eficaz se tiene que seleccionar un modelo adecuado, por lo que se analizan ciertos aspectos característicos de las turbinas que permiten tener una guía clara para el posterior dimensionamiento y diseño. Dentro de estos criterios se considera el método de generación de energía, que puede ser mediante fuerza de arrastre o sustentación. Asimismo, se evalúa la orientación del eje de rotación del rotor, ya sea horizontal o vertical. Por último, se determina el número de aspas que se utilizarán en el diseño del rotor.

Contrastando el método de obtención de energía y la fuerza que emplean. Los rotores propulsados por arrastre utilizan la fuerza del aire que actúa sobre un área perpendicular a la dirección del viento. En cambio, los rotores propulsados por sustentación tienen un componente perpendicular al arrastre y de magnitud proporcional al radio, además de depender del área y su ángulo de ataque. Se debe destacar que normalmente estas utilizan perfiles aerodinámicos en su diseño ya que proporcionan un mayor rendimiento aerodinámico [33].

Para el caso del proyecto, es de interés representar el fenómeno por medio de la sustentación, ya que es el tipo más común para el uso de la energía eólica en la actualidad, por lo que se diseña en torno a este tipo de rotor [34].

Existen dos tipos de turbinas eólicas dependiendo de la orientación en la que se encuentre su eje de rotación. La mayoría de las turbinas eólicas son de eje horizontal (HAWT) [35], cuya principal característica es que el eje de rotación de las aspas es paralelo a la dirección del viento. Entre sus

ventajas están su alta eficiencia, su baja velocidad necesaria para comenzar a generar energía (cut-in speed) y el bajo costo por unidad de energía producida. En cambio, las turbinas de eje vertical (VAWT) poseen aspas que rotan de forma perpendicular con respecto a la dirección del viento. Si bien no son tan eficientes, su principal ventaja es que pueden aprovechar el viento desde cualquier dirección. Mientras que las HAWT necesitan ubicarse paralelamente al viento por medio de algún sistema de control. Además, las VAWT pueden ubicar su generador en el suelo lo que facilita su mantención [36].

Debido a que las HAWT son las más comúnmente utilizadas en la industria y la dirección del viento es fija cuando se utiliza un túnel de viento, se opta que el proyecto represente una de turbina eólica de eje horizontal. Presentan además la ventaja de ser más ilustrativas en su funcionamiento y familiares con respecto a una mirada educativa.

Otro aspecto que evaluar es la cantidad de aspas o palas que puede tener el aerogenerador. Para el caso de una sola aspa en la turbina, el principal problema es que se encuentra desbalanceada [37], por lo que se debe agregar un contrapeso al diseño, esto resulta contraproducente ya que se podría balancear con dos aspas. El problema que presenta el uso de dos aspas ocurre cuando el aspa se encuentra en la dirección de la torre genera fuertes golpes que reducen la vida útil de la turbina y por lo tanto es necesario incluir en el diseño amortiguadores, además de un rotor articulado para reducir también el impacto. Cuando se evalúa el uso de más de tres aspas en una turbina eólica [38], ocurre un aumento en la eficiencia, ya que se alcanza una mayor conversión de energía. Sin embargo, este aumento en la eficiencia se vuelve menos significativo a medida que se introducen más palas en el aerogenerador. Continuando con la idea anterior, en el uso de turbinas a pequeña escala [39], el aumento de aspas genera mayores turbulencias en el viento al atravesar las aspas.

Por razones como las revisadas, la cantidad de aspas de una turbina eólica es comúnmente tres, equidistantes entre ellas por un ángulo de  $120^\circ$  respecto al centro del rotor. Este número es el seleccionado para el proyecto.

Considerando lo anterior se busca una turbina eólica instalada que presente características similares a las buscadas con el fin de ser escalada a un diseño apto de utilizar en el túnel de viento. Realizando un escrutinio de los aerogeneradores instalados en la región del Biobío se observa que en el parque eólico Lebu-Toro conviven 4 modelos de turbinas eólicas diferentes [40]. De los cuales destaca uno en particular por ser el más pequeño de la zona, este corresponde al modelo B 44/600 de la marca danesa Bonus [41, 42]. Es de interés debido a que, por sus dimensiones se puede lograr un mejor escalamiento de la turbina. Por tanto, este modelo se ha convertido en el que se busca replicar para la confección del banco de ensayos. Las características principales de la turbina, necesarias para realizar el proyecto se encuentran en la tabla 3, destacando las dimensiones del rotor y las velocidades de operación [43, 44].

**Tabla 3: Datos técnicos del aerogenerador Bonus B44/600**

Datos de energía	
Potencia [ <i>kW</i> ]	600
Velocidad de entrada del viento [ <i>m/s</i> ]	3.5
Velocidad nominal del viento [ <i>m/s</i> ]	15
Velocidad de salida del viento [ <i>m/s</i> ]	25
Datos de la hélice	
Diámetro del rotor [ <i>m</i> ]	44
Área de barrido [ <i>m</i> <sup>2</sup> ]	1 521
Número de palas [-]	3
Velocidad máxima del rotor [ <i>vuelta/min</i> ]	27
Datos de la caja de cambios	
Tipo de tren	Spur / Planetary
Niveles [-]	3
Relación de transmisión [-]	1:56
Datos del Generador	
Tipo	Asíncrono
Velocidad [ <i>RPM</i> ]	1 500
Tensión de salida [ <i>V</i> ]	690

## 2.4 Elementos del banco de ensayo

Con tal de comprender los diferentes elementos que componen el banco de ensayos, es fundamental tener en cuenta las partes de un sistema mecánico y su interacción.

En la figura 4 se muestra un esquema donde se plantea un flujo de trabajo para la energía del sistema. En el caso particular del banco de ensayos, la fuerza de entrada corresponde a la sustentación, el elemento de entrada es el rotor de la turbina (unión de las aspas junto a un cabezal), el mecanismo es aquello que involucra la caja de engranajes, el elemento de salida todavía está por definir y la fuerza de salida depende del elemento anterior.



**Figura 4: Elementos que forman un sistema mecánico (Fuente: elaboración propia).**

A continuación se enumeran los distintos elementos principales que presenta el banco de ensayos y que deben ser diseñados para su posterior fabricación.

1. **Aspas:** Encargadas de transmitir transformar la energía del viento y transmitirla al rotor. Suelen estar basadas en perfiles aerodinámicos [45]. Constituyen el principal elemento a diseñar del proyecto.
2. **Cabezal:** Corresponde al elemento de unión entre las palas y el eje de alta velocidad, transmitiendo el torque al interior de la turbina. Es necesario realizar su diseño porque está unido a las aspas.
3. **Eje de baja velocidad:** Elemento que transmite la potencia del rotor al multiplicador. La principal opción es utilizar una varilla metálica de radio pequeño que soporte la torsión.
4. **Transmisión:** Sistema mecánico encargado de aumentar la velocidad de rotación desde el eje de baja velocidad al de alta velocidad. Este elemento es necesario de diseñar debido a su especificidad.
5. **Eje de alta velocidad:** Elemento que transmite la potencia hacia el generador, debe girar lo suficientemente rápido para que este último comience a generar electricidad. Es posible utilizar la varilla metálica que está unida al generador.
6. **Elemento de salida:** corresponde a una resistencia la cual todo el sistema debe poner en movimiento para producir torque y caracterizar el sistema, comúnmente asociado a un generador o un freno. Este puede ser cotizando.
7. **Góndola:** Es el elemento que alberga y protege todas las partes anteriormente nombradas menos el rotor. Es necesario diseñarlo debido a su especificidad en relación con la disposición de los componentes.
8. **Base:** Elemento sobre el que se apoya la góndola y está sujeta en alguna zona fija del banco del túnel de viento. Es necesario diseñar este elemento debido a su especificidad.

## **2.5 Disposición de los elementos en el banco de ensayos**

En la figura 5 se muestra cómo se disponen los diferentes elementos de la turbina eólica descritos anteriormente dentro del túnel de viento del laboratorio de Termofluidos. Para la base existe la disponibilidad de modificar el túnel de viento o bien instalar la base de manera externa.

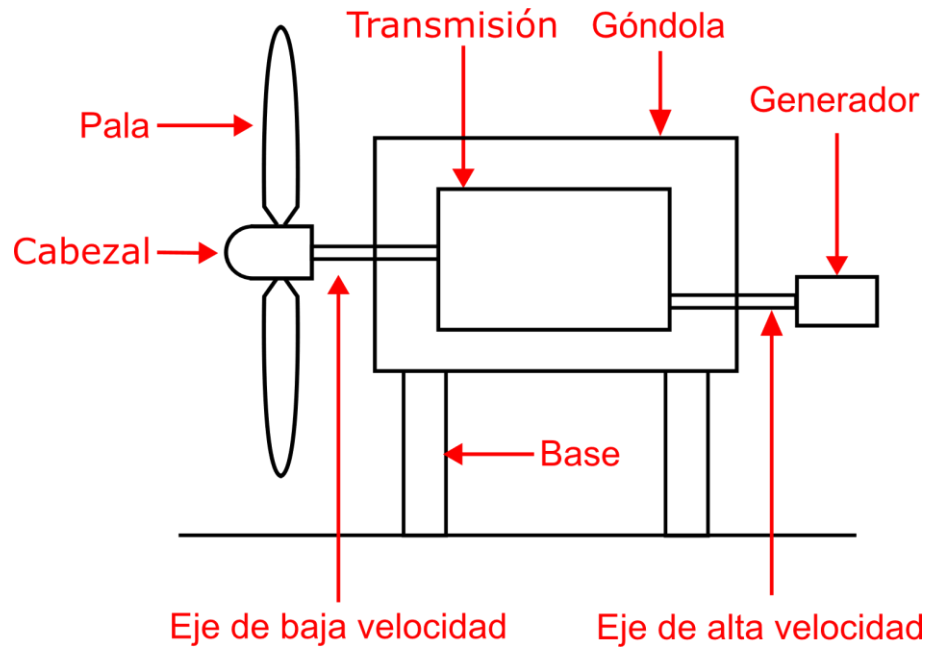


Figura 5: Esquema de las partes del banco de ensayos (Fuente: elaboración propia).

## 2.6 Análisis dimensional por el teorema de Pi-Buckingham

El análisis dimensional es una herramienta útil en variadas disciplinas porque entrega una forma para llevar a cabo experimentos. Lo logra permitiendo escalar modelos experimentales a prototipos reales o viceversa como es el caso del diseño de un banco de ensayos por medio de criterios de semejanza.

Como planteamiento inicial se tiene que la fuerza de sustentación en las aspas del rotor de un aerogenerador a pequeña escala depende de la velocidad del viento, la densidad del aire, la viscosidad del aire, el radio del rotor, la velocidad angular del rotor y el ángulo de ataque de las aspas. Esto puede ser expresado como se observa en (1). Además se puede definir el número total de variables  $n$  como se muestra en (2).

$$F_l = f(v_w, \rho_w, \mu_w, R_r, \omega_r, \alpha) \quad (1)$$

$$n = 7 \quad (2)$$

Es necesario conocer las dimensiones fundamentales de cada parámetro definido anteriormente para llevar a cabo el método, por lo que se elabora una matriz a partir de las magnitudes básicas de masa (M), longitud (L) y tiempo (T). El resultado se muestra en la tabla 4.

Tabla 4: Parámetros expresados en magnitudes básicas

Parámetro	$F_l$	$v_w$	$\rho_w$	$\mu_w$	$R_r$	$\omega_r$	$\alpha$
M	1	0	1	1	1	0	0
L	1	1	-3	-1	0	0	0
T	-2	-1	0	-1	0	-1	0

Se observa que todas las magnitudes pueden ser expresadas como diferentes combinaciones de M, L y T, por lo que se define  $j$  como el número de dimensiones primarias en el problema como se muestra en (3). Por otro lado el número esperado de  $\Pi$  por encontrar está definido en (4) de acuerdo con el teorema de Buckingham.

$$j = 3 \quad (3)$$

$$k = n - j = 4 \quad (4)$$

Lo siguiente es elegir  $j$  parámetros repetitivos que sean adecuados, en este caso se seleccionan  $v_w, \rho_w, R_r$  para poder construir los números adimensionales. Forzando los productos entre estas tres variables a ser adimensionales como dicta el método resultan en los siguientes números  $\Pi$ .

$$\Pi_1 = \frac{F_l}{v_w^2 \rho_w R_r^2} \quad (5)$$

$$\Pi_2 = \frac{\mu_w}{v_w \rho_w R_r} \quad (6)$$

$$\Pi_3 = \frac{R_r \omega_r}{v_w} \quad (7)$$

$$\Pi_4 = \alpha \quad (8)$$

A partir de los cuatro números adimensionales definidos se observa que (5) es el  $\Pi$  dependiente y se puede traducir como un número proporcional al coeficiente de sustentación de las aspas, representado por  $C_L$ , debido a la similitud con la ecuación real de fuerza [46]. Mientras que en (6), la cifra corresponde a una modificación del número de Reynolds, representado por  $Re$  [47]. En (7), este parámetro es definido en la literatura comúnmente como Tip Speed Ratio, TSR y es representado por  $\lambda$  [48]. En la última ecuación (8), el número es igual al ángulo de ataque, por lo que este representa un grupo adimensional por sí solo. Finalmente, la relación entre los distintos  $\Pi$  queda expresada en la ecuación (9).

$$C_L = f(Re, \lambda, \alpha) \quad (9)$$

Para lograr similitud dinámica, los tres parámetros adimensionales de la ecuación (9) deben empatar entre el modelo y el prototipo. Igualar el ángulo de ataque es trivial debido a que es un aspecto de diseño. En el caso del número de Reynolds resulta necesario analizar la semejanza a partir de la expresión (10).

$$Re_m = Re_p \quad (10)$$

Reordenando la ecuación (10) se tiene la expresión (11), donde  $c$  corresponde al chord o ancho del aspa y se define más adelante en función del radio.

$$v_m = v_p \left( \frac{\rho_p}{\rho_m} \right) \left( \frac{c_p}{c_m} \right) \left( \frac{\mu_m}{\mu_p} \right) \quad (11)$$

De la expresión (11), se descarta la influencia de la densidad y viscosidad del medio debido a que en ambos casos es el aire y las diferencias debidas al entorno son despreciables en las magnitudes. Sin embargo, la longitud es el aspecto más relevante para mantener la semejanza. Debido a que, se estima que con un diámetro de 44 m en la turbina real a representar, el modelo escalado sea 100 veces más pequeño. Por lo que con una velocidad nominal de 15 m/s en la turbina existente, el modelo debería tener la velocidad indicada en la ecuación (12).

$$v_m = (15 [m/s])(100) = 1500 [m/s] \quad (12)$$

De la ecuación (12) se concluye que la velocidad nominal requerida para mantener la semejanza con el número de Reynolds es 50 veces mayor que la velocidad máxima disponible en el túnel de viento del laboratorio. No se puede lograr similitud dinámica a partir del Reynolds.

La influencia del número de Reynolds en el caso de un aerogenerador está principalmente ligada a los coeficientes de sustentación y arrastre como se puede observar del teorema de Buckingham. El caso estudiado es negativo, resulta entonces válido estudiar la influencia entre estas dos variables para comprobar si existe dependencia de la sustentación a cualquier número de Reynolds. De forma de realizar pruebas experimentales aunque exista semejanza incompleta.

Los autores indican que mientras el ángulo de ataque del perfil sea pequeño, es decir menor a  $10^\circ$ , las diferencias en el coeficiente de sustentación a medida que aumenta el Reynolds se hacen menos apreciables. Sin embargo, para ángulos de ataque mayores, donde la sustentación es máxima, el aumento en la fuerza se vuelve considerable [49]. En la situación actual, los ángulos de ataque seleccionados se suelen encontrar alrededor de  $6^\circ$ , por lo que el efecto no debiese ser apreciable [50].

Para el caso del TSR, también es pertinente analizar la semejanza por lo que se tiene la relación mostrada en la ecuación (13).

$$\omega_m = \omega_p \left( \frac{R_p}{R_m} \right) \left( \frac{v_m}{v_p} \right) \quad (13)$$

De la expresión (13), se observa que nuevamente la escala de tamaño es la mayor influencia para concluir la semejanza. Por otro lado, la velocidad nominal del prototipo real está fijada por el fabricante, mientras que la velocidad del modelo escalado puede ser modificada posteriormente para asemejar una curva de operación deseada. En el caso de una primera iteración se consideran que ambas velocidades sean iguales como se muestra en la ecuación (14).

$$\omega_m = (27 [RPM])(100)(1) = 2700 [RPM] \quad (14)$$

El valor resultante de la ecuación (14) es mucho mayor que el trabajo que pudiera esperarse de la turbina, por lo que es necesario reducir las revoluciones. Para lograr esto se debiese modificar la velocidad nominal del modelo a escala. De esta forma se garantiza la conservación de este parámetro.

Se concluye entonces que existe semejanza incompleta en entre el prototipo y el modelo, lo que nos indica que es deseable igualar los grupos adimensionales más importantes con tal de realizar pruebas experimentales. Posteriormente los resultados de las pruebas hechas en el modelo se pueden extrapolar al prototipo real para obtener conclusiones.

## 2.7 Dimensionamiento de las aspas

Para realizar un modelo óptimo de las aspas se requiere seleccionar un perfil aerodinámico adecuado. Lo lógico es recurrir al aerogenerador seleccionado anteriormente, Bonus B44/600 como se muestra en la figura 6. En este se aprecian múltiples perfiles aerodinámicos diferentes a lo largo de las aspas. Esta constituye una práctica común en la industria de diseño de aerogeneradores [51]. En la raíz es deseable utilizar perfiles que sean más anchos para que cumplan con requerimientos estructurales y dinámicos, mientras que en la punta se busca que sean más estrechos para reducir el peso en esta zona [52]. Además, esta práctica demuestra aumentar el rendimiento general de la turbina [53]. Sin embargo, las empresas dedicadas al diseño de aerogeneradores, como es el caso de Bonus, mantienen secreta la información relativa a la geometría característica de sus aspas. Por lo que, para continuar el proyecto es necesario diseñar las aspas a partir de los métodos tradicionales disponibles en la literatura basados en aspectos generales como el radio y TSR.



**Figura 6: Fotografía de un aerogenerador Bonus B44/600 (Fuente: [44]).**

Los perfiles aerodinámicos del Laboratorio Nacional de Energías renovables o NREL, por sus siglas en inglés, han sido diseñados especialmente para su uso en HAWT y son ampliamente utilizadas en el diseño de estas [54]. Cuentan con un mejor rendimiento y son más estables en comparación con el uso de perfiles NACA [55]. Están divididos en diferentes familias de perfiles dependiendo del radio del rotor. Cada grupo está constituido por un perfil para la raíz, el cuerpo y la punta del aspa [56].

Según las recomendaciones de la NREL, tomando en cuenta que el diámetro del rotor de la turbina Bonus es de 44 m y que el modelo a escala del aerogenerador no será regulado por pitch. Se presenta la familia de perfiles anchos tal como se muestra en la tabla 5 con las respectivas áreas y porcentajes del radio que deben cubrir [56].

**Tabla 5: Perfiles NREL seleccionados para las aspas.**

Posición	Perfil NREL	Porcentaje del radio
Raíz	S818	15-40%
Cuerpo	S827	40-75%
Punta	S828	75-95%

Las propiedades aerodinámicas de los perfiles seleccionados se encuentran a disposición en la página web de Airfoil Tools [57]. Sin embargo, es necesaria una estimación del número de Reynolds para obtener con precisión las propiedades útiles para el diseño. En la ecuación (15) se realiza un cálculo del número de Reynolds al cual operaría el aerogenerador Bonus. Se consideran las propiedades de la siguiente forma [58]; la densidad del aire como  $1.246 \text{ kg/m}^3$  a  $10^\circ\text{C}$ , la velocidad nominal como  $15 \text{ m/s}$ , el largo característico, en este caso un supuesto del ancho promedio del aspa, como  $2 \text{ m}$  y la viscosidad dinámica del aire como  $1.778\text{e-}5 \text{ kg/ms}$  a  $10^\circ\text{C}$ .

$$Re = \frac{\rho_w v_w l}{\mu_w} = \frac{(1.246 \text{ [kg/m}^3\text{)}(15 \text{ [m/s)})(2 \text{ [m]})}{(1.778 * 10^{-5} \text{ [kg/ms]})} = 2.02 * 10^6 \quad (15)$$

Para el número de Reynolds estimado se tienen las propiedades aerodinámicas de los perfiles NREL mostradas en la tabla 6. Se enseñan los coeficientes de sustentación y arrastre para un ángulo de ataque óptimo de tal forma que la razón entre ambos coeficientes sea máxima, también se encuentra el coeficiente de momento.

**Tabla 6: Propiedades aerodinámicas de los perfiles NREL.**

Perfil	Max $C_L/C_D$	$\alpha$	$C_L$	$C_D$	$C_M$
S818	105.9	$9.25^\circ$	1.4311	0.0135	-0.1314
S827	121.4	$6.00^\circ$	0.9592	0.0079	-0.0879
S828	112.4	$5.75^\circ$	0.8276	0.0073	-0.0436

Con tal de determinar el ancho o chord a lo largo del aspa se tienen las ecuaciones determinadas por Betz [50], que entregan un valor ideal para las dimensiones del aspa y el ángulo al cual se deben ubicar respecto al plano del rotor para que estén posicionadas con un ángulo de ataque óptimo al rotar. Como primer paso se debe determinar el TSR al cual debiese operar el aerogenerador. En la ecuación (16) se estima un TSR redondeo superior con una cifra significativa a partir de los datos de operación conocidos de la turbina Bonus.

$$\lambda = \frac{\omega_r R_r}{v_w} = \frac{(27 \text{ [RPM)})(22 \text{ [m]})}{(15 \text{ [m/s]})} = 4.14 \approx 5 \quad (16)$$

La ecuación (17) se encarga de determinar el ancho del chord ideal para maximizar la fuerza de sustentación, con  $Z$  siendo el número de aspas del aerogenerador. Notar que el ancho es inversamente proporcional al cuadrado del TSR.

$$c(r) = 2\pi R_r \frac{1}{Z} \frac{8}{9C_L} \frac{1}{\lambda \sqrt{\lambda^2 \left(\frac{r}{R_r}\right)^2 + \frac{4}{9}}} \quad (17)$$

La ecuación (18) entrega el ángulo óptimo al cual deben estar rotadas las aspas respecto al plano del rotor, este es denotado por  $\beta$ .

$$\beta(r) = \arctan\left(\frac{2R_r}{3r\lambda}\right) - \alpha(r) \quad (18)$$

Para facilitar el posterior modelo de las aspas, se divide el radio en 20 secciones iguales con tal de satisfacer las proporciones recomendadas por NREL. Cada uno de los perfiles posee una curva que entrega el ancho del chord ideal a partir de la ecuación (17), y se encuentran graficadas en la figura 7. De esta figura se aprecia que si se utilizaran los anchos ideales para cada uno de los perfiles respetando los cambios propuestos anteriormente, existiría una discontinuidad en la superficie del asa. Por lo que, se opta por realizar una interpolación de los resultados, utilizando MATLAB, con tal se suavizar los puntos. Esta da como resultado la cuarta curva mostrada en el gráfico llamada Interpolación.

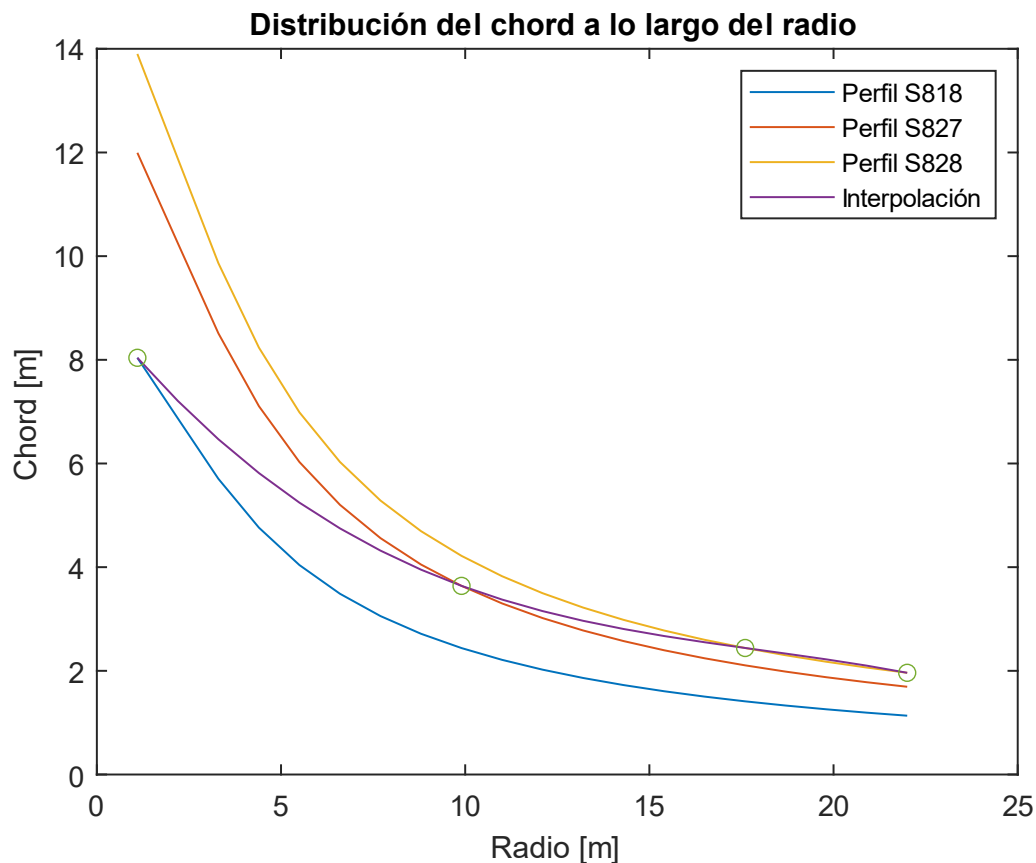
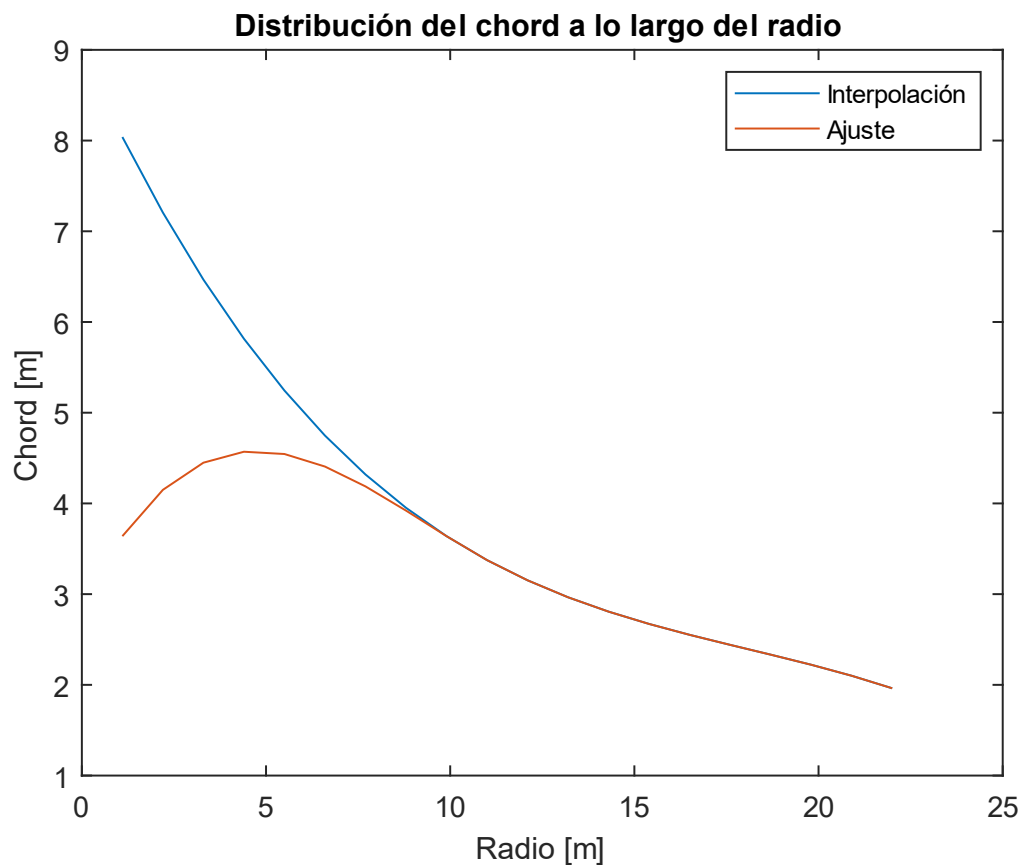


Figura 7: Distribución del chord a lo largo del radio (Fuente: elaboración propia).

A estas alturas ya es posible imaginar la forma final que va a tener el aspa del aerogenerador observando el gráfico anterior. Sin embargo, queda la última iteración del ancho, correspondiente a una reducción de la sección de la raíz. Esta se haya fundamentada en que, para una turbina de mayor tamaño, la raíz resulta ser la zona más pesada, además el proceso de la fabricación del aspa es más costoso por el mayor uso de material. Por lo que, los fabricantes deciden reducir esta sección sacrificando ligeramente la eficiencia de la turbina [59]. El impacto es pequeño debido a que el torque contribuido por la raíz al giro del rotor es menor que el aportado por las zonas más externas, ya que cuenta con menor brazo, es decir radio.

Con tal de reducir la sección de la raíz se realiza una interpolación en esta zona. Se toma como ancho inicial de la misma el chord del aspa al 40% del radio y se mantienen los puntos del cuerpo y punta del aspa, ya que interesa que sus propiedades se mantengan. Este ejercicio da como resultado el ajuste mostrado en la figura 8, donde es apreciable el cambio de forma que tiene el aspa en su raíz.



**Figura 8: Comparación entre la curva interpolada y ajustada (Fuente: elaboración propia).**

Para alinear los distintos chord a lo largo del radio se toma como referencia el punto donde las fuerzas aerodinámicas (sustentación y arrastre) pueden flectar la pala, pero no generan torsión, de esta forma el ángulo de ataque permanece constante. Esta posición se conoce como el eje elástico [60]. Este está ubicado, por lo general, a 0.25 veces el chord como se expresa en la ecuación (19), tomando como referencia el borde de ataque.

$$x(c) = 0.25c \quad (19)$$

A continuación, en la tabla 7 se encuentran los resultados después de evaluar las ecuaciones para los distintos perfiles a lo largo del radio y realizar diferentes procedimientos de ajuste. Con tal de, obtener sus ángulos beta respectivos y el ancho del chord como el producto de las iteraciones a las curvas anteriormente explicadas. Vale la pena destacar que el ángulo beta no es dependiente del chord y solo del radio del aspa.

**Tabla 7: Distribución del chord y el ángulo óptimo a lo largo del radio del aspa.**

Perfil	Porcentaje [%]	Radio [m]	Chord [m]	Beta [°]	Posición [m]
Raíz	5	1.10	3.6391	60.19	0.9098
	10	2.20	4.1497	43.88	1.0374
S818	15	3.30	4.44491	32.38	1.1123
	20	4.40	4.5699	24.44	1.1425
	25	5.50	4.5448	18.82	1.1362
	30	6.60	4.4064	14.71	1.1016
	35	7.70	4.1876	11.60	1.0469
	40	8.80	3.9209	9.184	0.9802
S827	45	9.90	3.6391	9.057 <sup>1</sup>	0.9098
	50	11.0	3.3748	8.931	0.8437
	55	12.1	3.1524	7.627	0.7881
	60	13.2	2.9653	6.528	0.7413
	65	14.3	2.8071	5.592	0.7018
	70	15.4	2.6713	4.784	0.6675
	75	16.5	2.5513	4.081	0.6378
S828	80	17.6	2.4408	3.712	0.6102
	85	18.7	2.3330	3.165	0.5833
	90	19.8	2.2217	2.677	0.5554
	95	20.9	2.1002	2.239	0.5250
Punta	100	22.0	1.9622	1.845	0.4906

1. El valor del ángulo debió ser interpolado porque el resultante de la ecuación era mayor que el precedente.

Con la información provista por la tabla 7 es posible recalcular un el número de Reynolds, a partir del nuevo ancho promedio de chord resultante del diseño del aspa. En este caso el promedio es de 3.3 m. Realizando la iteración para estimar el nuevo valor se encuentra en la expresión (20). Se aprecia que se encuentra en el mismo orden de magnitud que la primera estimación, por lo que no es necesario un reajuste de los datos.

$$Re = 3.34 * 10^6 \quad (20)$$

Para el interior del aspa, esta se espera que sea ligera. Por lo que, se desea evitar que el modelo se presente como un bloque sólido y que en la impresión se recurra solamente al mayado como única forma de optimizar el peso del aspa. Con tal de solucionar este inconveniente, se estudia cómo se rigidizan las aspas de un aerogenerador en su estructura interna.

La estructura interna del aspa de un aerogenerador se puede apreciar claramente en la figura 9. En la cual se observa un perfil similar a una viga de acero tradicional, lo cual contribuye a resistir la flexión y la torsión a lo largo del radio [61]. Se opta por implementar este principio en el proyecto con tal de reducir el uso de material.

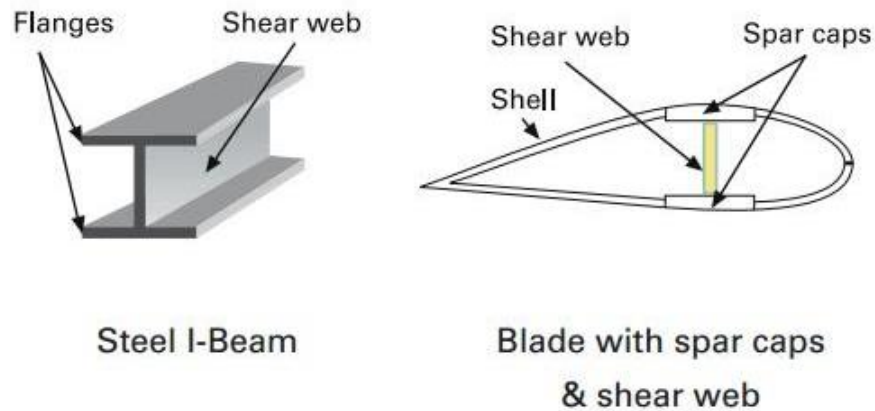


Figura 9: Estructura interna de un aspa de turbina eólica (Fuente: [62]).

El perfil estructural propuesto se encuentra centrado sobre el eje elástico. Cuenta con un ancho del 30% del chord y una altura relativa del perfil aerodinámico. El espesor para el resto del aspa de 50% del chord. Si bien, los espesores son altos respecto a un perfil aerodinámico utilizado en la realidad, estos se deciden tomando en cuenta que luego serán impresos en la etapa de fabricación a una escala mucho menor con la cual se corre el riesgo de que la impresora disponible no cuente con la sensibilidad necesaria para llevar a cabo la tarea.

## 2.8 Método BEM (blade element momentum)

El método BEM (blade element momentum) es capaz de caracterizar las fuerzas y el torque que actúan de forma local en una pala de aerogenerador. Este consiste en dividir el aspa en varias secciones para realizar el cálculo. Por lo que es una herramienta rápida y sencilla sobre las principales propiedades de la turbina. Para ello es necesario determinar los factores de momento  $a$  y  $a'$ , los cuales son definidos en el método mediante el procedimiento que sigue a continuación.

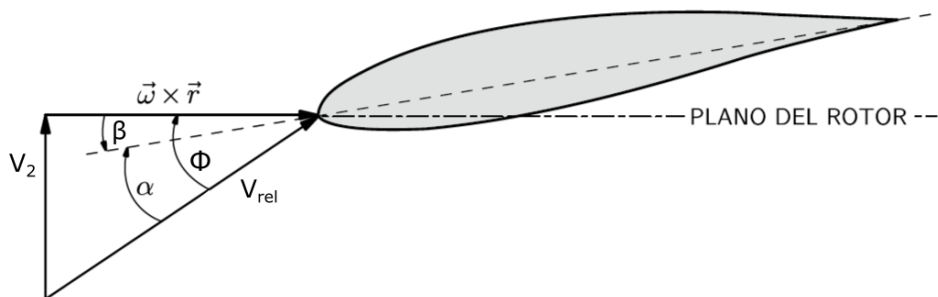


Figura 10: Velocidad relativa del viento en el perfil (Fuente: [63])

Se comienza calculando el ángulo  $\phi$ , que corresponde al ángulo relativo entre el plano de rotor y el chord del perfil aerodinámico como se muestra en la figura 10. El método define la ecuación (21) para determinar el ángulo mencionado. Se logra apreciar que esta expresión ya depende de los factores de momento, por lo que se establece que estos sean cero en un principio para realizar iteraciones y llegar a su valor verdadero más adelante. Además, también depende del SR (speed ratio o  $\lambda_r$ ), que a diferencia del TSR, este describe la relación de la velocidad tangencial y la velocidad del viento en cualquier punto a lo largo del radio, por lo que varía en la posición del aspa, como se lee en la ecuación (22).

$$\phi = \arctan\left(\frac{1 - a}{\lambda_r(1 + a')}\right) \quad (21)$$

$$\lambda_r = \frac{\omega_r r}{v_w} \quad (22)$$

Una vez determinado el ángulo, se pueden usar las ecuaciones (23) y (24) para obtener los valores de  $a$  y  $a'$  respectivamente. Se observa que dependen del radio, el chord, los coeficientes de sustentación, el ángulo  $\phi$  y el número de aspas del aerogenerador. Estos son iterados para obtener una mayor precisión de los resultados a partir de los supuestos iniciales.

$$\frac{a}{1 - a} = \frac{Zc(C_L(\alpha) \cos(\phi) + C_D(\alpha) \sin(\phi))}{8\pi r \sin(\phi)^2} \quad (23)$$

$$\frac{a'}{1 - a'} = \frac{Zc(C_L(\alpha) \cos(\phi) - C_D(\alpha) \sin(\phi))}{8\pi r \sin(2\phi)} \quad (24)$$

A partir de acá se resuelven las expresiones de la fuerza de empuje ( $F_t$ ) y el torque ( $\tau$ ), tal como son descritas en las ecuaciones (25) y (26), donde todas las variables ya son conocidas. Vale la pena destacar que en este caso el radio es considerado como del modelo experimental, es decir, con una escala de 1:100 del radio de la turbina Bonus. Esto trae como consecuencia que debido a la forma de las ecuaciones, los resultados ya no escalen de forma lineal respecto a la geometría de la turbina.

$$dF_t(r) = \rho_w v_w^2 4a(r)(1 - a(r))\pi r dr \quad (25)$$

$$d\tau_r(r) = 4a'(r)(1 - a(r))\rho_w v_w \pi r^3 \omega_r dr \quad (26)$$

Una vez resueltas las ecuaciones, los resultados son resumidos en la tabla 8 que se encuentra a continuación.

**Tabla 8: Resultados del método BEM.**

Perfil	r [m]	a [-]	a' [-]	$F_t$ (r) [N]	$\tau_r$ (r) [Nm]
Raíz	0.011	0.310	1.992	0.091	1.5e-4
	0.022	0.288	0.762	0.262	9.1e-4
S818	0.033	0.325	0.589	0.467	0.0029
	0.044	0.367	0.522	0.693	0.0065
	0.055	0.403	0.477	0.923	0.0118
	0.066	0.430	0.434	1.150	0.0186
	0.077	0.447	0.390	1.370	0.0267
	0.088	0.455	0.345	1.586	0.0357
S827	0.099	0.298	0.158	1.517	0.0306
	0.110	0.300	0.143	1.700	0.0384
	0.121	0.302	0.130	1.886	0.0472
	0.132	0.305	0.120	2.077	0.0571
	0.143	0.308	0.113	2.273	0.0681
	0.154	0.313	0.106	2.473	0.0804
	0.165	0.317	0.100	2.676	0.0938
S828	0.176	0.274	0.078	2.630	0.0946
	0.187	0.277	0.074	2.815	0.1080
	0.198	0.277	0.070	2.989	0.1217
	0.209	0.275	0.066	3.144	0.1351
Punta	0.220	0.269	0.060	3.266	0.1472

Al analizar los resultados de la tabla 8, se aprecia que las magnitudes del empuje y el torque son pequeñas respecto a los valores que se pudieran esperar de un aerogenerador Bonus real. Sin embargo, esto se debe al radio del rotor, que al encontrarse bajo el umbral del metro va a provocar que estas magnitudes disminuyan al ser escaladas por potencias de 2 y 4 respectivamente.

A partir de los resultados anteriores es posible calcular la magnitud total del empuje y el torque que produce la turbina mediante una sumatoria, tal como se muestra en las ecuaciones (27) y (28).

$$F_t = \sum_{r_0}^{R_r} dF_t(r) = 35.99 [N] \quad (27)$$

$$\tau_r = \sum_{r_0}^{R_r} d\tau_r(r) = 1.13 [Nm] \quad (28)$$

A partir del par del rotor se puede estimar la potencia de la turbina mediante la ecuación (29) y el coeficiente de extracción de energía  $C_p$  del aerogenerador en la expresión (30). Donde A corresponde al área barrida por el rotor.

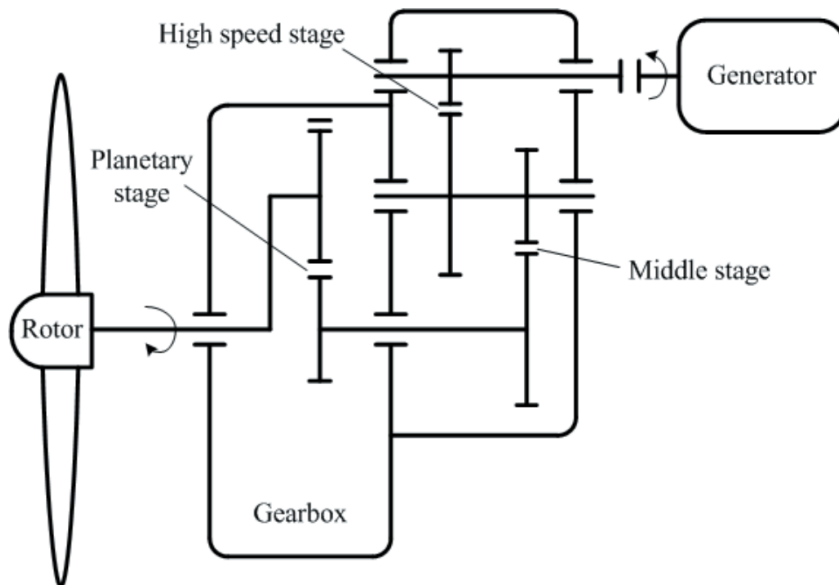
$$P = \tau_r \omega_r = 3.20 [W] \quad (29)$$

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho_w v_w^3 A} = 0.01 \quad (30)$$

## 2.9 Dimensionamiento de la transmisión

Una vez determinado el tipo de elemento de salida con el que va a contar en el banco de ensayos, es posible definir los aspectos que se desea que cumpla la caja de engranajes del sistema. Con este fin se vuelve a consultar como referencia la turbina eólica Bonus, con las características presentadas en la tabla 3, en la cual destaca el uso de tres etapas compuestas de sistemas planetarios y en paralelo, con una relación de 1:56. Se busca que el diseño presente estas propiedades.

Típicamente, la transmisión de una turbina eólica consiste en una primera etapa planetaria, seguida de dos etapas paralelas, una de velocidad media y otra de alta velocidad [70]. Las etapas suman 9 engranajes en total, con 4 ejes distintos. Lo cual se puede apreciar representado en la figura 11.



**Figura 11: Definición de una transmisión multietapa en una turbina eólica (Fuente: [71]).**

Se diseña de tal forma que se cumpla la relación de la caja de engranajes. Para esto la etapa planetaria presenta una relación de transmisión  $i_1$  de 3.5:1 y las etapas paralelas poseen una relación  $i_2$  de 4:1. Una vez precisados los aspectos generales de la transmisión, se imponen condiciones dimensionales que se deben cumplir en todo el sistema para asegurar la compatibilidad de los engranajes.

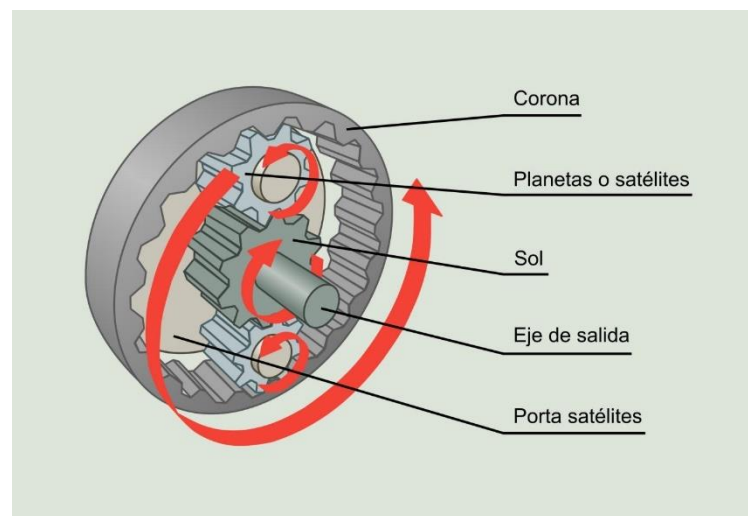
Entre las medidas más relevantes del sistema que se pueden definir está la altura de los dientes de los engranajes, ya que los dientes al ser elementos pequeños en relación con otras partes del sistema pueden presentar una mayor dificultad al ser impresos. Por lo anterior, es que se estima que los dientes posean al menos 4 mm de altura, de manera que la tolerancia de la impresora no se vea sobrepasada cuando esté trabajando. Este valor mínimo es utilizado en toda la transmisión del aerogenerador y trae consecuencias para la definición de otras magnitudes relevantes como el módulo. La altura del diente está directamente relacionada con el módulo  $M_g$  de los engranajes y su relación está determinada mediante la ecuación (31).

$$H_d = 2.25M_g \quad (31)$$

De la ecuación anterior resulta que el módulo mínimo para que se cumpla la condición impuesta es de 1.78 mm. Sin embargo, el módulo acostumbra a ser representado de forma normalizada con aumentos graduales [72]. Aproximando al número más cercano se define en 2 mm la magnitud del módulo. Por otro lado, conocido el módulo y el diámetro primitivo  $D_p$  necesario es posible determinar el número de dientes por medio de la ecuación (32).

$$z_i = \frac{D_p}{M_g} \quad (32)$$

Con lo anterior en cuenta, se comienza con la definición del sistema planetario. La primera etapa planetaria cuenta con cuatro partes fundamentales, las cuales son: sol, planetas, porta-planetas y corona, esto se puede apreciar en la figura 12 junto con sus respectivas direcciones de movimiento angular. Estos movimientos proporcionan una variedad de relaciones que se podrían utilizar en el proyecto, sin embargo en un aerogenerador usualmente se utiliza la siguiente configuración [71]. La corona se restringe, es decir su velocidad angular es cero, el porta-planetas es el elemento conductor, por lo tanto su velocidad angular debe ser igual a la del rotor, los planetas logran girar al sol, el cual toma el rol de elemento conducido, por lo que su velocidad angular debiese ser 3.5 veces la del rotor.



**Figura 12: Partes principales de un sistema de engranajes planetario (Fuente: [73]).**

Con respecto a las dimensiones, se tiene que tomar en cuenta que los planetas van unidos al porta-planetas por medio de descansos, por lo que existe un diámetro que deben cumplir los planetas de la transmisión para que admitan un rodamiento en su interior. Los apoyos interiores tienen un diámetro exterior de 22 mm como se ve en la siguiente sección. Además, se establece la cifra de planetas en 3, debido a que usualmente los sistemas planetarios cuentan con este número [74].

Una vez definidos los aspectos anteriores, se puede calcular el número de dientes de la corona  $z_c$  y los planetas  $z_p$ , a partir de la relación de transmisión y el número de dientes del sol  $z_s$ . Existen expresiones que deben cumplir los engranajes planetarios para garantizar su correcto funcionamiento [75], que de paso ayudan a determinar las demás incógnitas, como la ecuación (33) que describe la relación de transmisión de la primera etapa  $i_1$ .

$$i_1 = 1 + \frac{z_c}{z_s} \quad (33)$$

Para obtener la cantidad de dientes que debe tener cada planeta existe la ecuación (34) que describe las distancias de los centros para que calcen.

$$z_c = z_s + 2z_p \quad (34)$$

De igual forma se verifican otras condiciones, como lo es la expresión (35), que garantiza que los planetas se puedan ubicar alrededor del sol de forma equidistante. También se corrobora la desigualdad (36), que se asegura de que los planetas adyacentes operen sin interferir entre ellos.  $N_p$  corresponde a la cantidad de planetas que tiene la transmisión.

$$\frac{z_s + z_c}{N_p} \in \mathbb{Z} \quad (35)$$

$$z_p + 2 < (z_s + z_c) \sin\left(\frac{180^\circ}{N_p}\right) \quad (36)$$

Probando diferentes valores para el número de dientes de los engranajes, se comprueba que las expresiones anteriores se cumplen cuando  $z_s$  es igual a 24. Con lo cual se determina el número de dientes y el diámetro que debe tener cada engranaje. Lo cual se haya resumido en la tabla 9.

**Tabla 9: Número de dientes y diámetro de los engranajes planetarios.**

Engranaje	Número de dientes $z_i$ [-]	Diámetro primitivo $D_p$ [mm]
Sol	24	48
Planeta	18	36
Anillo	60	120

La reducción del torque que se produce en la etapa planetaria está determinada por la ecuación (37). Su forma varía dependiendo de qué elemento del sistema se encuentre fijo, en este caso se desea obtener el torque del engranaje sol  $\tau_1$ , que depende del torque del porta-planetas  $\tau_r$  y el número de dientes de los engranajes sol y la corona.

$$\tau_1 = \tau_r \frac{z_s}{z_c + z_s} \quad (37)$$

Luego de resolver la ecuación, se haya que el sistema planetario reduce el torque que percibe el engranaje sol a  $0.32 Nm$ .

Para el dimensionamiento de las otras dos etapas, correspondientes a engranajes paralelos, se considera que ambas etapas son iguales, es decir, utilizan los mismos dos engranajes en el diseño. De esta forma solo es necesario caracterizar el mecanismo de una sola etapa y se asegura que el sistema sea compatible. Para evitar confusiones se utilizan los términos de engranajes conducido y conductor, ya que estos términos deben ser válidos para las dos etapas del sistema.

La etapa paralela cuenta con una relación 4:1 y como ya se estableció anteriormente debe contar con un módulo de  $2 mm$ . En este caso, el principal factor limitante es el diámetro del engranaje conducido, el cual se ve afectado por el número de dientes. Un análisis preliminar de la situación, con ayuda de las herramientas de Inventor, indica que la cantidad mínima de dientes  $z_{conducido}$  que puede tener el diseño del engranaje pequeño es de 12. Esto para que este engrane correctamente y presente dimensiones adecuadas. Por lo que, se considera este como el valor a utilizar en el sistema de los engranajes paralelos. El número de dientes del engranaje conductor está dado por la relación de la transmisión  $i_2$ , como se muestra en la ecuación (38).

$$i_2 = \frac{z_{conductor}}{z_{conducido}} \quad (38)$$

Se obtiene que la cantidad de dientes del engranaje conductor es de 48. Por medio de la ecuación (32) se calcula el diámetro primitivo del par de engranajes y se resume en la tabla 10.

**Tabla 10: Número de dientes y diámetro primitivo de los engranajes paralelos.**

Engranaje	Número de dientes $z_i$ [-]	Diámetro primitivo $D_p$ [mm]
Engranaje Conductor	48	96
Engranaje Conducido	12	24

La reducción del torque que se produce en las etapas paralelas está determinada por la relación de los engranajes o por su número de dientes, además del torque del engranaje conductor  $\tau_2$ , en el caso de la primera paralela y  $\tau_3$  para la segunda etapa. Lo cual se lee más claramente en la ecuación (39) ejemplificando la primera etapa paralela, lo que permite intuir la siguiente.

$$\tau_2 = \tau_1 \frac{z_{conducido}}{z_{conductor}} \quad (39)$$

De esta forma, tras la primera etapa paralela, el torque se reduce a  $0.08 Nm$ . Y tras la segunda etapa paralela, esta llega al elemento generador de torque con  $0.02 Nm$ .

Una vez determinados los aspectos teóricos de la transmisión, se puede continuar con el diseño 3D de los engranajes, caja y ejes. Sin embargo, antes se vuelve necesario conocer el tipo de rodamientos que se utilizan para el proyecto, para diseñar correctamente los ejes y los engranajes planetarios.

## 2.10 Selección del elemento de salida

Antes de continuar con el diseño de la caja de engranajes, es idóneo definir el elemento de salida al cual irá conectado el mecanismo encargado de producir torque en el banco de pruebas. Para lo cual se barajan distintas opciones: generadores, motores, frenos mecánicos y frenos magnéticos. Estas se discuten para definir la más adecuada al proyecto.

Comenzando por la opción de usar un generador, que es la máquina que transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Presenta la ventaja de poder realizar una simulación realista al ser el elemento que tradicionalmente va asociado dentro de las turbinas eólicas. También al estar generando energía, se tiene una potencia eléctrica disponible, útil si es que se desea unir a una resistencia, permitiendo cuantificar indirectamente el rendimiento de la turbina, entre otros parámetros, a través de la medición de magnitudes eléctricas. Entre las desventajas se encuentra que no existe variedad de modelos de generadores con las características deseadas en el mercado.

La siguiente opción es utilizar un motor eléctrico, de tal forma que al accionarlo genere un par que frene el movimiento del aerogenerador. Los motores presentan la ventaja de poseer un control preciso del torque, ya que son regulados mediante controladores, lo que entrega la oportunidad de simular condiciones específicas de carga y evaluar el rendimiento de la turbina en distintos escenarios. Son fáciles de ajustar al tener funciones programables. También es posible medir precisamente distintos parámetros, ya que muchos cuentan con sistemas de medición integrados.

El próximo elemento que se considera es el uso de frenos mecánicos o hidráulicos, similares a aquellos utilizados en bicicletas. Consiste en un disco rotor que se une al sistema de frenado, y por medio de pistones presiona contra el disco para generar fricción. Deteniendo el disco como consecuencia de la disipación de energía. La principal ventaja de este mecanismo es que no requiere de sistemas eléctricos o electrónicos para su instalación o uso, lo que simplifica la operación y el entendimiento general de la física tras el fenómeno. También este tipo de freno se encuentra fácilmente en el comercio. Como desventaja se encuentra que no son precisos para regular el torque, además no entregan ninguna magnitud de interés directamente, por lo que se debe optar por sensores externos para realizar mediciones.

El último sistema que se presenta son los frenos magnéticos, estos utilizan corrientes de Foucault o parásitas, que se oponen al movimiento de los cuerpos y son producidas por la influencia de campos magnéticos. Entre las ventajas se encuentra que para que se produzca el fenómeno no ocurre roce entre las partes, por lo que los materiales no sufren desgaste. También son fáciles de fabricar, ya que solo se requiere una placa de un material conductor y un par de imanes (idealmente neodimio) o electroimanes [64]. Son fáciles de regular ya que la intensidad del frenado depende de factores como la distancia entre el imán y la placa, material, espesor, etc. Entre las desventajas está la dificultad para medir las características electromagnéticas relacionadas.

Al contrastar las diferentes opciones de resistencia para el proyecto queda en evidencia que no es una decisión que se tome a la ligera. Priorizando la sencillez de la instalación y la disponibilidad de los elementos destacan las opciones relacionadas al frenado magnético y el uso de un generador pequeño.

Es de particular interés la primera opción debido a que es posible regularla de manera más precisa con tal de generar un frenado que mantenga constante la velocidad angular de los ejes de la turbina. Por esta razón se evalúa el freno magnético como posible dispositivo para regular el torque del proyecto.

### **2.11 Evaluación del freno magnético**

El freno magnético, se conoce también como freno de corrientes de Foucault. Consta de dos partes principales que deben ser diseñadas de manera dedicada. La primera es el disco, el cual va unido en el extremo del eje de alta velocidad de la turbina eólica. La segunda es el sistema que se encarga de generar el campo magnético, este puede ser inducido por medio de bobinas, como lo es en el caso de un electroimán, o por el uso imanes comunes de neodimio o ferrita.

La lista de materiales necesaria para su construcción está constituida por un electroimán, confeccionado de alambre de cobre esmaltado y con núcleo de un material ferroso, un material metálico conductor en forma de disco para ser manejado fácilmente, una fuente de energía para el electroimán y diferentes componentes para el montaje con fin de soportar la estructura.

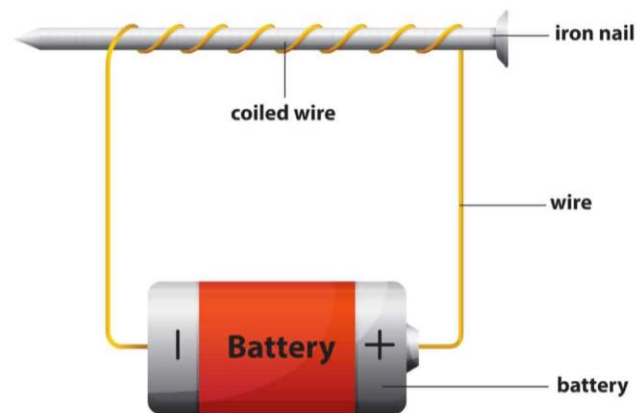
Para fabricar el disco se selecciona el aluminio como material conductor, debido a que en este tipo de aplicaciones presenta una mayor tasa de frenado en comparación con otros conductores comunes como el cobre y el zinc [65]. Respecto al espesor del disco, se dispone de una placa de aluminio de 1.2 mm para maquinar. El espesor afecta directamente el rendimiento del sistema, se estima que esta cuenta con al menos 1 mm de espesor para su operación en torques bajos [66], por lo que el uso de esta lámina de metal es adecuado para los propósitos deseados.

En relación el diámetro del disco, este debe ser relativamente pequeño respecto al rotor del aerogenerador. Debido a que está ubicado aguas abajo y el impacto del disco contra el viento puede entorpecer el funcionamiento de la turbina al afectar la naturaleza del flujo, reduciendo la velocidad de rotación. Se estima conveniente utilizar una razón de 1:2 respecto al rotor, por lo que si el rotor tiene un diámetro alrededor de los 480 mm, el disco debe tener 240 mm de diámetro. De forma evitar interrumpir el flujo de aire y permitiendo un brazo suficiente para la fuerza de frenado. Además debe contar con un orificio de 8 mm en el centro, para montar dentro del eje de alta velocidad y 4 alrededor del centro de 4 mm para fijarse a una brida. El modelo por fabricar del disco de aluminio se aprecia en la figura 13 y el plano de fabricación se encuentra en el anexo C.



**Figura 13: Modelo 3D del disco de frenado (Fuente: elaboración propia).**

El siguiente elemento del freno consiste en el electroimán, para su diseño se fabrica una bobina con alambre de cobre esmaltado enrollado sobre un núcleo de material conductor al cual se le dará alimentación por medio de un circuito simple, similar a como se muestra en la figura 14. Para determinar una fuente de poder adecuada para el sistema se debe conocer el torque mínimo que debe ser capaz de producir de forma de regular el funcionamiento del aerogenerador.



**Figura 14: Esquema de un electroimán simple (Fuente: [67]).**

Considerando que el electroimán se encuentra en un radio  $r_m$  de 110 mm desde el eje del disco, se puede estimar la fuerza mínima necesaria para producir el frenado  $F_{freno}$ , como se aprecia en la ecuación (40), utilizando el torque calculado anteriormente.

$$F_{freno} = \frac{\tau_3}{r_d} = \frac{0.02}{0.11} = 0.18 [N] \quad (40)$$

Una vez la fuerza necesaria es determinada, le sigue calcular el campo magnético necesario que debe inducir el electroimán para frenar el disco. Para ello existe una ecuación que relaciona la fuerza de frenado con diferentes parámetros del sistema [68] como se aprecia en la expresión (41). Donde  $\sigma_d$  corresponde a la conductividad del disco,  $t_d$  es el espesor del disco,  $v_d$  es la velocidad del disco en el punto donde se ubican los electroimanes,  $B$  es el campo magnético de los electroimanes y  $A_m$  es el área del polo de un electroimán.

$$F_{freno} = \sigma_d t_d v_d B_m^2 A_m \quad (41)$$

Se considera para efectos de cálculo que  $\sigma_d$  para el aluminio es igual a  $37.7 * 10^6 S/m$ ,  $t_d$  del disco como  $1.2 * 10^{-3} m$ ,  $v_d$  como  $17.3 m/s$  si es que se desea que el disco gire a  $1500 RPM$  y  $A_m$  como  $1.26 * 10^{-4} m^2$  tomando en cuenta que el diámetro del núcleo del electroimán es de media pulgada o  $12.7 mm$ . Reemplazando los valores en la ecuación (41), se obtiene un campo como se ve en la expresión (42).

$$B_m = \sqrt{\frac{F_{freno}}{\sigma_d t_d v_d A_m}} = \sqrt{\frac{0.18}{(37.7 * 10^6)(1.2 * 10^{-3})(17.3)(1.26 * 10^{-4})}} = 0.042 [T] \quad (42)$$

Conociendo la intensidad del campo magnético necesario para frenar el disco, se calculan los requerimientos mínimos que debe tener el electroimán mediante la ecuación (43). Para lo cual se realizan algunas suposiciones iniciales. El núcleo del electroimán es un perno de acero al carbono de  $24.7 mm$  de largo  $l_n$ , y cuenta con una permeabilidad magnética en el aire  $\mu_{aire}$  alrededor de 1 en magnitud [69]. Además se considera la constante magnética, también conocida como permeabilidad de vacío, como  $4\pi * 10^{-7} TmA^{-1}$ . También se realizan 210 vueltas  $N$  de cable de cobre esmaltado de  $0.6 mm$  de diámetro para generar el bobinado. Se despeja la corriente  $I$  de la ecuación.

$$B_m = \mu_0 \mu_{aire} \left( \frac{NI}{l_n} \right) \quad (43)$$

Resolviendo se obtiene que la corriente mínima necesaria para generar un campo magnético es de  $3.93 A$ . Lamentablemente este valor no resulta aplicable en el prototipo, debido a que existe una limitación del amperaje máximo que puede soportar el alambre de cobre, que en este caso resulta de  $1.6 A$ , según la web del vendedor, por lo que se corre el riesgo de sobrecalentar el sistema. Además de que no se cuenta con una alimentación de  $4 A$  para el imán. Por lo que, se considera la segunda opción para el proyecto.

## 2.12 Evaluación del generador

Para evaluar el generador, se debe seleccionar un modelo adecuado. Por suerte, ya se cuenta con la disponibilidad de un micro generador, el cual presenta las siguientes características de la tabla 11 entregadas por el vendedor.

**Tabla 11: Características del micro generador.**

Diámetro del generador [mm]	24.5
Longitud del generador [mm]	34.2
Diámetro del eje [mm]	2
Longitud del eje [mm]	13.5
Voltaje de salida [V]	0-5.5
Corriente de salida [mA]	0.01-100
Velocidad nominal [RPM]	100-6000
Modo de generación de energía	Corriente continua

De la tabla resalta el rango de velocidades aceptables en las que el generador funciona, ya que la velocidad de operación que se desea para el eje de alta velocidad es de 1500 RPM, por lo que al probar el sistema, este debiese cumplir el generar corriente sin problemas. Otro aspecto que se vislumbra a simple vista es el eje de 2 mm del generador, el cual resulta muy pequeño en comparación al eje del aerogenerador, y para el que se debe diseñar y fabricar una cupla que permita el funcionamiento.

### **2.13 Selección de rodamientos**

Elegir correctamente los rodamientos, en una fase anterior al modelado de las partes, es fundamental, debido a que estos dictaminan el ancho que deben tener los ejes del sistema. Y de esta forma condicionan las dimensiones del resto de los componentes.

Los rodamientos son elegidos en base a que su disponibilidad en el mercado y tomando en cuenta que sus dimensiones sean adecuadas para el montaje. Se propone el modelo de la serie 608 2RS, el cual corresponde a un rodamiento rígido de bolas con sellos. Este es común y económico, ya que se puede comprar al por mayor, por lo que se considera como una buena opción. Cuenta con las siguientes dimensiones características: 22 mm de radio exterior, 8 mm de radio interno y 7 mm de ancho. Se encuentra lubricado con grasa para reducir la fricción interna, el sufijo 2RS hace referencia a que presenta sellos de goma lo que cual se aprecia en la figura 15, los cuales ayudan a proteger contra contaminantes como el polvo y la suciedad. Otros detalles entregados por el fabricante sobre dimensiones útiles para el diseño se pueden encontrar en el anexo A.



**Figura 15: Rodamiento 608 2RS (Fuente: elaboración propia).**

El análisis de cargas sobre los descansos es posible. Sin embargo cada rodamiento por sí solo presenta una alta estabilidad estructural, ya que comúnmente son destinados para su uso en patinaje y skate, donde las exigencias de fuerzas y cargas son mucho mayores a las que se esperan del proyecto.

La técnica que se plantea para fijar los rodamientos en el lugar es interferencia, creando un ajuste apretado por medio de tolerancias bajas en los modelos impresos en 3D.

#### **2.14 Dimensionamiento de los ejes del aerogenerador**

De acuerdo con lo que ya se ha planteado de la transmisión de la turbina, se necesitan 4 ejes en total para diferenciar las etapas de engranajes. Los cuales corresponden al eje de baja velocidad, el primer eje medio, el segundo eje medio y el eje de alta velocidad.

Una de las particularidades de los ejes es que no son fabricados en filamento como el resto de las partes diseñadas para el aerogenerador, sino que se utiliza una barra de acero liso SAE 1010 de 8 mm de diámetro. El trozo de metal es maquinado con las especificaciones requeridas para dar forma a cada uno de los ejes. Esta decisión se fundamenta en el razonamiento de que el esfuerzo de corte máximo del PLA es mucho menor que el del acero, por lo que este último es mejor opción para resistir las torsiones involucradas en el sistema. Esta afirmación se puede verificar mediante la aplicación de la ecuación de esfuerzo cortante de la mecánica de sólidos (44).

$$\tau_{max} = \frac{\tau_r r_{eje}}{J} \quad (44)$$

Donde  $\tau_{max}$  corresponde al esfuerzo de corte máximo debido a la torsión,  $\tau_r$  corresponde al torque,  $J$  al momento polar de inercia del eje y  $r_{eje}$  al radio, en este caso constante e igual a 4 mm. Se considera el torque del rotor debido a que es el máximo del sistema.

$$\tau_{max} = \frac{\tau_r r_{eje}}{J} = \frac{(1.13) \left(\frac{0.008}{2}\right)}{\frac{\pi}{32} (0.008)^4} = 11.24 \text{ [MPa]} \quad (45)$$

Este resultado luego se compara con los esfuerzos de corte admisibles para ambos materiales. Se debe cumplir que estos sean mayores al esfuerzo máximo calculado anteriormente. Para esto se consideran los esfuerzos de fluencia  $S_y$ , para el acero SAE 1010 como 300 MPa [69] y para el PLA como 5 MPa [70]. Esto último con el fin de calcular el corte máximo por medio de la expresión (46) y, de una vez por todas, ver si ambos materiales son válidos.

$$\tau_{max} = 0.5S_y \quad (46)$$

De acá resulta que el corte máximo para el acero es de 150 MPa, por lo que se cumple el requisito necesario con un eje metálico. Mientras que el corte máximo para el PLA es de apenas 2.5 MPa, lo cual no es suficiente para cumplir y por tanto se presentará un fallo por torsión en el material. Es por esta razón que los ejes del sistema fueron diseñados y pensados en fierro y no plástico.

## CAPÍTULO 3: Diseño de materialización

En el capítulo anterior se abordaron requerimientos de diseño, la factibilidad y se definieron aspectos esenciales para el desarrollo del presente capítulo. Aquí se procede a tomar las consideraciones anteriores y llevar a cabo un modelado 3D completo del sistema, lo cual es necesario para su posterior fabricación mediante impresión 3D o mediante maquinación como es el caso de los ejes.

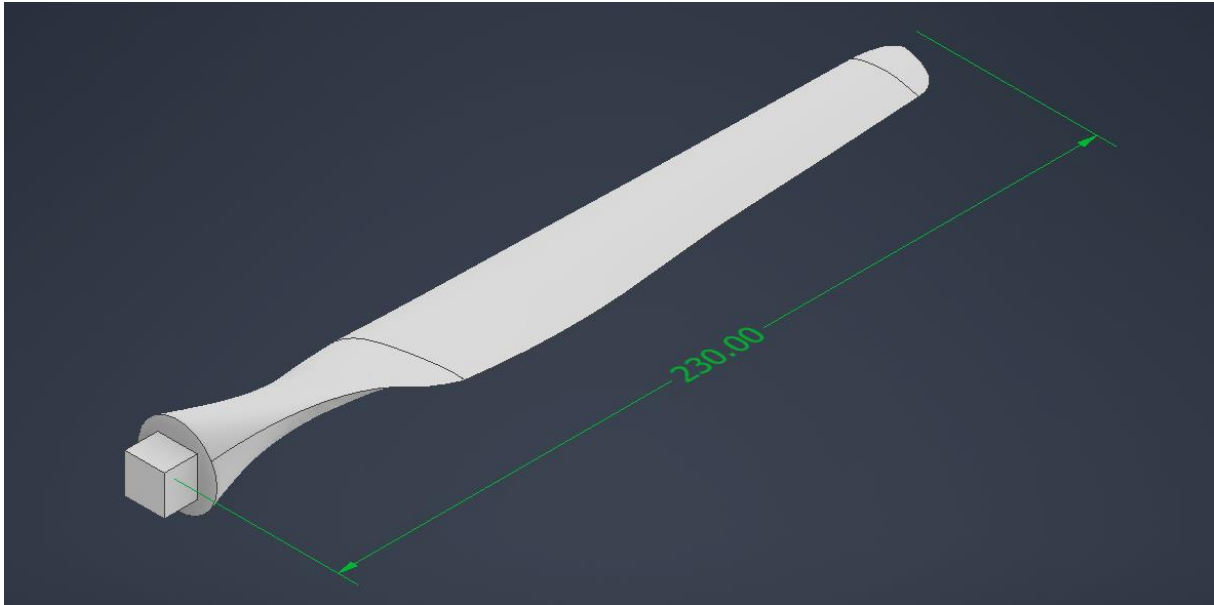
### 3.1 Modelo 3D del rotor

A continuación se presentan las etapas hechas para el modelado 3D del rotor, consistente de dos partes; las aspas y el cabezal. Se utiliza Inventor como entorno de diseño y las coordenadas de los tres perfiles utilizados para el modelo se encuentran disponibles en la página web de Airfoil Tools.

Para un aspa se comienza con un bosquejo de los distintos perfiles, para lo cual se importan las coordenadas que representan las curvas del perfil, luego son unidas por medio de una spline para generar un contorno con el que se puede trabajar en Inventor. Se marca la ubicación donde se encuentra el eje elástico en el perfil para facilitar la alineación de los bosquejos.

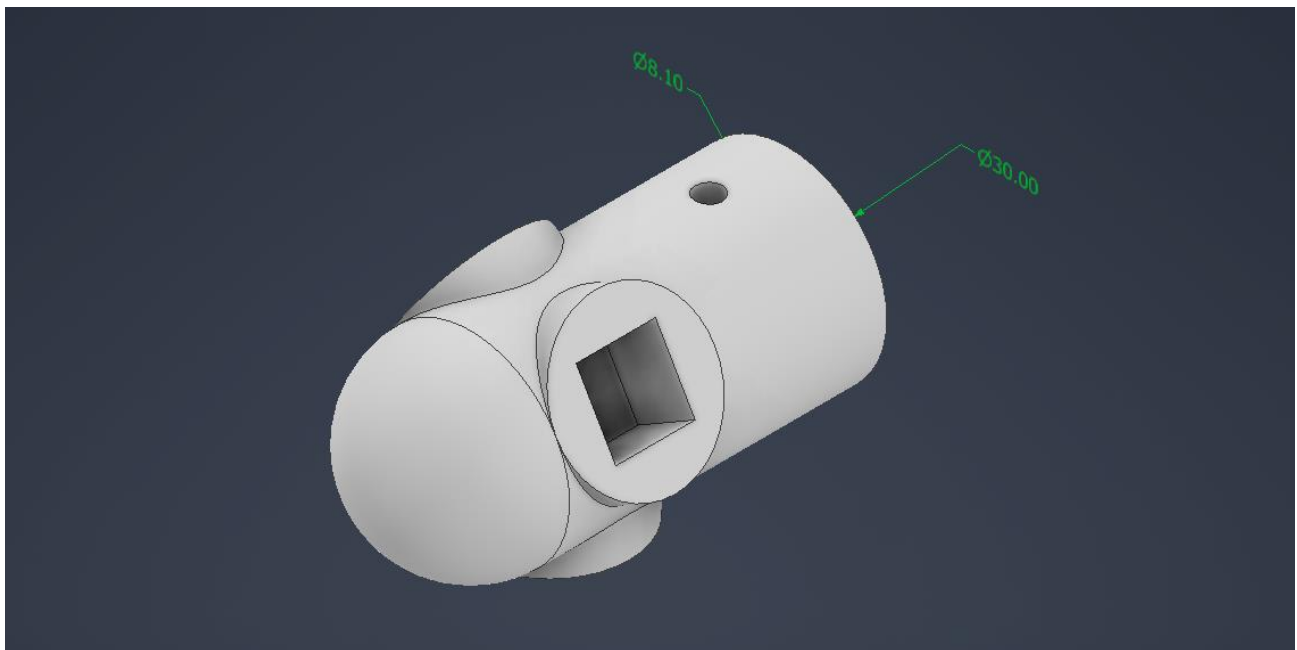
El siguiente paso es repetir la geometría de los perfiles, la cantidad de veces indicada en la tabla 7, separados 11 mm cada segmento a lo largo del radio. Luego, los bosquejos son escalados considerando la relación de 1:100 junto con el ancho de chord correspondiente y son rotados respecto al plano del rotor lo indicado por el ángulo beta.

Con la herramienta solevación se seleccionan todos los perfiles en orden y se genera un sólido con una superficie suave. Para la punta, se ubica el último perfil. se mantiene sin escalar y mediante una solevación es unido al resto del aspa. Mientras que para la raíz, se ubica un círculo de radio 12 mm a 22 mm del primer perfil utilizado y se realiza una solevación para la unión. Sobre el círculo de la raíz se ubica un cuadrado de lado 12 mm, que es extruido 1 cm para poder conectar el aspa con el cabezal. El modelo resultante se puede observar en la figura 16.



**Figura 16: Modelo 3D del aspa de la turbina (Fuente: elaboración propia).**

Para el diseño del cabezal se comienza con un cilindro de 30 mm de diámetro y 36 mm de alto. La conexión con las palas se logra con la extrusión de tres círculos de 12 mm de radio alrededor del cilindro separados por  $120^\circ$ , a los que se les realizan huecos cuadrados de lado 12 mm y de 10 mm de profundidad. La conexión al eje de baja velocidad se realiza con un agujero en la cara posterior del cilindro de 8 mm en diámetro (el ancho del eje está condicionado por el tipo de rodamiento, como se ve más adelante) y 12 mm de profundidad. La fijación de ambas partes se consigue con un orificio de 4 mm a lo largo del diámetro del cilindro para insertar un perno y una tuerca. En la parte delantera, como se observa en la figura 17, se ubica una semiesfera para favorecer la aerodinámica de la turbina.



**Figura 17: Modelo 3D del cabezal de la turbina (Fuente: elaboración propia).**

Para generar el rotor, se realiza un ensamblaje con tres aspas y un cabezal por medio de las uniones, tal como se muestra en la figura 18.



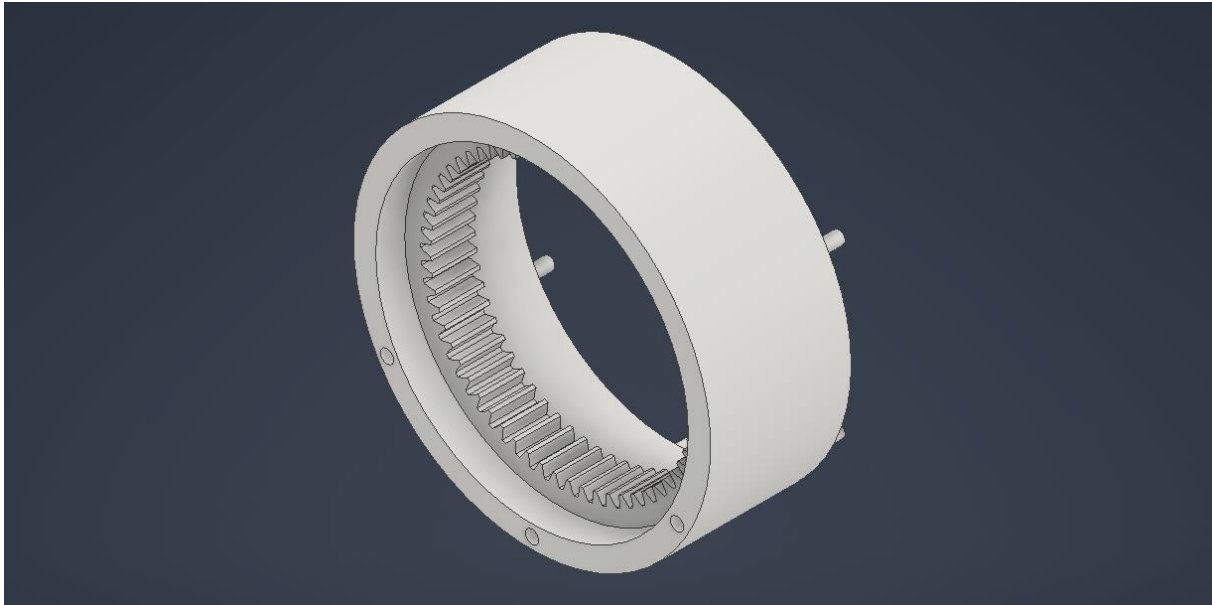
**Figura 18: Modelo 3D del rotor de la turbina (Fuente: elaboración propia).**

### **3.2 Modelo 3D de la transmisión**

El modelado 3D de las etapas de la transmisión se realiza con ayuda de las herramientas de Inventor. Se contribuye generando plantillas de engranajes rectos, a partir del módulo, la relación de la transmisión y el número de dientes que se diseñen. Aspectos que ya fueron determinados. Estas plantillas luego pueden ser modificadas para las necesidades específicas que se requieran en el modelo, como agujeros, monturas o tolerancias.

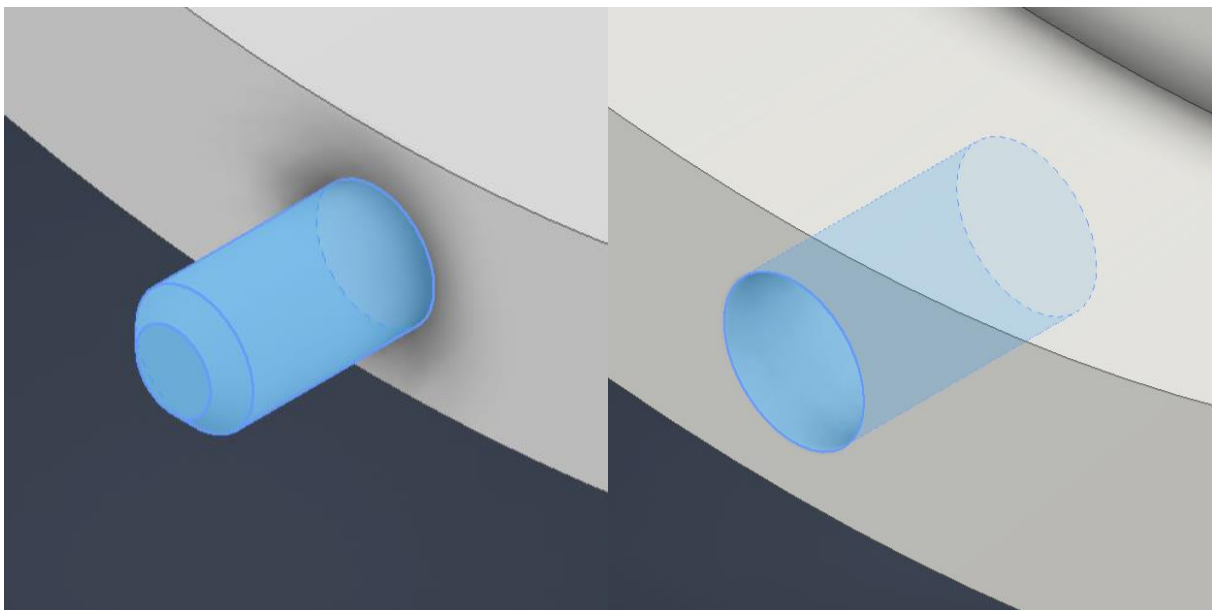
Siguiendo el orden de las etapas, se comienza con el modelo del sistema planetario, para el cual se generan tres plantillas, para la corona, el sol y los planetas.

La corona es modelada a partir de un engranaje interno, es decir, una variación de los engranajes rectos en la que poseen los dientes tallados en la parte interior de un anillo. La plantilla inicial se crea con 60 dientes, 120 mm de diámetro primitivo y cuenta con una longitud de 20 mm. El anillo se encuentra insertado de manera concéntrica en un cilindro hueco de radio exterior 160 mm, radio interior de 140 mm y con una longitud de 63 mm. Esto tiene por objetivo que el anillo actúe de igual forma como una parte de la góndola y por tanto se encuentre estática respecto los demás componentes de la transmisión. El anillo está ubicado en el interior a 13 mm desde la cara frontal del cilindro paralelo a la longitud. El elemento se puede apreciar en su complejidad en la figura 19.



**Figura 19: Modelo 3D del engranaje anillo del sistema planetario (Fuente: elaboración propia).**

Para unir el cilindro con el resto de la góndola se diseña una conexión tipo tarugo. De manera que exista un macho y una hembra. La unión macho cuenta con 5.5 mm de diámetro y un largo de 9.5 mm, además presenta un chaflán de 1 mm en su extremo. Mientras que la unión hembra cuenta con 6 mm de diámetro y un largo de 10 mm. La diferencia en las dimensiones, que aparentemente debiesen ser iguales, tiene razón en que se impone que exista una tolerancia entre las partes impresas en 3D con tal de asegurar que la unión sea eficaz. Las uniones se encuentran ubicadas alrededor del cilindro, en el espesor de este, paralelos a la longitud como se puede observar claramente en la figura 20.



**Figura 20: Detalle de las uniones tipo tarugo (Fuente: elaboración propia).**

Respecto a la distribución de las uniones, se realiza un patrón circular con 6 bocetos. De los cuales se extruyen al menos 3 dibujos para que se alineen correctamente las piezas, pero cuya cantidad y ubicación dependen de la forma del elemento a unir. En el caso particular del anillo planetario se consideran 5 uniones hembra y 3 uniones macho como se observa en la figura 19. Como tal, las uniones no son iguales en el resto de los elementos que componen la góndola y se explican a medida que se hable del componente en cuestión.

El sol del sistema planetario es modelado a partir de una plantilla de un engranaje recto que cuenta con 24 dientes, un diámetro primitivo de 48 mm y cuenta con una longitud de 20 mm. Con el fin de instalar un pasador, el cual busca poder fijar la pieza al eje y que pueda ser intercambiable, se añade una sección cilíndrica desde una de las caras del engranaje. Esta cuenta con un largo de 20 cm, con un primer diámetro de 22 mm en los primeros 3 mm desde la cara y un segundo diámetro de 16 mm para el resto del cilindro. Esta reducción tiene como fin disminuir los esfuerzos en la zona de transición del engranaje al cilindro, ya que el plástico al ser frágil puede quebrarse fácilmente. Además, las transiciones entre las diferentes secciones del engranaje se suavizan por medio de empalmes y chaflanes. Para ubicar el pasador se añade un agujero de 4 mm que atraviesa transversalmente al cilindro por su eje y tiene su centro a 10 mm desde la cara del engranaje. Por último, al elemento completo se le realiza una abertura en su centro de 8 mm para poder montarse sobre el primer eje medio de la transmisión como se observa en la figura 21.



**Figura 21: Modelo 3D del engranaje sol del sistema planetario (Fuente: elaboración propia).**

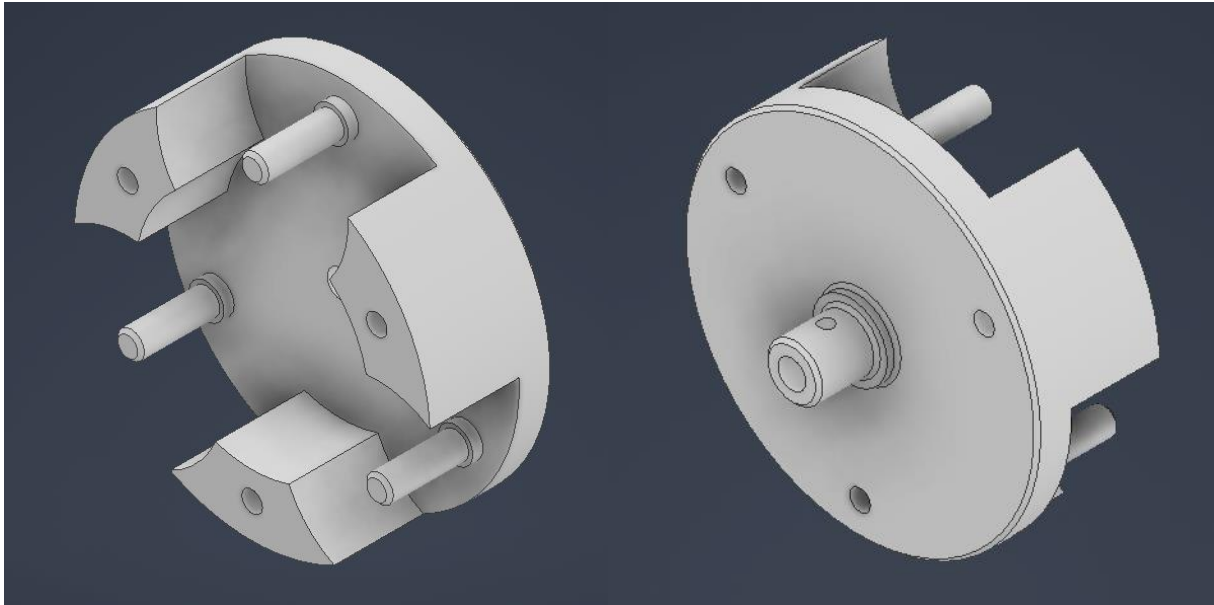
Los planetas del sistema son modelados, de igual forma, a partir de una plantilla de engranajes rectos, con 18 dientes, 36 mm de diámetro primitivo y cuenta con una longitud de 20 mm. Estos van montados sobre el porta-planetas, que rota alrededor del eje de baja velocidad, por lo que su rotación debe idealmente ser libre. Es por esta razón que se deben instalar rodamientos en esta pieza. Como consecuencia, se realizan dos aberturas de 22 mm de diámetro y 7 mm de profundidad en las dos caras del engranaje para ubicar los descansos 608. Además se realiza un agujero de 19 mm de diámetro por el centro, que atraviese la totalidad de la pieza, con tal de generar un resalte para soportar a los rodamientos de manera axial y permita atravesar el eje del porta-planetas como se aprecia en la figura 22.



**Figura 22: Modelo 3D de engranaje planeta del sistema planetario (Fuente: elaboración propia).**

El porta-planetas consta de dos partes para poder ser ensamblado, las cuales son un cuerpo principal unido al eje de baja velocidad y una tapa que fija los planetas en su lugar.

El cuerpo del porta-planetas se forma a partir de un cilindro de 104 mm de diámetro y 36 mm de longitud. Por el centro de la cara frontal del cilindro, se realiza una abertura de 68 mm y 26 mm de profundidad, lo suficiente para que el engranaje sol pueda rotar libre. Por otro lado, a 42 mm del centro se realizan tres aberturas equidistantes en 120 grados, de 56 mm de diámetro y 26 mm de profundidad para que los engranajes planeta roten, de igual forma, libremente. En estos últimos espacios se ubican los ejes sobre los cuales van montados los engranajes planeta, estos poseen 8 mm de diámetro y 26 mm de largo. Cuentan también los ejes con un resalte de 10 mm de diámetro y 3 mm de longitud, para que los descansos se apoyen axialmente por su rebaje. En una rotación de 180 grados respecto a la ubicación de los ejes, se realizan tres aberturas de 6 mm de diámetro para instalar pernos que sujeten en posición la tapa del porta-planetas y por tanto, los planetas. Respecto a la unión del elemento al eje de baja velocidad, se realiza exactamente la misma conexión por medio de un pasador que se describe en el sol del sistema planetario en la zona posterior del cilindro. Esta descripción se aprecia claramente en la figura 23.



**Figura 23: Modelo 3D del cuerpo del porta-planetas del sistema planetario (Fuente: elaboración propia)**

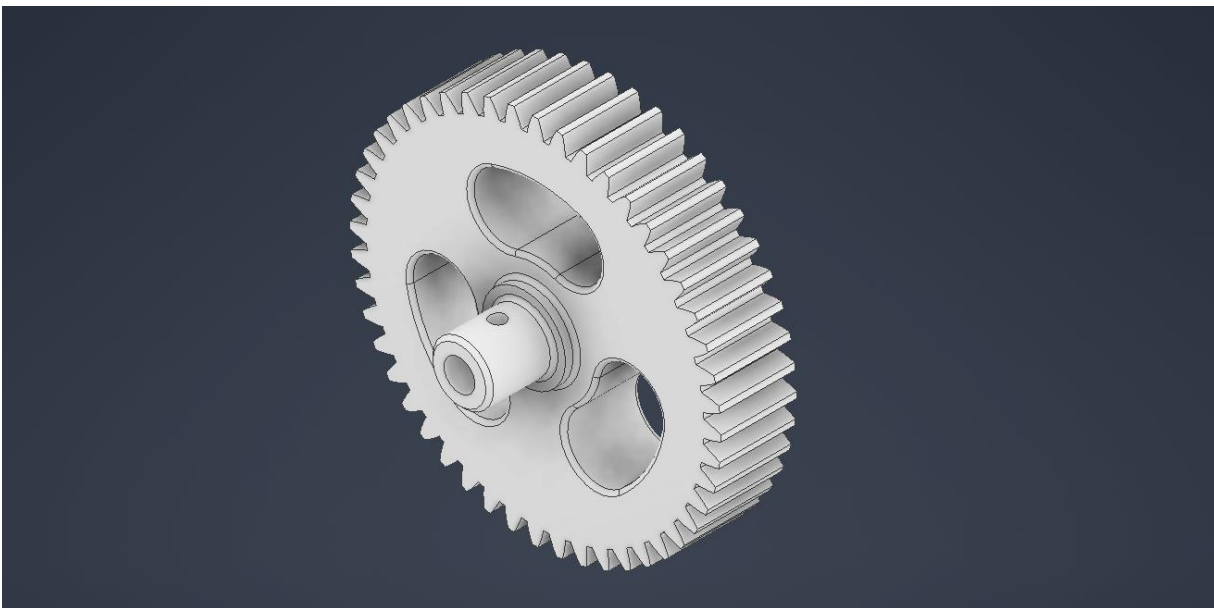
La tapa del porta-planetas está compuesta, de forma similar, por un cilindro de 104 mm de diámetro y 10 mm de longitud. A este se le realiza una abertura en el centro de 68 mm de diámetro para que el engranaje sol pueda ubicarse cómodamente. Se realizan otras 3 aberturas alrededor para ubicar los pernos, de igual forma que se hizo en el cuerpo del porta-planetas. En la posición donde se quieren encajar los ejes de los engranajes planeta se ubican resaltes, hechos con cilindros huecos de diámetro exterior 10 mm y diámetro interior 8 mm, con tal de que actúen como soportes para los rodamientos. Los detalles de la pieza se pueden apreciar en la figura 24. Con lo cual se finaliza la primera etapa correspondiente a los engranajes planetarios.



**Figura 24: Modelo 3D de la tapa del porta-planetas del sistema planetario (Fuente: elaboración propia).**

Para las dos etapas siguientes, como se mencionó anteriormente se utilizan engranajes rectos idénticos, por lo que solo se requiere el diseño de dos piezas específicas. Las cuales corresponden al engranaje pequeño y grande o conducido y conductor respectivamente en una etapa paralela.

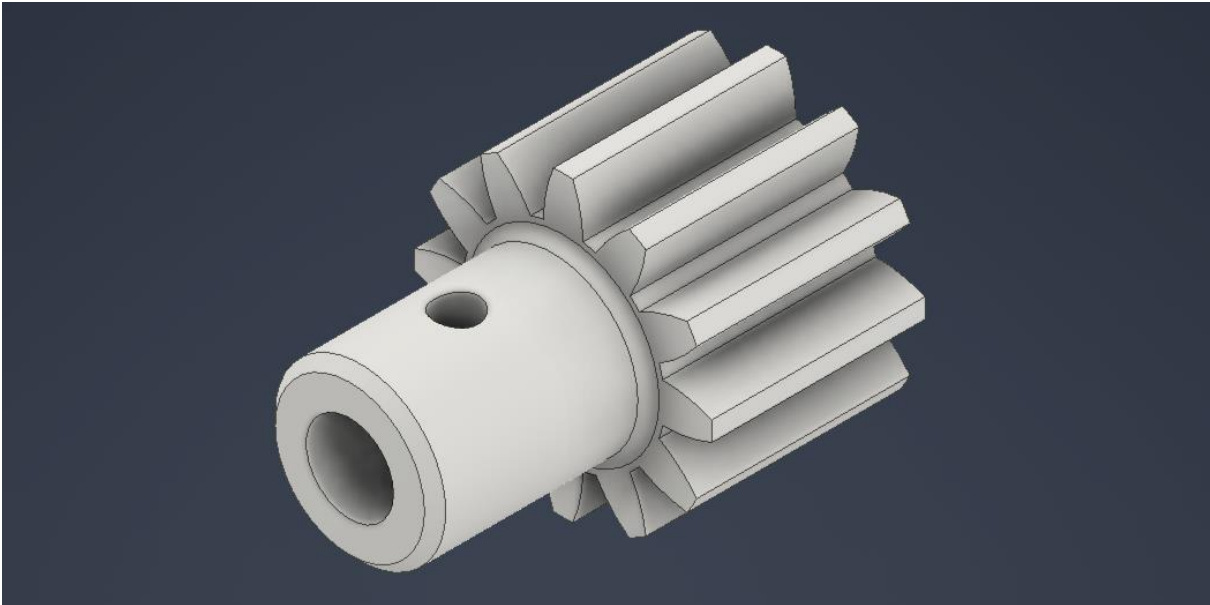
El engranaje conductor se modela a partir de una plantilla de engranajes rectos, la cual cuenta con 48 dientes y un diámetro primitivo de 96 mm. Para la conexión con el eje medio se vuelve a realizar el procedimiento descrito para el engranaje sol, utilizando un pasador. Por otro lado, este resulta el engranaje de mayor diámetro por lo que para disminuir el gasto de material se añaden 3 aberturas. Estas son hechas con la herramienta de creación de ranuras de Inventor. A partir del centro del engranaje, un radio igual 25 mm, un ángulo de barrido igual a 40 grados y un diámetro de los extremos de la ranura igual a 19 mm. Para suavizar los extremos de las aberturas se generan empalmes de 1 mm. El diseño de este elemento se puede apreciar en la figura 25.



**Figura 25: Engranaje conductor de la etapa paralela (Fuente: elaboración propia).**

Para el engranaje conducido, se utiliza una plantilla como modelo base, la cual cuenta con 12 dientes y 24 mm de diámetro primitivo. De forma similar que el resto de los engranajes ya descritos, para la conexión con el eje medio se utiliza el mismo sistema empleado para el engranaje sol. Esta pieza no presenta otros tipos de modificaciones por su reducido tamaño y se puede apreciar con claridad en la figura 26.

De esta manera se completa la transmisión del aerogenerador. Se distingue por los elementos descritos que hacen falta los ejes del sistema, los cuales son descritos y diseñados en el siguiente apartado.

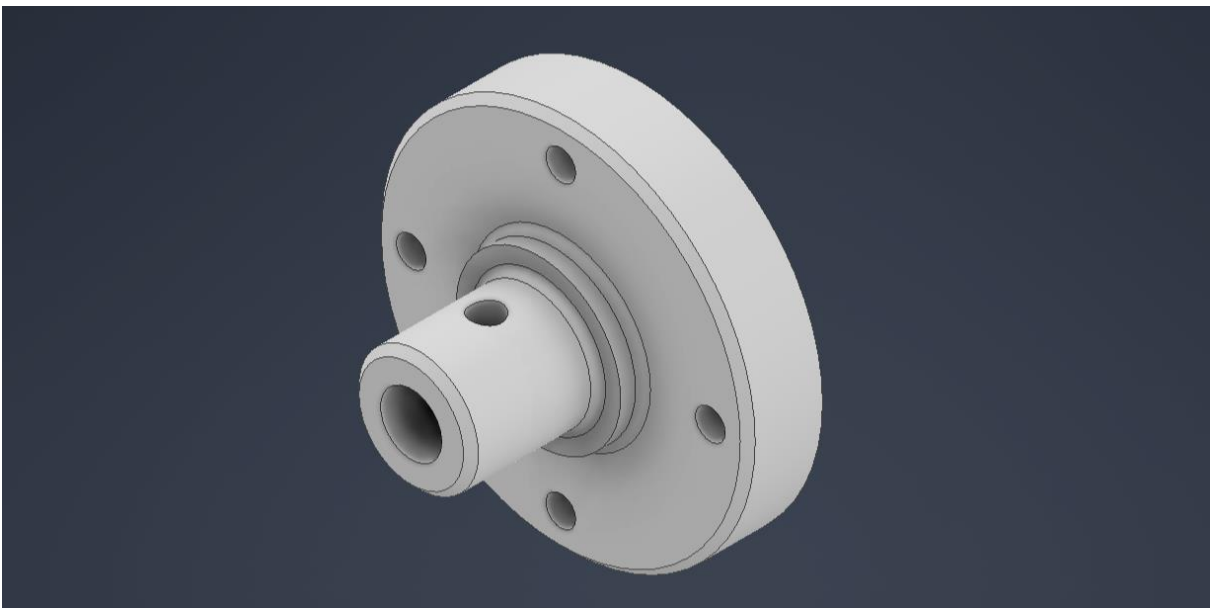


**Figura 26: Engranaje conducido de la etapa paralela (Fuente: elaboración propia).**

### **3.3 Modelo 3D de la cupla para el elemento de salida**

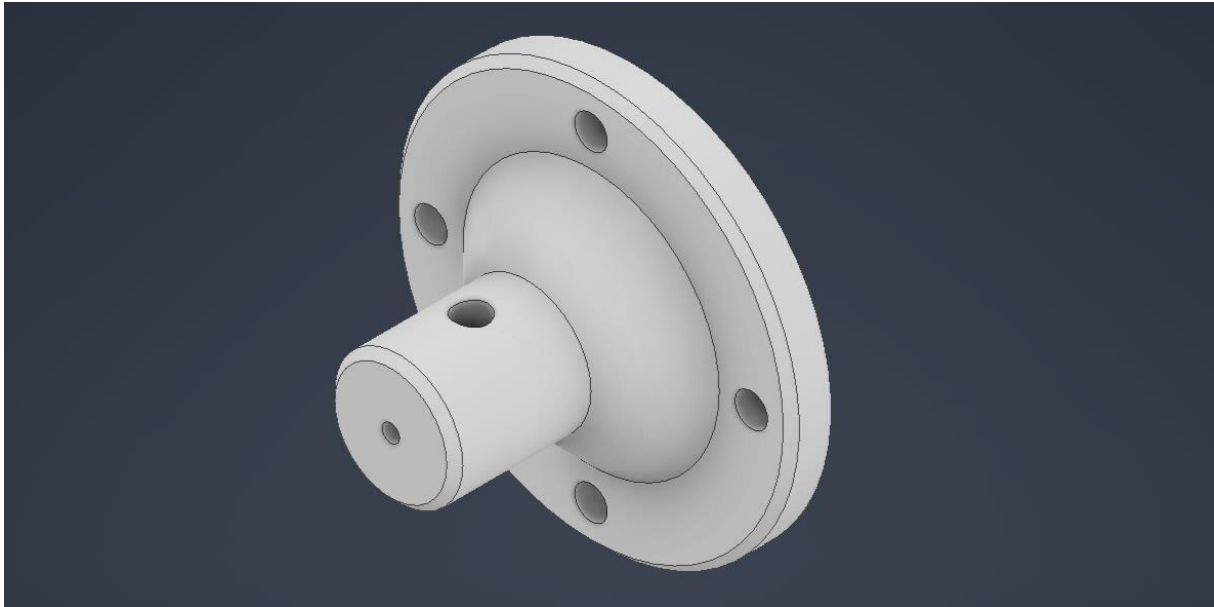
La cupla que se propone para en el diseño consiste en dos bridas adaptadas específicamente para el eje de alta velocidad y para el eje del generador al que se une.

La primera brida de las mencionadas consiste en un disco de 50 mm de diámetro y 10 mm de espesor, al cual se le realizan 4 orificios alrededor a 20 mm del eje de 4 mm de diámetro cada uno. Se hace la conexión al eje de la misma forma descrita para los engranajes, lo que se ve en la figura 27.



**Figura 27: Modelo 3D de la cupla del eje de alta velocidad (Fuente: elaboración propia).**

La segunda brida corresponde a la unión al eje del generador, para ello se comienza de un disco de 50 mm de diámetro y 5 mm de espesor. Se realizan 4 orificios iguales en forma y posición a los de la brida anterior. La conexión al eje es un ligeramente distinta, la longitud del cilindro extruido es mayor, de 25 mm, y el orificio posee un diámetro de 2 mm a lo largo de 14 mm desde el extremo frontal, mientras que en el lado contrario, el orificio es de 8 mm por los restantes 16 mm para dejar pasar parte del eje de alta velocidad. Además, se realizan chaflanes en extremos que pueden ser concentradores de esfuerzos como la unión del cilindro y el disco, el cual tiene una distancia de 8 mm, mientras que solo 1 mm de extensión para las esquinas en los otros casos. Su modelo se distingue en la figura 28.



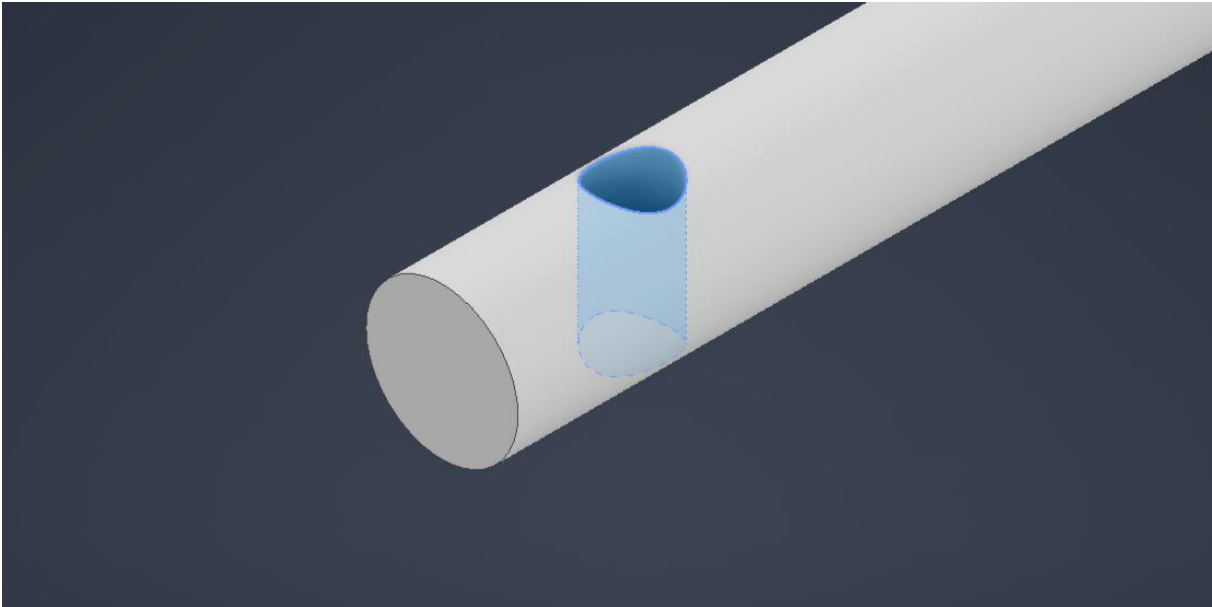
**Figura 28: Modelo 3D de la cupla del eje del generador (Fuente: elaboración propia).**

Ambas bridas son sujetadas entre sí por medio de pernos por los orificios realizados en el disco y a los elementos de unión respectivos a través de los agujeros transversales que se muestran en las imágenes. En el caso del eje del generador se evalúa el uso de adhesivos para mejorar la fijación.

### **3.4 Diseño de los ejes del aerogenerador**

El proceso de modelado de todos los ejes es similar, ya que constan simplemente de un corte en la barra de acero para determinar su largo y orificios para fijar por medio de pasadores los demás elementos mecánicos. El detalle completo de los planos se encuentra en el anexo B.

Comenzando por el eje de baja velocidad, este presenta un largo de 250 mm, convirtiéndose en el más largo de los ejes, esto debido a que se desea que el rotor no se vea afectado por el funcionamiento de otros elementos cercanos, creando irregularidades en el fluido, por lo que se ubica lo más lejos posible. También se realizan dos orificios de 4 mm que atraviesan el diámetro a 10 mm y 30 mm desde cada uno de sus extremos para ubicar el rotor y el porta-planetas respectivamente. Este diseño por medio de la perforación de orificios es recurrente en el proyecto y se muestra con mayor detalle en la figura 29. Además se tienen que ubicar descansos a 74 mm y 35 mm desde cada extremo.



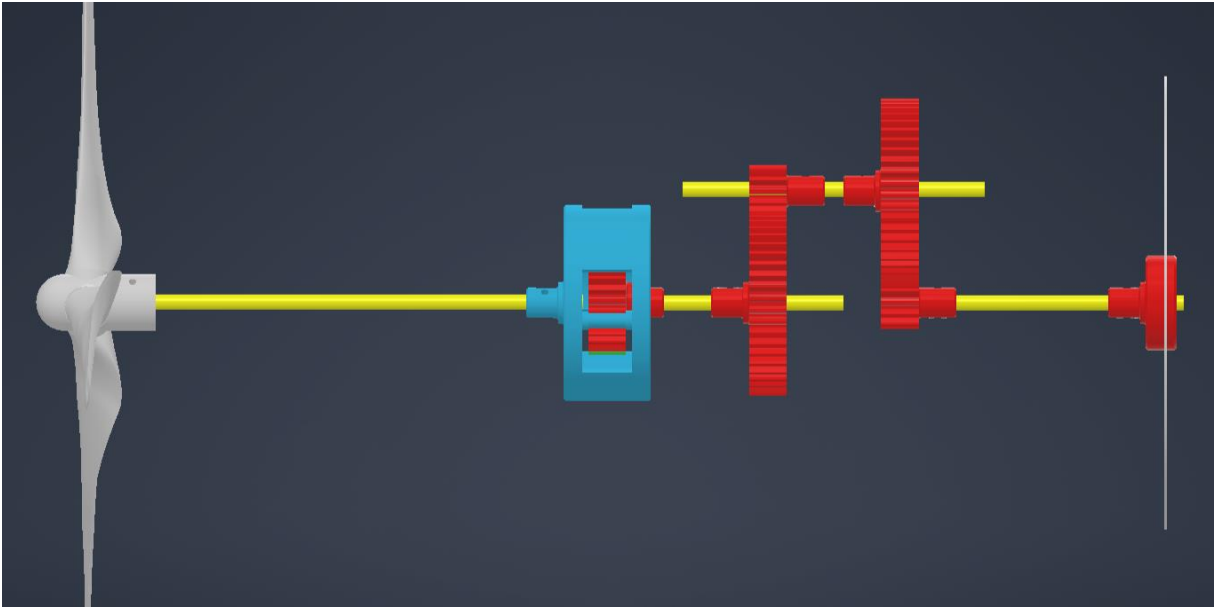
**Figura 29: Orificio perforado en un extremo de los ejes (Fuente: elaboración propia).**

El primer eje medio presenta un largo de 135 mm, y dos orificios de 4 mm a 60 mm y 30 mm desde cada uno de sus extremos, para conectar el engranaje sol de la etapa planetaria y el engranaje conductor de la primera etapa paralela respectivamente. Además se deben ubicar descansos a 40 mm y 0 mm desde cada extremo.

El segundo eje medio presenta un largo de 160 mm y dos orificios de 4 mm a 65 mm cada uno desde los extremos, para conectar el engranaje conducido de la primera etapa paralela y el engranaje conductor de la segunda etapa paralela respectivamente. Además se deben ubicar descansos a 0 mm desde cada extremo.

El eje de alta velocidad presenta un largo de 160 mm y dos orificios de 4 mm a 30 mm cada uno desde los extremos, para conectar el engranaje conducido de la segunda etapa paralela y la brida que sostiene el disco de frenado respectivamente. Además se deben ubicar descansos a 60 mm desde cada extremo.

El sistema de transmisión montado se puede apreciar en la figura 30, donde se destacan de color amarillo los diferentes ejes. El largo de los otros ejes se justifica en cuanto se logran imaginar los apoyos descansando en las secciones de los ejes que quedan libres. De los otros elementos del aerogenerador se destacan en gris el rotor, en azul el porta-planetas y en rojo los engranajes.



**Figura 30: Modelo 3D de la transmisión del aerogenerador (Fuente: elaboración propia).**

Sobre los ejes quedan pendiente las reducciones, que son elementos esenciales, ya fijan partes en su lugar, bloquean el movimiento axial e impiden que se produzcan desalineamientos en esta dirección. Idealmente estos debiesen ser maquinados a partir del mismo bloque sólido del eje, sin embargo, debido al pequeño diámetro de la reducción, esta tarea resulta difícil de realizar en el taller de la universidad con las herramientas disponibles, por lo que se buscan alternativas. Se opta en su lugar por utilizar cinta, de tal forma que al enrollarla alrededor del eje, en donde es prioridad una reducción, se produzca un espesor de al menos 2 mm para coincidir con el resalta interno de los rodamientos. El detalle del proceso se observa en el apartado de ensamblaje del aerogenerador.

### **3.5 Diseño y modelo 3D de la góndola**

Si bien, ya se tiene modelado el esqueleto del sistema, este no puede existir por sí solo, porque necesita de una estructura en la cual ser apoyado, para esto se diseña la góndola. Debe ser diseñada de tal forma para facilitar su montaje cuando se desee ensamblar, para lo cual es necesario tomar en cuenta la forma de los ejes, reducciones, tamaño de los engranajes, etc.

Se propone que la góndola posea 7 partes, entre las que se incluye el anillo planetario. Considerando que 3 de estas serán iguales, quedan por diseñar 4 elementos. En la figura 31 se muestra un esquema general de las piezas.

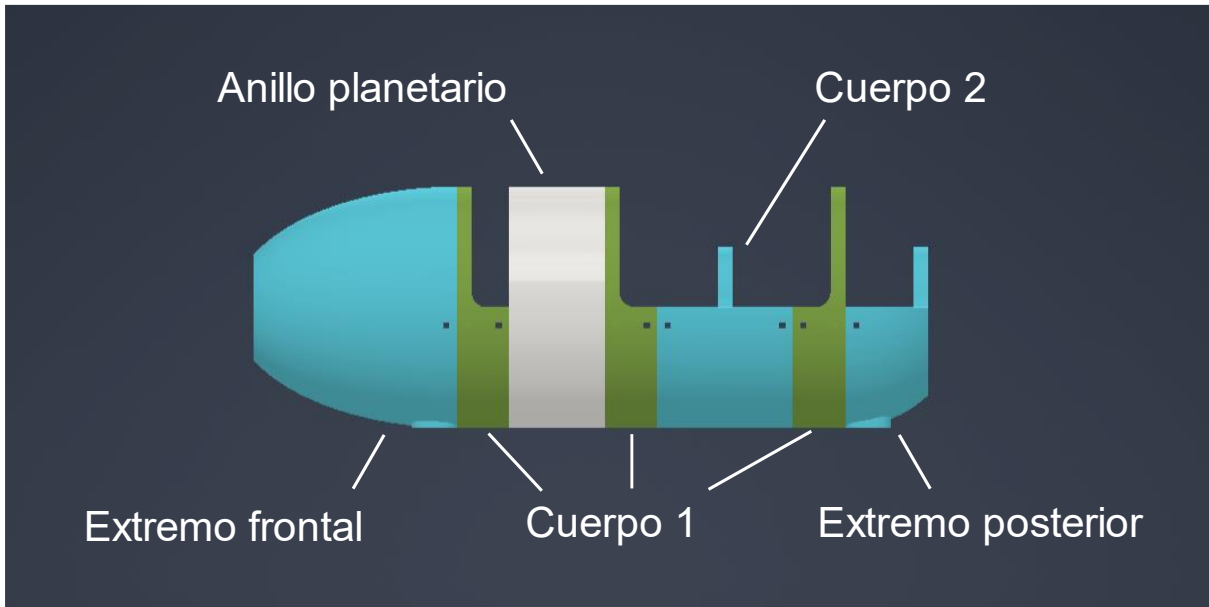


Figura 31: Esquema de las partes de la góndola (Fuente: elaboración propia).

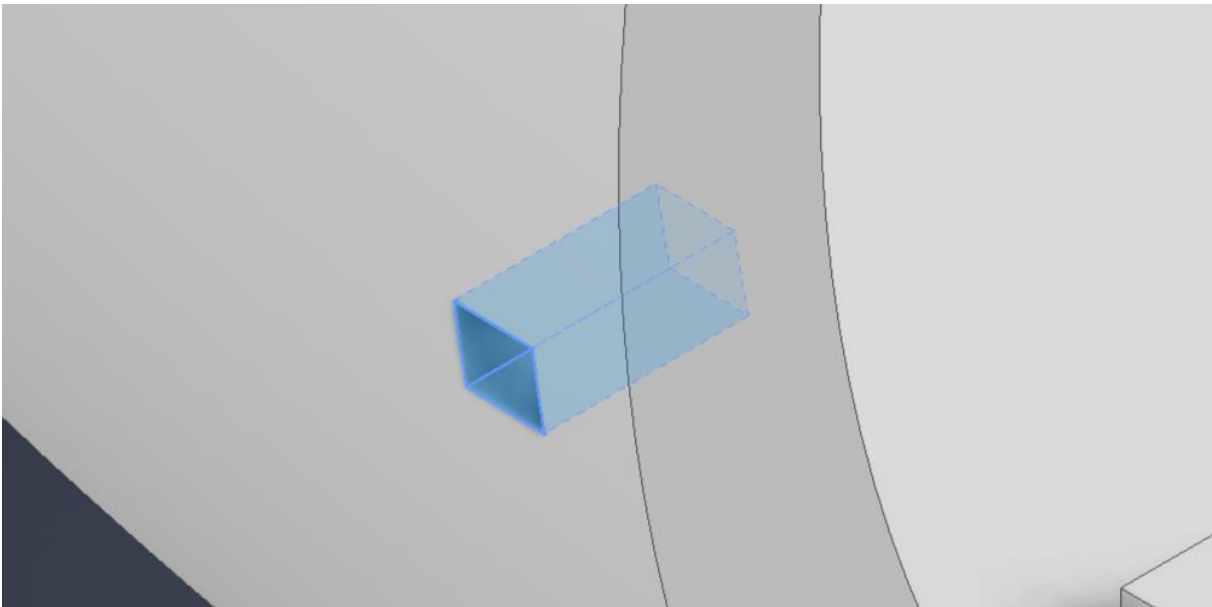
Comenzando de izquierda a derecha, se tiene primero el extremo frontal. Este tiene como fin soportar en un extremo el eje de baja velocidad, por lo que es necesario un espacio para ubicar un descanso. Es encargado además de proteger de la influencia del viento a los elementos que se encuentran posteriores, es debido a esto que se muestra con una forma ovalada y resaltado de azul en la figura 31. También es el lugar donde se desea conectar la base que le dará elevación al aerogenerador para poder ubicarlo en distintos lugares.

La geometría básica del extremo frontal parte de una circunferencia de 160 mm de diámetro exterior, el radio a su vez es utilizado como semieje menor de una elipse en un plano perpendicular. cuyo semieje mayor es de 150 mm. Sin embargo, como se puede apreciar en la figura 32, este se encuentra truncado a los 135 mm del eje menor. Se le dibuja un espesor de 1 mm a la elipse y se realiza una revolución en 360 grados para generar la superficie. En este espacio generado debido al extremo truncado se realiza una abertura de 19 mm de diámetro que atraviesa por el centro, junto con otra concéntrica de 22 mm, pero que solo tiene una profundidad de 7 mm, esto con el fin de ubicar un rodamiento y que repose axialmente sobre un resalte que impida su desplazamiento. En la zona inferior de la elipse se realiza la conexión con los soportes, estas consisten en un rectángulo de ancho 50 mm y largo 20 mm, al cual se le realiza una abertura de igual manera rectangular, por su centro, de ancho 20 mm y lado 10 mm, todo se extruye hacia el interior del objeto 30 mm y los bordes son suavizados por un empalme de 10 mm de radio. Para alinear el extremo frontal con la siguiente pieza de la góndola se realiza un patrón circular de 6 elementos con la conexión macho de los tarugos descritos en el anillo planetario, sin embargo a la hora de la extrusión se omite un boceto ubicado en la parte superior de la circunferencia, por lo que resultan 5 tarugos.



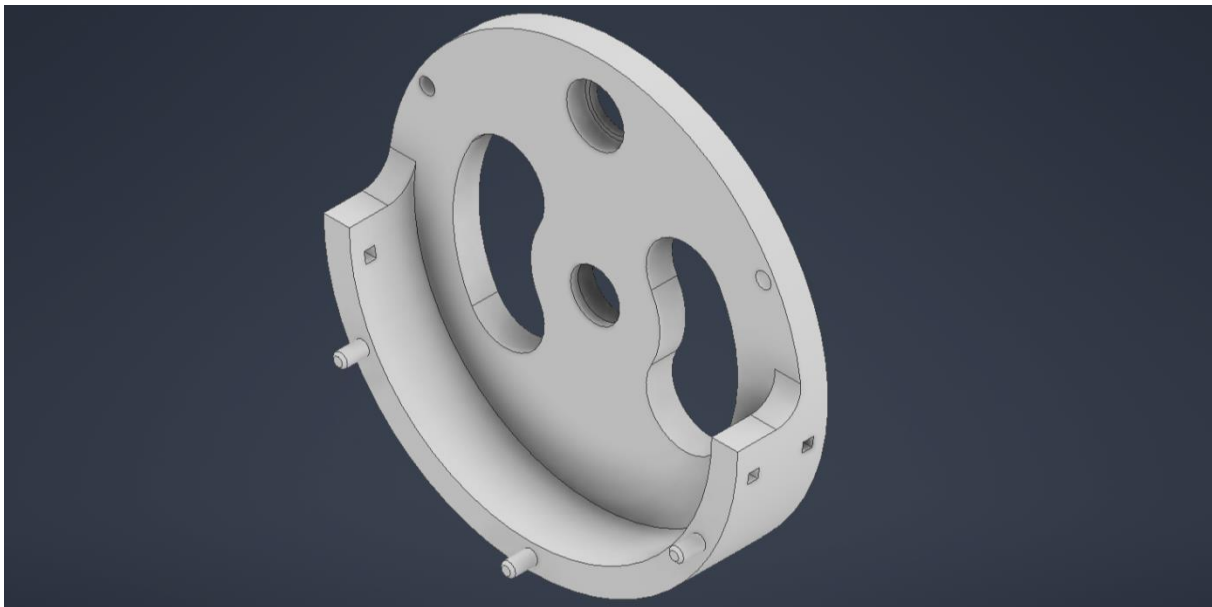
**Figura 32: Modelo 3D del extremo frontal de la góndola (Fuente: elaboración propia).**

Como se busca evitar el uso de adhesivos en la góndola, para que el sistema pueda ser desmontado si lo requiere, se diseña un sistema de clips que sujetan los extremos de las partes en su lugar. El detalle del agujero para insertar los clips en las piezas consta de un agujero cuadrado de lado 4 mm que es extruido en ambos lados del elemento. Este se encuentra 10 mm bajo el eje de revolución y 5 mm desplazado en la dirección negativa del eje para generar un margen. El proceso se repite, al igual que los tarugos, en otras partes de la góndola, por lo que se referencia más adelante. El agujero de los clips en detalle se aprecia mejor en la figura 33. La descripción de los clips se encuentra posterior a las partes de la góndola.



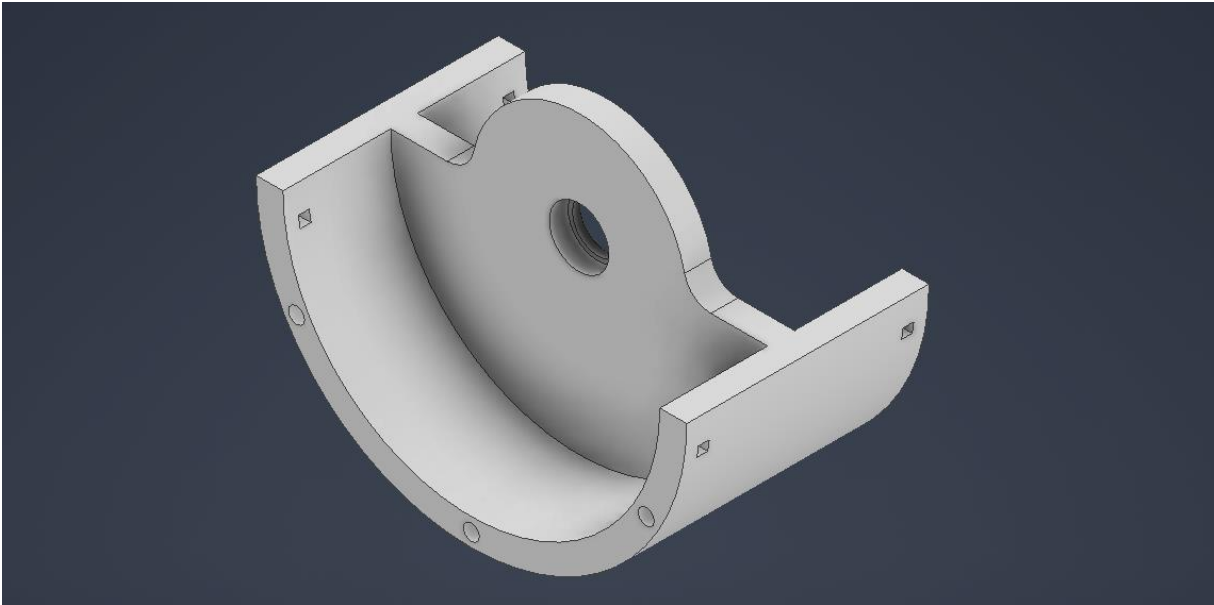
**Figura 33: Agujero para la inserción de clips sujetadores (Fuente: elaboración propia).**

La siguiente parte, resaltada de verde en la figura 31, corresponde al cuerpo 1 de la góndola. Esta tiene la particularidad de que es utilizada 3 veces en el sistema. Para ello se diseña un disco con 160 mm de diámetro exterior y cuenta con un espesor de 10 mm. Se extruye además, una semi circunferencia de espesor 1 mm y altura 25 mm desde una de las caras del disco. En el disco se realizan 5 agujeros para las conexiones de tarugos siguiendo los patrones descritos anteriormente, de la misma forma, en el extremo contrario, es decir, en el espesor de la semi circunferencia se añaden 3 conexiones macho de tarugo. En los costados se añaden orificios para insertar los clips en ambos extremos y en ambos lados, dando un total de 4. En el centro del disco y también 60 mm más arriba se realizan dos huecos para montar los descansos del tipo ya conocido. Para disminuir el uso de material que se puede dar por la impresión, se agujerea el disco con dos ranuras, con extremos de radio 15 mm, separados por 60 grados los centros de las circunferencias y 40 mm desde el centro. El resultado se observa con mayor claridad en la figura 34.



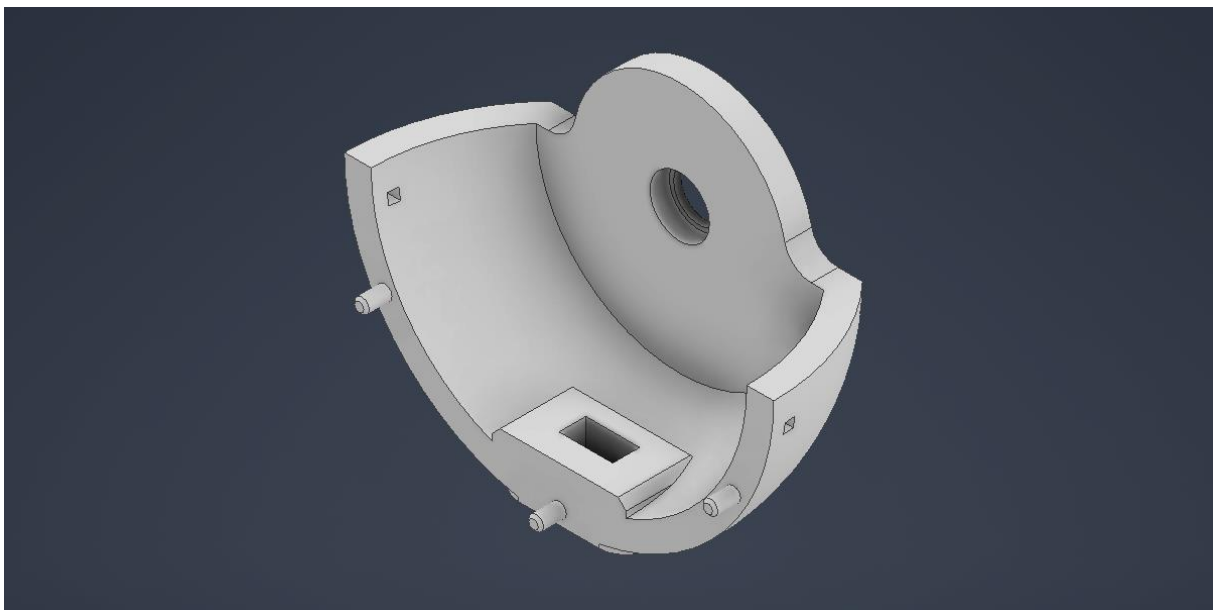
**Figura 34: Modelo 3D del cuerpo 1 de la góndola (Fuente: elaboración propia).**

Continuando, el siguiente elemento de la góndola por diseñar corresponde al cuerpo 2, el cual se distingue de color azul en la figura 31. Este objeto se caracteriza por poseer una semicircunferencia de radio 160 mm, de espesor interno de 10 mm, la cual es extruida 90 mm a lo largo. En ambos extremos de la extrusión, en la zona correspondiente al espesor, se realizan 3 orificios para formar las conexiones hembra para los tarugos. Además, en los costados se añaden 4 orificios para insertar clips sujetadores. En el centro de la circunferencia y en la mitad de la extrusión se forma un disco de 1 mm de espesor y de 40 mm de radio, al cual se le realiza una apertura para instalar un descanso de la forma ya conocida. La unión de ambos cuerpos es por medio de la mitad de un disco de 10 mm de espesor, como ya se estaba manejando, y se suavizan los extremos para disminuir esfuerzos en la zona. En la figura 35 se encuentra el modelo del cuerpo 2.



**Figura 35: Modelo 3D del cuerpo 2 de la góndola (Fuente: elaboración propia).**

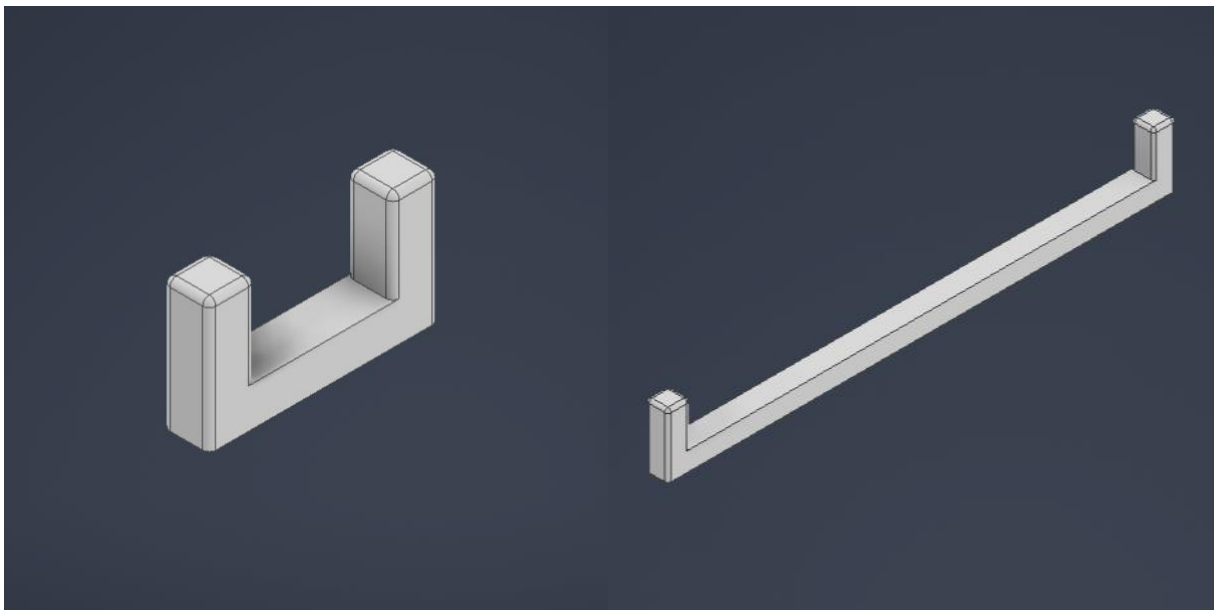
La última pieza de la góndola corresponde al extremo posterior, este se destaca en la figura 31 de color azul y guarda similitudes con el extremo frontal. La diferencia se encuentra en que, en este caso, se utiliza una circunferencia de radio 80 mm para realizar la revolución que genere la superficie necesaria, en vez de una elipse como en la otra parte. También salta a la vista en la figura 36, que la revolución solo completa la mitad de la circunferencia, además de que la semiesfera es truncada a los 55 mm del diámetro exterior. En el plano que se forma por el truncamiento, se genera un disco de radio 40 mm para ubicar la abertura donde descansa un rodamiento.



**Figura 36: Modelo 3D del extremo posterior de la góndola (Fuente: elaboración propia).**

De esta forma, la descripción de las partes principales de la góndola ha sido cubierta, sin embargo quedan por definir los clips sujetadores que se utilizan, ya que se diseñaron de dos tipos, y la base sobre la cual se monta la góndola.

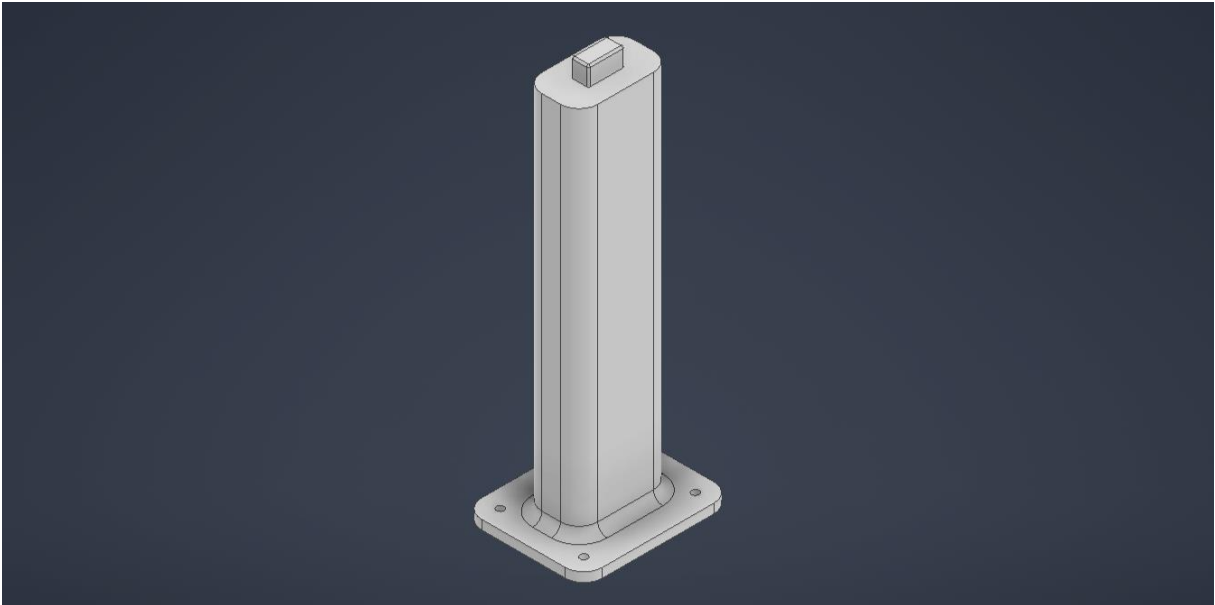
Los clips sujetadores, como ya se mencionó, corresponden a elementos que fijan en su lugar las partes de la góndola. Para ello, se ubican los clips sobre los agujeros que se fueron destinados en el diseño de las piezas. Se utiliza como base para el diseño un rectángulo, la primera y segunda variante de los clips poseen 18 mm y 80 mm de largo respectivamente, y su ancho y altura son de 3.5 mm y 3 mm en ambos casos. En los extremos sobre la vista superior se extruyen 7 mm dos cuadrados de lado 3.5 mm, luego se suavizan los extremos con la herramienta de empalme para permitir que los clips entren con mayor facilidad. Las variedades de clips se pueden comprender a través de la figura 37.



**Figura 37: Modelo 3D de los clips sujetadores (Fuente: elaboración propia).**

El último elemento por revisar corresponde a la base, la cual soporta la góndola como ya se mencionó, esta se adhiere por medio de adhesivos a los extremos laterales del sistema y se atornilla sobre una superficie sólida para otorgar rigidez, como puede ser madera.

La base comienza desde un rectángulo de 50 mm de ancho por 30 mm de largo, el cual es extruido 200 mm y en sus extremos se realizan empalmes de 10 mm de radio para suavizar las esquinas y reducir la influencia del viento. En el extremo superior del paralelepípedo realiza el anclaje que permitirá la unión con la góndola, este consiste en otro rectángulo de 20 mm por 10 mm de ancho y largo respectivamente, se realizan empalmes de 1 mm de radio para suavizar las esquinas y que entre más fácilmente en la unión. En el extremo inferior, se extruye un rectángulo de 80 mm por 65 mm, para crear una superficie de 10 mm de altura en la cual ubicar pernos sujetadores. Para esto último, sobre la superficie del extremo inferior, se crean 4 orificios de 4 mm de diámetro cada uno. Lo cual se aprecia con mayor nitidez en la figura 38.



**Figura 38: Modelo 3D de la base de la góndola (Fuente: elaboración propia).**

Una vez revisadas las descripciones de los elementos modelados en 3D, estos archivos se encuentran listos para ser fabricados por medio de impresión en cuanto se exporten en el formato deseado.

## CAPÍTULO 4: Fabricación del prototipo

Con tal de materializar los modelos realizados en el capítulo anterior, se fabrica un prototipo por medio de impresión 3D con tal de detectar posibles puntos de mejora para el diseño relacionados con el montaje.

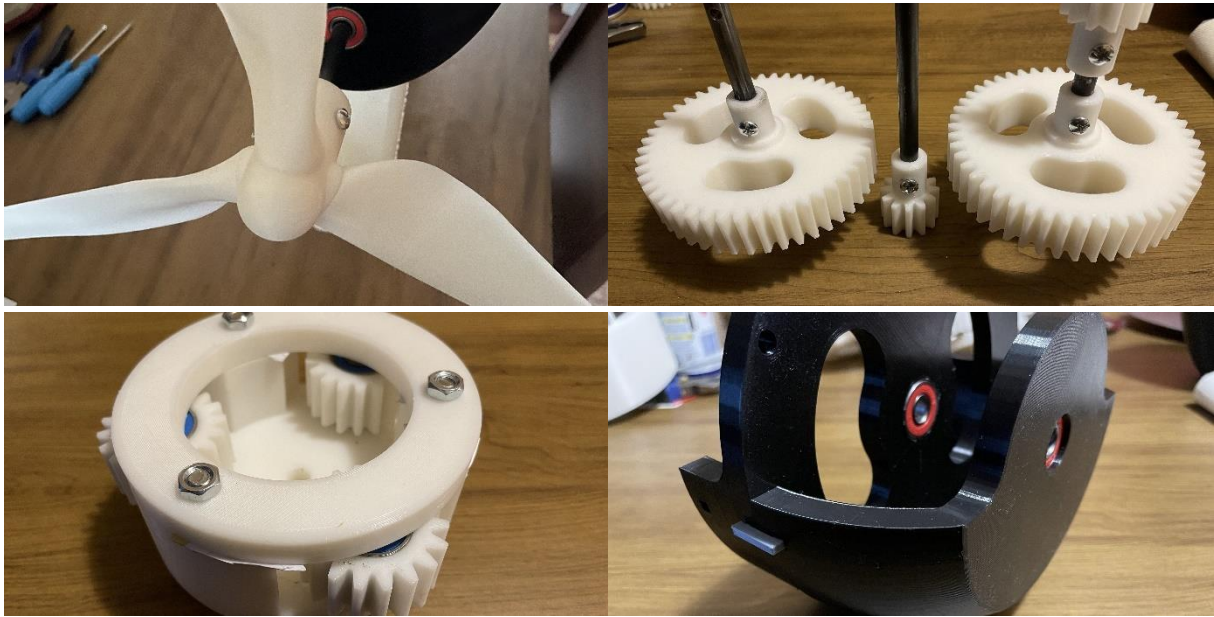
### 4.1 Fabricación de las piezas

Para la fabricación se adquiere 1 kg del filamento Creality Hyper PLA. El cual es llevado al laboratorio de fabricación digital de la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad de Concepción, en donde se disponen de las impresoras 3D para llevar a cabo el proyecto. Como ya se consideró, se utiliza una impresora Creality Ender 3 V-2. Las piezas son impresas de manera estándar, utilizando la laminadora Ultimaker Cura, es decir con un 20% de densidad, patrón cúbico de relleno y espesor de pared de 1.2 mm, a excepción de las aspas del aerogenerador, las cuales son impresas con patrón Gyroid, un espesor de pared de 5 diámetros del extrusor y un refuerzo rectangular en el interior de su base para disminuir la concentración de esfuerzos.

**Tabla 12: Listado de elementos fabricados por medio de impresión 3D.**

Elemento	Cantidad
Rotor	
Aspas	3
Cabezal	1
Transmisión	
Engranaje anillo	1
Engranaje conducido	2
Engranaje conductor	2
Engranaje planeta	3
Engranaje sol	1
Porta planetas	1
Porta planetas (tapa)	1
Cupla	
Brida del eje	1
Brida del generador	1
Góndola	
Base	2
Clip 18 mm	8
Clip 80 mm	2
Cuerpo 1	3
Cuerpo 2	1
Extremo frontal	1
Extremo posterior	1

En la tabla 12 se enlistan los elementos que fueron impresos y sus cantidades. Debido al volumen y cantidad de elementos, la impresión de estos se lleva a cabo en alrededor de 2 semanas. El tiempo es además producto de que ocurrió un pequeño altercado, se imprimieron algunas partes con otro tipo de PLA, por lo que tuvieron que ser reimpresas. Sin embargo, una vez con las piezas en mano, presentan una buena calidad de impresión y son utilizadas para el prototipo. En la figura 39 se aprecian algunos componentes hechos con Hyper PLA.

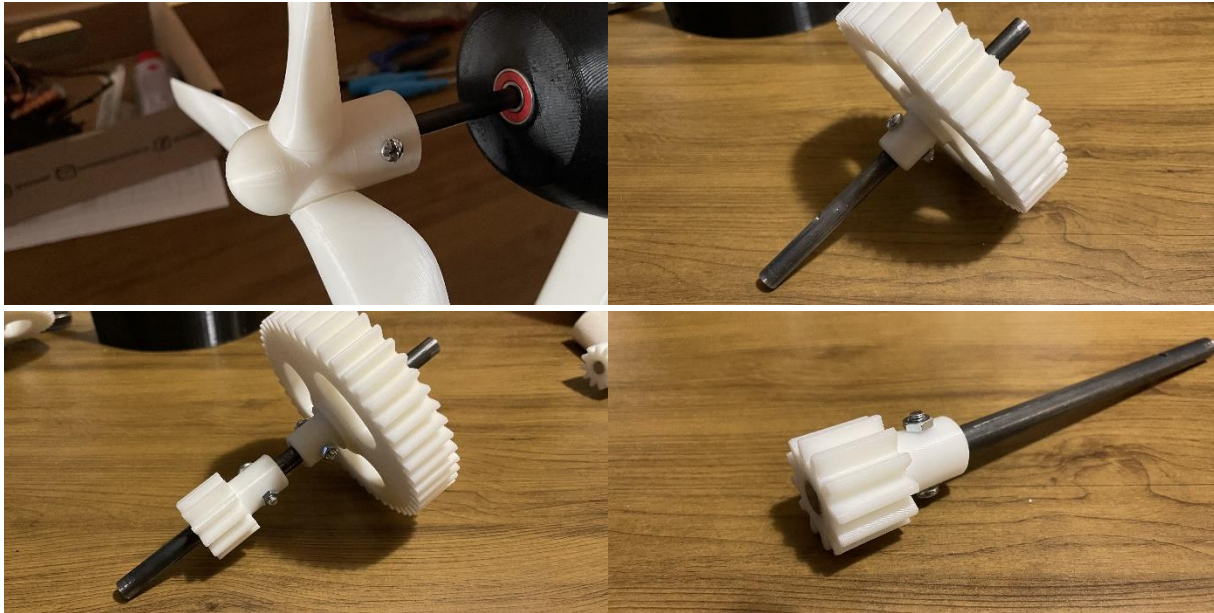


**Figura 39: Piezas fabricadas por impresión 3D (Fuente: elaboración propia).**

Estos elementos son luego probados para realizar su ensamblaje y garantizar un buen servicio, para lo cual se retira el exceso de material producto de los apoyos que pudieron ser necesarios en la impresión. Además, existen instancias donde pese a las tolerancias dadas, el ajuste de las uniones es muy apretado, por lo que se lijan los puntos de conflicto como lo son, por ejemplo, los tarugos de los elementos de la góndola, que resultaron muy anchos.

#### **4.2 Fabricación de los ejes de la transmisión**

Los planos de fabricación de los 4 ejes de la transmisión, que se encuentran en los anexos, son enviados al taller mecánico de la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad de Concepción, donde se disponen de las máquinas necesarias para poder realizar el maquinado de los ejes. Para ello se adquiere una barra de acero galvanizado liso SAE 1010 de 8 mm, con el objeto de ser trabajada. Los ejes son fabricados sin inconvenientes en un plazo de una semana desde la recepción de los planos finales. En la figura 40 se observan los ejes con algunos elementos montados para su diferenciación posterior al maquinado.



**Figura 40: Ejes de rotación del aerogenerador (Fuente: elaboración propia)**

Los ejes son parte esencial para el funcionamiento, y su ensamblaje con los diferentes elementos mecánicos está hecho por medio de pasadores, los cuales se revisan a continuación.

#### 4.3 Pernos, tuercas y rodamientos

Idealmente para bloquear el movimiento de las piezas se debiesen utilizar pasadores comunes, sin embargo se acuerda utilizar pernos roscados debido a su disponibilidad y porque además se espera que las cargas no generen un efecto notable sobre las mismas. De igual forma estos son requeridos en otros lugares en los que han sido descritos como parte del diseño, por ejemplo la cupla del generador o el porta-planetas. De acuerdo con los modelos se utilizan únicamente pernos M4 y M6, junto con sus respectivas tuercas. A continuación se presenta una tabla que enlista los distintos tipos utilizados en el proyecto.

**Tabla 13: Listado de pernos y tuercas.**

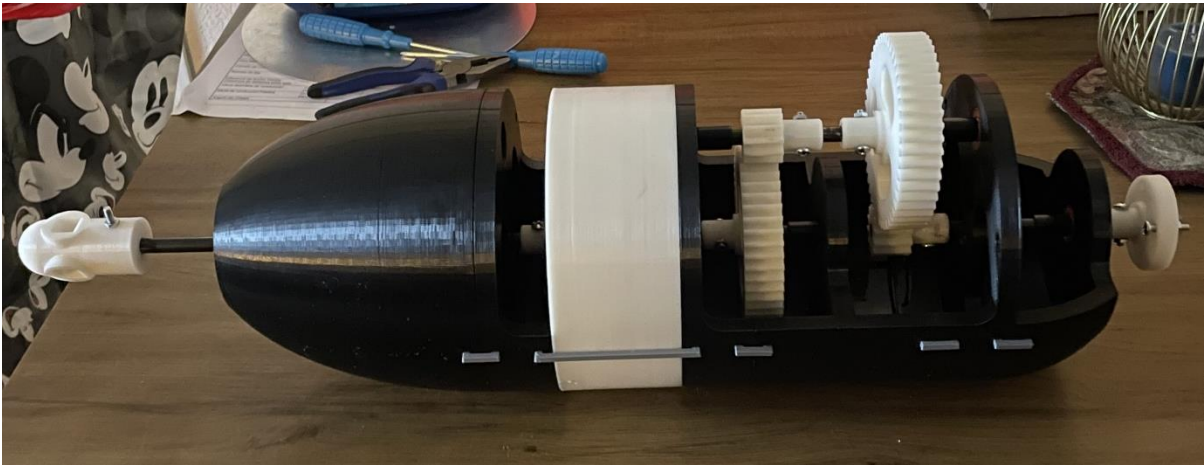
Designación	Cantidad
M4x20	10
M4x40	1
M6x50	3

Además, conocidos los modelos hechos para el aerogenerador, es posible determinar la cantidad de rodamientos que se utilizan en el sistema, teniendo en cuenta que estos son todos iguales. El número total que se percibe en este caso es de 14, dos por cada eje y 2 en cada engranaje planeta que es utilizado en la transmisión.

#### 4.4 Montaje del prototipo

El ensamblaje del aerogenerador puede llegar a resultar un proceso complejo para quien no se encuentra familiarizado con el modelo, ya que existe una gran cantidad de partes involucradas, de diversos tamaños y muy parecidas entre sí. Por lo que, es conveniente elaborar una guía de instrucciones que señalen paso a paso el proceso de armado de la turbina. Este instructivo de montaje se encuentra en los anexos para ser consultado si se requiere.

Se muestra en la figura 41 que a la hora del montaje no surgen inconvenientes catastróficos, salvo que se presenta un ajuste muy apretado para los componentes de los ejes, por lo que se opta por lijar estos últimos para disminuir minúsculamente el diámetro y permitir un montaje más suave. También, se quiebran algunos tarugos de la góndola al momento de querer desmontar alguna pieza, sin embargo, el hecho no impide que se puedan montar y mantener en su lugar las dos partes que deben ir juntas.



**Figura 41: Aerogenerador parcialmente ensamblado (Fuente: elaboración propia).**

Debido a que el prototipo tiene que poder trasladarse a distintos lugares constantemente durante el desarrollo del proyecto, se mantiene parcialmente montado durante gran parte del tiempo. Esto quiere decir que, no se instalan las palas del aerogenerador, a razón de que son partes demasiado frágiles y valiosas en el sistema y su seguridad se puede comprometer en el traslado. Algo similar ocurre con las patas que pueden resultar contraproducentes para su traslado ya que pueden obstaculizar y generar algún accidente. Respecto al elemento de salida, este se decide instalar solo para las pruebas experimentales como se ve más adelante.

#### 4.5 Pruebas de funcionamiento del prototipo

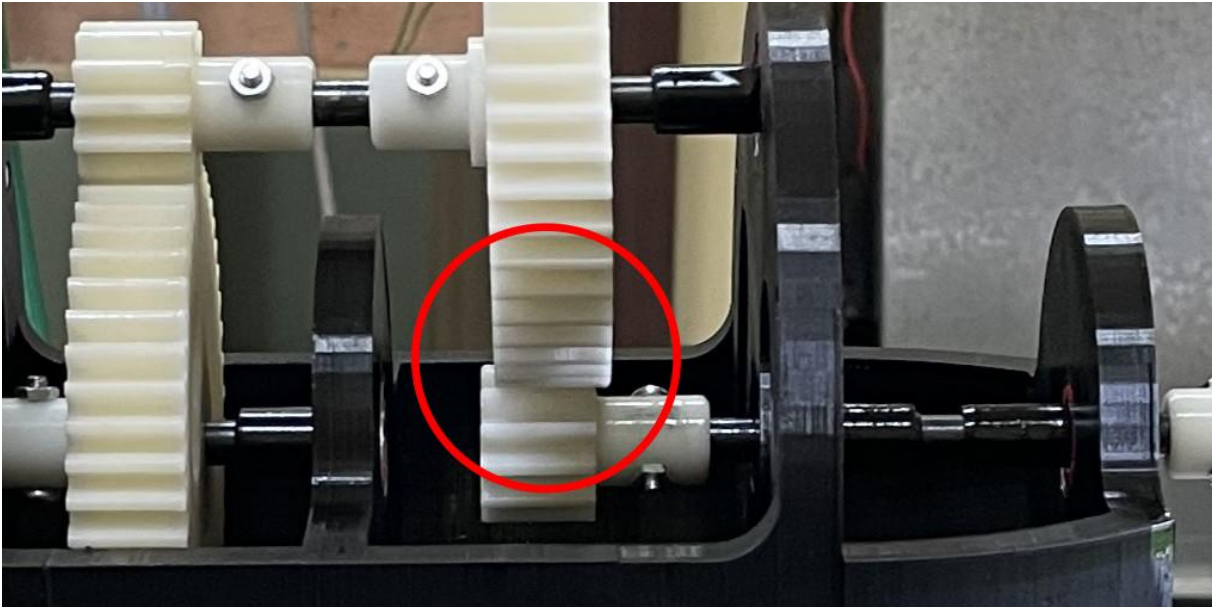
Con el objetivo de que las pruebas posteriores se produzcan en las condiciones más óptimas posibles se realiza un testeo preliminar de su funcionamiento del mecanismo con tal de detectar puntos de mejora que se puedan abordar fácilmente en el proyecto.

Dentro de los puntos que se encontraron, está primero la gran resistencia que presentan los rodamientos. Se deduce que es debido al método de lubricación utilizado, ya que cuentan con grasa para reducir fricción, la cual es efectiva para las condiciones en las que se espera que funcionen los descansos normalmente. Sin embargo, el uso de esta misma es contraproducente en un proyecto con magnitudes de fuerza tan pequeñas como lo es el proyecto. Se opta por remover la grasa o liberar los rodamientos del roce que puedan estar aportando, para lo cual se adquiere el aceite WD-40, con el fin de aflojar el movimiento. El cual luego de su aplicación tiene resultados inmediatos disminuyendo considerablemente la fricción del sistema y por lo tanto la fuerza necesaria para su movimiento.

Otro conflicto que se generó ocurrió con el desplazamiento de los rodamientos, ya que aunque la interferencia otorgada por el diseño de la góndola resultaba suficiente, en la práctica ocurría de vez en cuando que se soltaban de su lugar. Lo que estropeaba el funcionamiento del aerogenerador y se tenía que montar de nuevo todo en sus respectivos lugares. Para solucionar esto se optó por adquirir un adhesivo fuerte de la marca Loctite, con el propósito de fijar, mediante el uso de este, los rodamientos al cuerpo de la góndola. Resulta una solución eficaz ya que no vuelven a ocurrir los desplazamientos mencionados.

En la etapa planetaria, dentro del porta-planetas, se nota que los engranajes planeta giran con cierta rigidez alrededor del anillo. Tras una inspección al sistema se concluye que hay un apriete excesivo de los pernos que fijan la tapa en el porta-planetas, por lo que se aflojan y se ubica un poco de papel entre la tapa para dar un milímetro extra que alivie la presión sobre los rodamientos de los engranajes. Lo cual demuestra ser una técnica efectiva.

En la segunda etapa paralela, el engranaje conductor oscila de manera irregular al girar una vez puesto en marcha, lo que genera un aumento en la fricción entre el choque de los dientes con el engranaje conducido de manera momentánea. Otra consecuencia de este problema es el exceso de ruido en esta etapa respecto a las demás, ya que se logra focalizar en esta zona. Queda en evidencia, a simple vista, que el origen se encuentra en la forma del engranaje, que resulta defectuosa, ya que no se alinea correctamente en el eje y se muestra aparentemente curvo. La forma es resultado de un defecto en la impresión probablemente, ya que en su homólogo, en la primera etapa paralela, no se observa este comportamiento. Como solución ideal se busca reimprimir el engranaje conductor hasta obtener un resultado satisfactorio, sin embargo esto puede tomar más tiempo del previsto y entorpecer el avance del proyecto, por lo que se opta por utilizar lubricante en los engranajes para reducir la fricción. Se aprovecha, también, de impregnar de aceite el resto de los engranajes del aerogenerador. Probando nuevamente el funcionamiento, se advierte una mejoría general, pero el ruido persiste y todavía hay resistencia producto de la forma del engranaje. En la figura 42 se observa dentro del círculo rojo la forma del engranaje conductor y cómo no engrana correctamente con el engranaje conducido.



**Figura 42: Defecto en el engranaje conductor de la segunda etapa paralela (Fuente: elaboración propia).**

Otro aspecto que ya se había anticipado en capítulos anteriores y que fue corroborado en las pruebas de funcionamiento del mecanismo es, el desplazamiento axial de los ejes de la transmisión debido a la rotación y su consecuente momento angular. El fenómeno se presentó, impidiendo el funcionamiento como se esperaba dentro del aerogenerador. Ya habiendo descartado la factibilidad de realizar un eje con reducciones, la siguiente alternativa consiste en crear una pseudo reducción hecha con cinta adhesiva, por lo que se continúa con esta opción. La cinta es ubicada en los extremos de los ejes que realizan contacto con los rodamientos, de tal forma de aprovechar el resalte del anillo interior de los descansos como tope para los ejes. Se enrolla la cinta para crear aproximadamente 2 mm extra de espesor por sobre el radio del eje. La solución resulta eficaz, ya que se impide exitosamente el movimiento a lo largo de los ejes de giro. Una desventaja de utilizar este método para un uso extendido se haya en que la cinta puede desprenderse o moverse de lugar lentamente, lo cual resultaría difícil de notar hasta ya ocurrido un percance. También, para desmontar los ejes de la góndola, la cinta debe ser retirada de al menos un extremo si es que se requiere en algún momento.

Cubiertos estos percances, el prototipo funciona correctamente con el movimiento que se espera dentro de la transmisión, por lo que quedan realizar testeos dentro del túnel de viento para comprobar su desempeño en un ambiente controlado.

## CAPÍTULO 5: Ensayos de funcionamiento

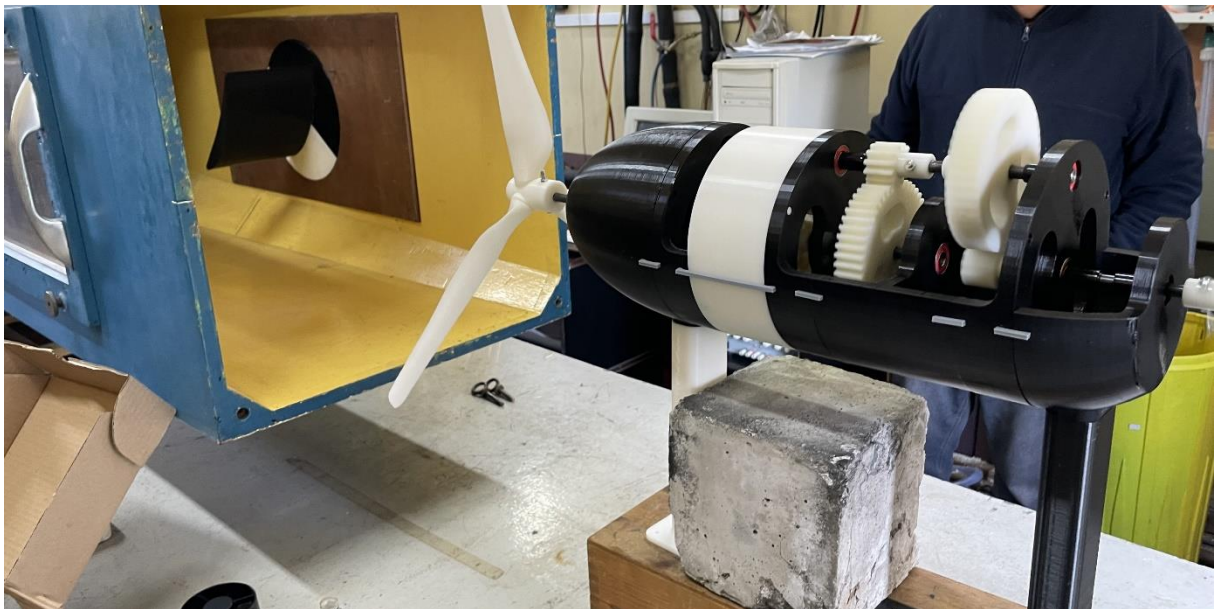
Revisados los aspectos que se destacan en el capítulo anterior, lo que sigue es trasladar el prototipo, este se lleva al laboratorio de termofluidos para realizar pruebas con el túnel de viento y así comparar el desempeño real que muestra el aerogenerador con el teórico.

### 5.1 Montaje en el túnel de viento

El aerogenerador se ubica fuera del túnel de viento debido a que el rotor presenta un diámetro mayor que la altura máxima permitida en la cámara de ensayos disponible. De todas formas, se logra ubicar al prototipo lo más cercano que se puede del túnel con tal de que no existan perturbaciones notorias debido a las características del flujo, que se considera uniforme.

El prototipo es montado sobre una mesa, de tal forma que el rotor quede centrado respecto a la cámara de ensayos con la altura adecuada. De igual manera se ubica un peso sobre la base del aerogenerador, ya que esta no se encuentra fijada en su lugar en esta ocasión y así se evita que el viento, vibraciones u otros factores externos desestabilicen el sistema haciéndolo caer.

En la figura 43 se aprecia la disposición de los elementos del banco de ensayos durante una prueba de funcionamiento de la turbina eólica.



**Figura 43: Aerogenerador montado en el túnel de viento (Fuente: elaboración propia).**

## 5.2 Mediciones del ensayo de funcionamiento

Para llevar a cabo las pruebas del aerogenerador, se enciende el túnel de viento y se va aumentando su velocidad de manera gradual.

Debido al triángulo de velocidades, que se repasó en el marco teórico, existe una condición que se debe cumplir para generar sustentación, la cual es que exista una componente de velocidad tangencial en las aspas, por lo que es necesario girar el rotor en un principio con tal de que exista una velocidad angular inicial. Este pequeño empujón no afecta el funcionamiento prolongado de la turbina, solo cambia su estado desde el reposo.



**Figura 44: Anemómetro (Fuente: elaboración propia).**

El aumento de velocidad junto con los empujones comienza a surtir efecto lentamente y se logra registrar mediante video lo que parece ser una velocidad angular constante del rotor, lo cual indicaría la velocidad nominal del viento, por lo que se realiza su medición por medio del uso de un anemómetro disponible en el laboratorio mostrado en la figura 44. La medición tomada se encuentra en la tabla 1.

**Tabla 14: Primera medición del banco de ensayos.**

Variable	Magnitud
Velocidad del rotor [RPM]	13
Velocidad del viento [m/s]	23.5

A partir de estos datos es posible determinar algunas características del prototipo que resultan de interés para evaluar la eficacia del diseño.

### 5.3 Características del aerogenerador

Los datos del punto anterior, aunque parezcan pocos, ya permiten calcular factores importantes como la potencia y la eficiencia del aerogenerador mediante relaciones matemáticas conocidas con anterioridad. Con este fin, se recurre nuevamente al método BEM descrito en el punto 2.6, sin embargo esta vez, utilizando los valores recuperados del banco de ensayos.

En las siguientes ecuaciones se tienen los valores de empuje y torque producidos por el prototipo, el cálculo fue realizado mediante un script en Matlab, el cual se encuentra en los anexos.

$$F_{t,prototipo} = \sum_{r_0}^{R_r} dF_t(r) = 11.21 [N] \quad (47)$$

$$\tau_{r,prototipo} = \sum_{r_0}^{R_r} d\tau_r(r) = 0.25 [Nm] \quad (48)$$

De estos primeros resultados se logra observar que hay una disminución considerable de la fuerza y el torque del prototipo respecto al diseño, de aproximadamente un tercio y un cuarto respectivamente de sus valores esperados. De igual forma es posible estimar la potencia de la turbina como se realiza a continuación

$$P_{prototipo} = \tau_{r,prototipo}\omega_r = 0.34 [W] \quad (49)$$

De la potencia disponible calculada se puede apreciar que es alrededor de diez veces menor que la predicha teóricamente para el rotor.

Para entender los resultados disponibles y poder contrastarlos con los valores obtenidos en capítulos anteriores se tiene que tomar en cuenta que el cálculo teórico del modelo BEM solo considera el rotor y no las pérdidas de energía producto de otros elementos unidos al sistema. Mientras que en el prototipo, gran parte de la energía ya es utilizada para mover la transmisión del aerogenerador, por lo que la potencia disponible se espera que sea menor a la real.

Lo anterior quiere decir que los resultados medidos en el banco de ensayos entregan una estimación de la energía aprovechada en el aerogenerador incluidas todas sus partes móviles, por lo que resulta injusto realizar una comparación con el cálculo que fue realizado solo para las aspas. Sin embargo, estos todavía tienen utilidad, ya que realizando una medición en la que el rotor se encuentra desconectado de la transmisión, se pueden obtener datos solo de esta parte de la turbina. Por lo tanto, una vez conocidos esos valores se puede determinar cuanta energía es solicitada por la caja de engranajes del sistema. Lo que significa que se lograría caracterizar la turbina eólica con relación a su eficiencia mecánica.

En turbinas eólicas instaladas en parques el efecto de la transmisión muchas veces resulta despreciable, por lo general cuentan con alta eficiencia y muy poca pérdida de energía.

## 5.4 Mejoras del prototipo

Si bien la turbina eólica mostró ser eficaz ya que cumple con el movimiento propuesto y es capaz de generar grandes velocidades de rotación a través de la transmisión utilizada, el modelo está lejos de ser perfecto. Por esta razón se realiza el ejercicio de identificar mejoras en el diseño o en la fabricación que puedan contribuir a mejorar la eficiencia del sistema.

Respecto al diseño, existe una limitación dimensional producto de la impresora que se utilizó para fabricar las aspas, pero es recomendable usar otro tipo que permita fabricar modelos más grandes, ya que la energía que se extrae del viento escala exponencialmente con el radio del rotor, por lo que se crearía un modelo más eficiente y capaz de producir mayores torques. Otra solución para obtener un diámetro mayor es fabricando las aspas por partes, lo que eliminaría la necesidad de buscar otro tipo de impresora, pero crearía nuevos desafíos referentes a la rigidez de la estructura.

Incluir el freno magnético queda como una mejora pendiente debido a que no se realizó por falta de un electroimán lo suficientemente fuerte. No obstante, si se logra fabricar uno, no debería haber impedimentos en su funcionamiento. Este permitiría controlar precisamente la velocidad a la que gira el aerogenerador por medio de pequeñas modificaciones a la distancia que provocarían diferentes torques en el eje de alta velocidad.

Fabricar los ejes utilizando reducciones otorga una gran ventaja a la hora de poder montar y desmontar el equipo con mayor tranquilidad, soporta las fuerzas axiales y bloquea los movimientos a lo largo del eje. Estas reducciones deben ser plasmadas en el diseño y maquinadas, para lo cual se deben realizar con la suficiente antelación, ya que pueden determinar cómo son algunos de los demás componentes de un aerogenerador.

En la conexión por medio de tarugos que se diseñó para la góndola, se vio un par de veces que se quebraban los tarugos. Es por esta razón que se plantea que en las piezas impresas solo exista el agujero para su unión, pero que los tarugos a utilizar sean tradicionales hechos de madera y no una extensión de plástico de las partes como se emplearon en el prototipo. De esta forma se evitaría el inconveniente de perder o reparar una parte de la góndola.

Modificar el diseño de la base también es considerado debido a que en el prototipo se experimenta un poco de inestabilidad, por lo que se plantea un sistema que abrace la góndola y otorgue un mayor equilibrio al aerogenerador.

Relacionado con la fabricación, en los modelos se podrían utilizar mayores tolerancias de las que ya se están usando. Esto porque en las conexiones de los elementos impresos se debió lijar y algunas piezas quedan obstruidas por la interferencia que se genera, cuando lo que se busca es que el banco de ensayos sea desmontable y esto puede dañar el funcionamiento.

Un aspecto más para el mejoramiento de que se encuentra es la calidad de la impresión de los engranajes, debido a que unos cuantos fueron impresos y resultaron con desviaciones apreciables cuando se trabaja. Esto trajo como consecuencia un exceso de ruido en la transmisión y una mayor ineficiencia por la pérdida de energía.

## CAPÍTULO 6: Conclusiones

A lo largo del proyecto se centraron los esfuerzos en crear el diseño de un banco de ensayos para turbinas eólicas mediante la impresión 3D, para el cual se usaron como referencia las características de una turbina Bonus, la cual ya se encuentra presente en la región del Biobío. Con la intención de diseñar y fabricar un aerogenerador que mostrase los principios de la energía eólica se plantearon un par de objetivos específicos que dieron guía para el desarrollo de un prototipo funcional.

La selección de un filamento adecuado para la impresión permitió realizar un diseño considerando las limitaciones mecánicas que puede tener el material. De forma similar, la conceptualización del mecanismo brindó un hilo conductor sobre los elementos que forman un aerogenerador, los cuales han sido considerados en el orden desde elemento de entrada hasta elemento de salida, permitiendo mantener coherencia en el diseño. El dimensionamiento y cálculo de las aspas, transmisión, ejes y otros elementos de la turbina eólica lograron garantizar un funcionamiento adecuado tras la puesta en marcha del prototipo.

La fabricación del prototipo por medio de la impresión 3D generó un gran volumen de piezas, las cuales fueron inspeccionadas, para corroborar defectos que se pudieron presentar y luego ensambladas con tal de realizar pruebas de funcionamiento en el mecanismo. Se detectaron inconvenientes y se solucionaron lo mejor posible con los recursos dados.

Posteriormente se probó el aerogenerador en el laboratorio, utilizando el túnel de viento disponible, lo cual demostró que se confeccionó una turbina eólica funcional. Se repasaron sus principales características luego de realizar mediciones preliminares del sistema con tal de verificar las propiedades predichas que debe cumplir el modelo.

En síntesis, el banco de ensayos demuestra un gran potencial para mejoras, ya que la acumulación de externalidades en la fabricación disminuyó la eficiencia, mientras que la optimización del diseño puede aumentar la capacidad de aprovechar energía en exponencialmente. También existen trabajos futuros que se pueden llevar a cabo con el banco de ensayos.

Entre los trabajos futuros se encuentra el poder utilizar un freno magnético como generadora del torque en el sistema, debido a que son artefactos que no generan desgaste en el mecanismo y al ser controlados son muy precisos cuando se requiere influir una fuerza específica sobre algún punto.

También queda pendiente la caracterización del sistema, poder determinar cual es la eficiencia de la transmisión utilizada y cuanto afecta la misma al funcionamiento libre de la turbina. Cuál es la potencia que se transmite al eje de alta velocidad y cómo aprovecharla. Estos son solo ejemplos, son muchas las opciones en cuanto a definir los aspectos que se pueden estudiar del banco de ensayo.

Por otro lado la implementación de mejoras en los diseños y en la fabricación, se logra utilizando ejes con reducciones, aumentando el tamaño del rotor, entre muchas más ya mencionadas.

Como se puede observar, el banco de ensayos es un éxito, esto debido a que queda mucho por conocer del sistema. Por lo que se podrían hacer pruebas de manera sencilla que despejen dudas y entreguen nuevas preguntas que responder del mundo de la energía eólica y su enseñanza.

## Referencias

- [1] Iberdrola, «ENERGÍA EÓLICA», Iberdrola, 22 de abril de 2021. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/energia-eolica#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20e%C3%B3lica%20es%20aquella,de%20aire%20en%20energ%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica>.
- [2] F. M'. White, Mecánica de fluidos, 5.a ed. McGraw-Hill, 2004
- [3] G. Duval, «How much do wind turbines cost? », Today's Homeowner, 27 de diciembre de 2023. <https://todayshomeowner.com/eco-friendly/guides/wind-turbine-cost/#:~:text=How%20much%20does%20a%20wind,million%20to%20manufacture%20and%20install>.
- [4] «LOS PARQUES EÓLICOS: COMPONENTES y PROCESOS». <https://www.adurcal.com/enlaces/mancomunidad/viabilidad/56.htm>
- [5] C. Muñoz, «Energía y emisiones en Chile», Breves de Energía, 24 de noviembre de 2023. <https://www.brevesdeenergia.com/blog/posts/energia-y-emisiones-en-chile/>
- [6] A. H. Alami et al., «Progress in 3D printing in wind energy and its role in achieving sustainability», International Journal of Thermofluids, vol. 20, p. 100496, nov. 2023, doi: 10.1016/j.ijft.2023.100496.
- [7] S. Kalpakjian y S. Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología, 5.a ed. México: Pearson Educación, 2008
- [8] Zack Freedman, «I Tested (Almost) EVERY FILAMENT on Amazon: Every Single Filament Part I», YouTube. 17 de abril de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=vSwumoSIZTo>
- [9] K. Bassett, R. Carriveau, y D. S. -k. Ting, «3D printed wind turbines part 1: Design considerations and rapid manufacture potential», Sustainable Energy Technologies and Assessments (Print), vol. 11, pp. 186-193, sep. 2015, doi: 10.1016/j.seta.2015.01.002.
- [10] M. Shalby, A. A. Salah, G. A. Matarnah, A. Marashli, y M. R. Gomaa, «An investigation of a 3D printed micro-wind turbine for residential power production», IJRED (International Journal of Renewable Energy Development), vol. 12, n.o 3, pp. 550-559, abr. 2023, doi: 10.14710/ijred.2023.52615.
- [11] Plint and Partners Ltd, «Equipment for mechanics of fluids laboratories: 18 in. Blower tunnel».
- [12] Alejandro, «Laboratorio de Termofluidos - Facultad de Ingeniería UDEC», Facultad de Ingeniería UdeC - Facultad de Ingeniería Universidad de Concepción, 15 de marzo de 2019. <https://fi.udec.cl/laboratorios/laboratorio-de-termofluidos/>
- [13] «El clima en Concepción, el tiempo por mes, temperatura promedio (Chile) - Weather Spark», Weather Spark. <https://es.weatherspark.com/y/24147/Clima-promedio-en-Concepci%C3%B3n-Chile-durante-todo-el-a%C3%B1o#Figures-Temperature>
- [14] «El clima en Concepción, el tiempo por mes, temperatura promedio (Chile) - Weather Spark», Weather Spark. <https://es.weatherspark.com/y/24147/Clima-promedio-en-Concepci%C3%B3n-Chile-durante-todo-el-a%C3%B1o#Figures-WindSpeed>
- [15] S. Cole, «Wind Turbine Power Curve», TheRoundup, 24 de agosto de 2022. <https://theroundup.org/wind-turbine-power-curve/>

- [16] «Energía eólica - Enciclopedia de Energía». [https://energyeducation.ca/Enciclopedia\\_de\\_Energia/index.php/Energ%C3%ADa\\_e%C3%B3lica#cite\\_note-4](https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Energ%C3%ADa_e%C3%B3lica#cite_note-4)
- [17] «Ender-3 3D printer», Creality. <https://www.creality.com/products/ender-3-3d-printer>
- [18] Impresoras3d.com, «Guía definitiva sobre tipos de filamentos 3D», impresoras3d.com, 27 de abril de 2023. <https://www.impresoras3d.com/la-guia-definitiva-sobre-los-distintos-filamentos-para-impresoras-3d/>
- [19] Creality Store, «Hyper Series PLA 3D Printing Filament 1kg», Creality Store, 2024. <https://store.creality.com/products/hyper-series-pla-3d-printing-filament-1kg>
- [20] T. Xometry, «PLA vs. PLA+: Differences and Comparisons», Xometry, 10 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.xometry.com/resources/pla-vs-pla-plus/>
- [21] «PLA VS. ABS PLASTIC – THE PROS AND CONS El blog del Plástico», 31 de enero de 2015. <https://elblogdelplastico.blogs.upv.es/2015/01/31/pla-vs-abs-plastic-the-pros-and-cons/>
- [22] W. Stone, «PETG vs. PLA: Main Pros & Cons of Both», 13 de enero de 2023. <https://www.3dprintingspot.com/post/petg-vs-pla-main-pros-cons-of-both#pros-of-petg>
- [23] S. Team, «The Power of Carbon Fiber 3D Printing | Spatial». <https://blog.spatial.com/everything-you-need-to-know-about-carbon-fiber-3d-printing>
- [24] David, «The Pros and Cons of Every 3D Printing Filament Material», Imprimante 3D: Comparatif, Actu & Prix Des Périphériques Du Marché, 23 de julio de 2020. <https://www.imprimeren3d.net/the-pros-and-cons-of-every-3d-printing-filament-material-13391/>
- [25] eSUN, «PLA: Technical Data Sheet». noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: [https://www.esun3d.com/uploads/eSUN\\_PLA-Filament\\_TDS\\_V4.0.pdf](https://www.esun3d.com/uploads/eSUN_PLA-Filament_TDS_V4.0.pdf)
- [26] 3DMachine.cl, «Filamento Hyper PLA para impresión 3D Rápida Creality», 3DMachine.cl. <https://3dmachine.cl/filamentos-y-resina/29-filamento-hyper-pla-para-impresion-3d-rapida-creality.html>
- [27] eSUN, «PLA+: Technical Data Sheet». noviembre de 2021. [PDF]. Disponible en: [https://www.esun3d.com/uploads/eSUN\\_PLA+-Filament\\_TDS\\_V4.0.pdf](https://www.esun3d.com/uploads/eSUN_PLA+-Filament_TDS_V4.0.pdf)
- [28] eSUN, «ABS: Technical Data Sheet». noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: [https://www.esun3d.com/uploads/eSUN\\_ABS-Filament\\_TDS\\_V4.0.pdf](https://www.esun3d.com/uploads/eSUN_ABS-Filament_TDS_V4.0.pdf)
- [29] eSUN, «PETG: Technical Data Sheet». noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: [https://www.esun3d.com/uploads/eSUN\\_PETG-Filament\\_TDS\\_V4.0.pdf](https://www.esun3d.com/uploads/eSUN_PETG-Filament_TDS_V4.0.pdf)
- [30] eSUN, «ePA-CF: Technical Data Sheet». noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: [https://www.esun3d.com/uploads/eSUN\\_ePA-CF-Filament\\_TDS\\_V4.0.pdf](https://www.esun3d.com/uploads/eSUN_ePA-CF-Filament_TDS_V4.0.pdf)
- [31] eSUN, «PEEK-Industrial: Technical Data Sheet». noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.esun3d.com/uploads/ePEEK-Industrial-TDS.pdf>
- [32] A. Muguira, «¿Qué es la escala de Likert y cómo utilizarla?», QuestionPro, 12 de junio de 2023. <https://www.questionpro.com/blog/es/que-es-la-escala-de-likert-y-como-utilizarla/>
- [33] M. Sayed, H. A. Kandil, y A. Shaltot, «Aerodynamic analysis of different wind-turbine-blade profiles using finite-volume method», Energy Conversion and Management, vol. 64, pp. 541-550, dic. 2012, doi: 10.1016/j.enconman.2012.05.030.

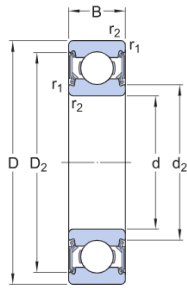
- [34] P. Doerffer, K. Doerffer, T. Ochrymiuk, y J. J. Telega, «Variable size Twin-Rotor wind turbine», *Energies*, vol. 12, n.o 13, p. 2543, jul. 2019, doi: 10.3390/en12132543
- [35] M. I. Hub, «Horizontal Axis Wind Turbines Market: Challenges, Opportunities, and Growth Drivers and Major Market Players forecasted for period from 2023 - 2030», 16 de diciembre de 2023. [https://www.linkedin.com/pulse/horizontal-axis-wind-turbines-market-challenges-opportunities-ey3qe/?trk=article-ssr-frontend-pulse\\_more-articles\\_related-content-card](https://www.linkedin.com/pulse/horizontal-axis-wind-turbines-market-challenges-opportunities-ey3qe/?trk=article-ssr-frontend-pulse_more-articles_related-content-card)
- [36] W. Tong, *Wind power generation and wind turbine design*. WIT Press, 2010.
- [37] «Wind turbines: How many blades? » <http://xn--drmstre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/design/concepts.htm>
- [38] K. A. Adeyeye, N. M. Ijumba, y J. S. Colton, «The effect of the number of blades on the efficiency of a wind turbine», *IOP conference series*, vol. 801, n.o 1, p. 012020, jun. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/801/1/012020.
- [39] H. Zhang, J. Wen, Z. Jin, y D. Xin, «Effects of blade number on the aerodynamic performance and wake characteristics of a small horizontal-axis wind turbine», *Energy Conversion and Management*, vol. 273, p. 116410, dic. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.116410.
- [40] «Lebu (Chile) - Parques eólicos - Acceso en línea - The Wind Power». [https://www.thewindpower.net/windfarm\\_es\\_26808\\_lebu.php](https://www.thewindpower.net/windfarm_es_26808_lebu.php)
- [41] LEBU-TORO, «INFORME MÍNIMO TÉCNICO PARQUE EÓLICO LEBU-TORO», jul. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2020/05/Informe-Final-M%C3%ADnimo-T%C3%A9cnico-PE-Lebu-Toro.pdf>
- [42] LEBU-TORO, «DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LOS PROCESOS DE PARTIDA y DETENCIÓN DE UNIDADES GENERADORAS: CENTRAL PARQUE EOLICO LEBU-TORO», B.F.001.06, jul. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2019/08/Informe-Par%C3%A1metros-de-Partida-y-Detenci%C3%B3n.pdf>
- [43] «Bonus B44/600 - Fabricantes y aerogeneradores - Acceso en línea - The Wind Power». [https://www.thewindpower.net/turbine\\_es\\_242\\_bonus\\_b44-600.php](https://www.thewindpower.net/turbine_es_242_bonus_b44-600.php)
- [44] L. Bauer, «Bonus B44/600 - 600,00 kW - Aerogenerador». <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/698-bonus-b44-600#datasheet>
- [45] Fluidosgrupo, «Componentes de una turbina eólica», Grupo 15, 25 de abril de 2016. <https://grupo15fluidos.wordpress.com/2016/04/24/componentes-de-una-turbina-eolica/>
- [46] «The lift coefficient». <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/liftco.html>
- [47] «Reynolds Number». <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/reynolds.html>
- [48] Wikipedia contributors, «Tip-speed ratio», Wikipedia, 20 de enero de 2021. [https://en.wikipedia.org/wiki/Tip-speed\\_ratio](https://en.wikipedia.org/wiki/Tip-speed_ratio)
- [49] H. Zhao, Y. Yang, Y. Zhang, y W. Li, «Simulation Research on the Effect of Reynolds Number on the Aerodynamic Characteristics of High Lift Device», *Journal Of Physics: Conference Series*, vol. 2280, n.o 1, p. 012010, jun. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2280/1/012010.

- [50] R. Gasch y J. Twele, *Wind power plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*. Springer, 2011.
- [51] «Airfoils, Where the Turbine Meets the Wind», Energy.gov. <https://www.energy.gov/eere/wind/articles/airfoils-where-turbine-meets-wind>
- [52] Tangier y Somers, «NREL Airfoil families for HAWTs», National Renewable Energy Laboratory, Art. n.o NREL/TP-442-7109, ene. 1995, [En línea]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/7109.pdf>
- [53] Amer. H. Muheisen, M. A. R. Yass, y I. Irthiaa, «Enhancement of horizontal wind turbine blade performance using multiple airfoils sections and fences», *Journal of King Saud University. Engineering Sciences/Mağallaġ Ġāmi'aġ Al-malik Sa'ūd. al-'Ulūm Al-handsiyyaġ*, vol. 35, n.o 1, pp. 69-81, ene. 2023, doi: 10.1016/j.jksues.2021.02.014.
- [54] NREL, «Advanced Airfoils for Wind Turbines», ago. 2000. [En línea]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/docs/fy00osti/23696.pdf>
- [55] Md. R. Islam, L. B. Bashar, D. K. Saha, y N. Rafi, «Comparison and selection of airfoils for small wind turbine between NACA and NREL's S Series Airfoil Families», *International Journal of Research in Electrical, Electronics and Communication Engineering*, oct. 2019, doi: 10.5281/zenodo.3520469.
- [56] NREL, «The S833, S834, and S835 airfoils», NREL/SR-500-36340, nov. 2002. [En línea]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/docs/fy05osti/36340.pdf>
- [57] «Airfoil tools». <http://airfoiltools.com/>
- [58] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones*. 2006.
- [59] Engineering with Rosie, «How to Design Wind Turbine Blade Geometry for Optimal Aerodynamic Efficiency», YouTube. 10 de noviembre de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=CavfXOt3Dew>
- [60] B. Wainfan, «Wind tunnel», KITPLANES, jun. 2019, [En línea]. Disponible en: <https://www.kitplanes.com/wind-tunnel-34/>
- [61] R. H. Barnes y E. B. Морозов, «Structural optimisation of composite wind turbine blade structures with variations of internal geometry configuration», *Composite Structures*, vol. 152, pp. 158-167, sep. 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.05.013.
- [62] Gurit, «Advanced Composite Materials and Solutions», Gurit, 5 de Marzo de 2024. <https://www.gurit.com/>
- [63] M. O. L. Hansen, *Aerodynamics of wind turbines*. 2015. doi: 10.4324/9781315769981.
- [64] De Madrid, U. C. (s. f.). OSCAR, física visual a un click: Universidad Complutense de Madrid. <https://webs.ucm.es/centros/webs/oscar/>
- [65] M. Z. Baharom, M. Z. Nuawi, G. Priyandoko, y L. M. Siow, «EDDY CURRENT BRAKING STUDY FOR BRAKE DISC OF ALUMINIUM, COPPER AND ZINK», ResearchGate, ene. 2011, [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/274371434\\_EDDY\\_CURRENT\\_BRAKING\\_STUDY\\_FOR\\_BRAKE\\_DISC\\_OF\\_ALUMINIUM\\_COPPER\\_AND\\_ZINK](https://www.researchgate.net/publication/274371434_EDDY_CURRENT_BRAKING_STUDY_FOR_BRAKE_DISC_OF_ALUMINIUM_COPPER_AND_ZINK)
- [66] M. Z. Baharom, M. Z. Nuawi, G. Priyandoko, y S. M. Harris, «Eddy current braking experiment using brake disc from aluminium series of A16061 and A17075», *IOP Conference Series. Materials Science And Engineering*, vol. 36, p. 012005, sep. 2012, doi: 10.1088/1757-899x/36/1/012005.

- [67] E. Vanstone, «How to make an electromagnet», Science Experiments for Kids, 3 de marzo de 2023. <https://www.science-sparks.com/how-to-make-an-electromagnet/>
- [68] «Eddy Currents II». <https://www.kjmagnetics.com/blog.asp?p=eddy-currents-2>
- [69] «Ferromagnetism». <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/ferro.html>
- [70] Windpower Engineering & Development, «Why wind turbines need those troublesome gearboxes», YouTube. 13 de diciembre de 2016. [En línea]. Disponible en: [https://www.youtube.com/watch?v=s7Sg2\\_pihGE](https://www.youtube.com/watch?v=s7Sg2_pihGE)
- [71] M. Wada, «Your Guide to Wind Turbine Inspection and Maintenance with a Videoscope», Blog Post | Olympus IMS, 17 de noviembre de 2020. <https://www.olympus-ims.com/en/insight/your-guide-to-wind-turbine-inspection-and-maintenance-with-a-videoscope/>
- [72] C. S. Cristina, G. P. J. Carlos, y R. A. Hignio, Problemas resueltos de teoría de máquinas y mecanismos. Ediciones Paraninfo, S.A., 2007.
- [73] «Frecuencias propias de un engranaje», Power-MI, 18 de septiembre de 2018. <https://power-mi.com/es/content/frecuencias-propias-de-un-engranaje>
- [74] Eisele Antriebstechnik GmbH, «Planetary gearbox: everything you need to know», Eisele Antriebstechnik, 16 de junio de 2021. <https://eisele-getriebe.de/home/planetary-gearbox/#:~:text=The%20number%20of%20planetary%20gears,it%20is%20at%20least%20three.>
- [75] «Gear Systems | KHK Gears», KHK Gears. [https://khkgears.net/new/gear\\_knowledge/gear\\_technical\\_reference/gear\\_systems.html](https://khkgears.net/new/gear_knowledge/gear_technical_reference/gear_systems.html)
- [76] W. Teng, F. Wang, K. Zhang, Y. Liu, y X. Ding, «Pitting Fault Detection of a Wind Turbine Gearbox Using Empirical Mode Decomposition», Strojniški Vestnik, vol. 60, n.o 1, pp. 12-20, ene. 2014, doi: 10.5545/sv-jme.2013.1295.
- [77] S.A.E. handbook. 1986.
- [78] H. Gonabadi, A. Yadav, y S. J. Bull, «The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer», ~ The «International Journal of Advanced Manufacturing Technology/International Journal, Advanced Manufacturing Technology, vol. 111, n.o 3-4, pp. 695-709, oct. 2020, doi: 10.1007/s00170-020-06138-4.

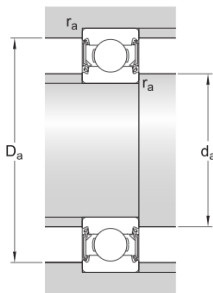
## Anexo A: Especificaciones de los rodamientos

A continuación, se muestran las dimensiones del rodamiento SKF 608 2RS, extraídas directamente de la página de SKF:



### Dimensiones

d	8 mm	Diámetro del agujero
D	22 mm	Diámetro exterior
B	7 mm	Ancho
d <sub>2</sub>	≈ 10.55 mm	Diámetro del rebaje
D <sub>2</sub>	≈ 19.2 mm	Diámetro del rebaje
r <sub>1,2</sub>	min. 0.3 mm	Dimensión del chafán



### Dimensiones de los resaltes

d <sub>a</sub>	min. 10 mm	Diámetro del resalte del eje
d <sub>a</sub>	max. 10.5 mm	Diámetro del resalte del eje
D <sub>a</sub>	max. 20 mm	Diámetro del resalte del soporte
r <sub>a</sub>	max. 0.3 mm	Radio del eje o acuerdo del soporte

### Datos del cálculo

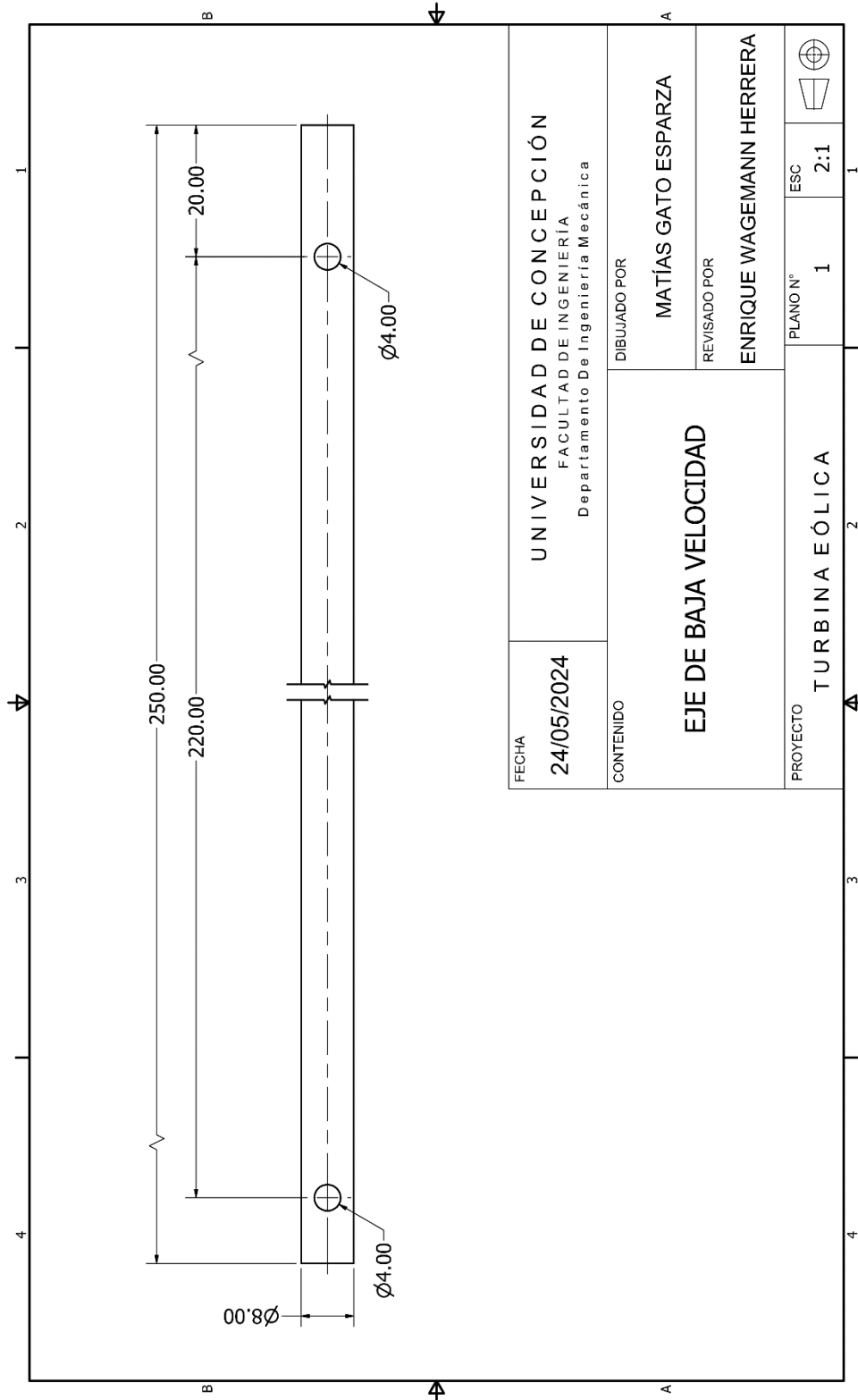
Clase de rendimiento SKF		SKF Explorer
Capacidad de carga dinámica básica	C	3.45 kN
Capacidad de carga estática básica	C <sub>0</sub>	1.37 kN
Carga límite de fatiga	P <sub>u</sub>	0.057 kN
Velocidad límite		22 000 r/min
Factor de carga mínima	k <sub>r</sub>	0.025
Factor de cálculo	f <sub>0</sub>	12

### Clase de tolerancia

Tolerancias dimensionales	P6
Desviación radial	P5

**Figura 45: Dimensiones del rodamiento SKF 608 2RS**

**Anexo B: Planos de fabricación de los ejes de la transmisión**



**Figura 46: Plano eje de baja velocidad**

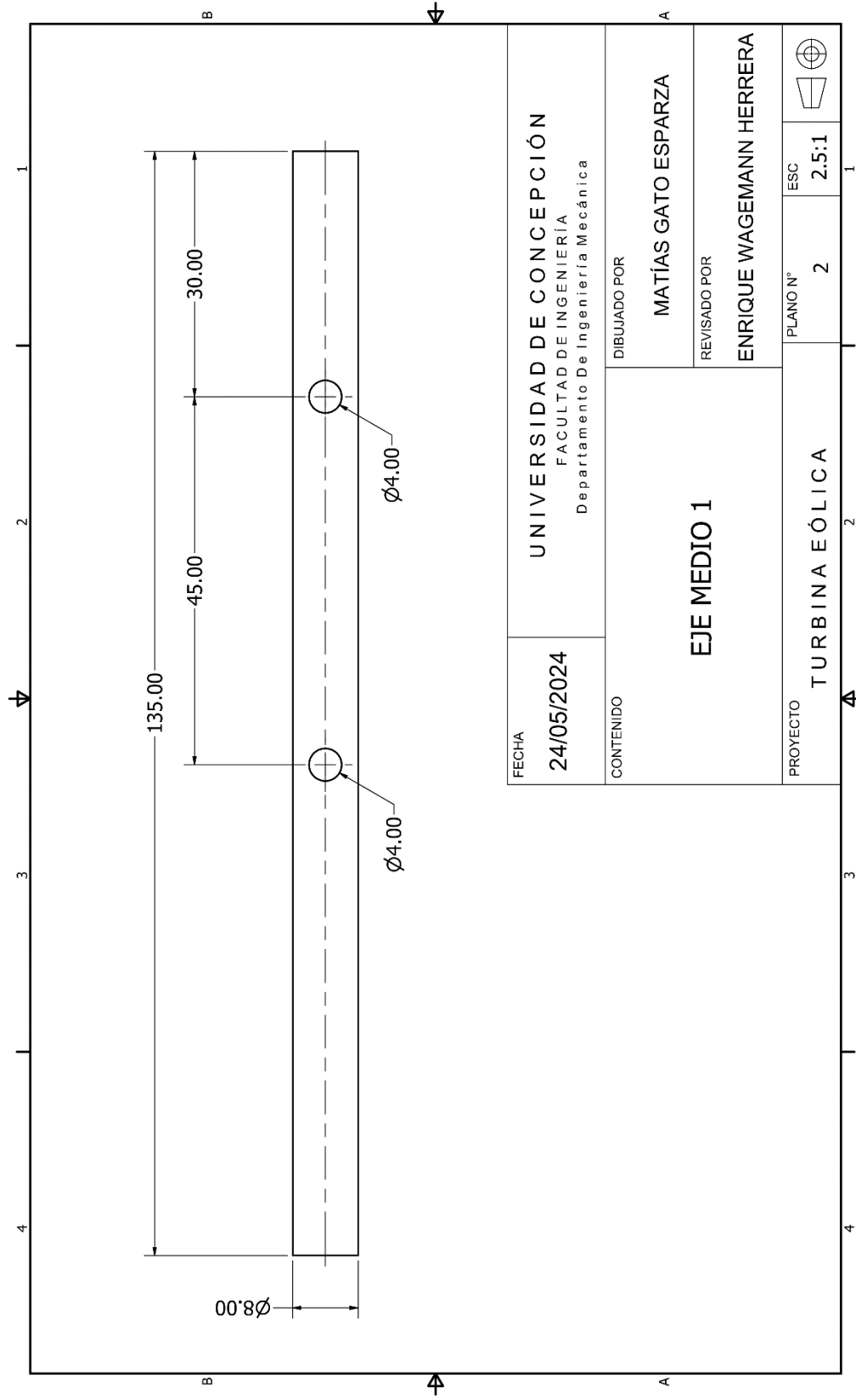


Figura 47: Plano eje medio 1.

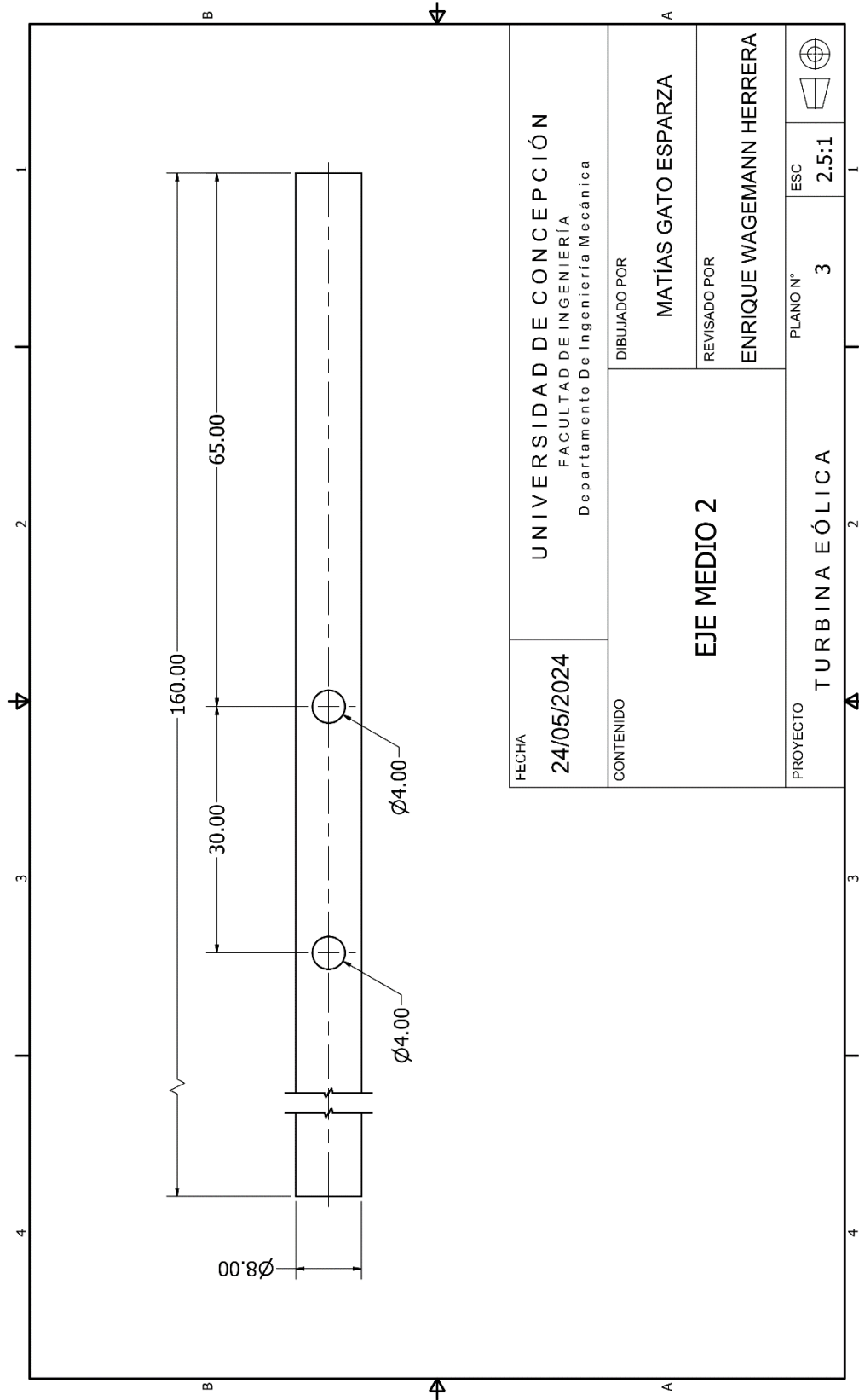


Figura 48: Plano eje medio 2.

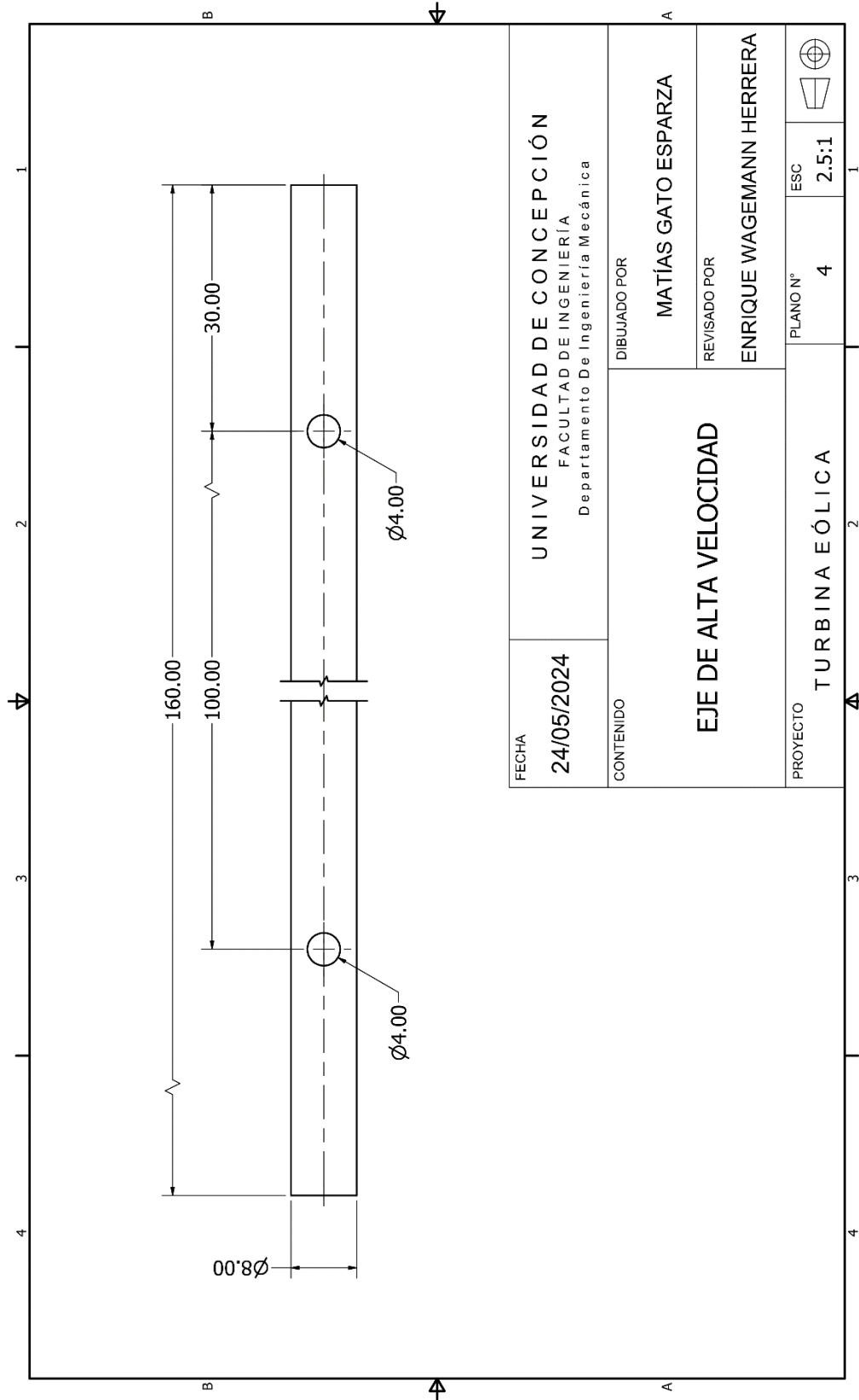


Figura 49: Plano eje de alta velocidad.

Anexo C: Plano de fabricación del disco de freno

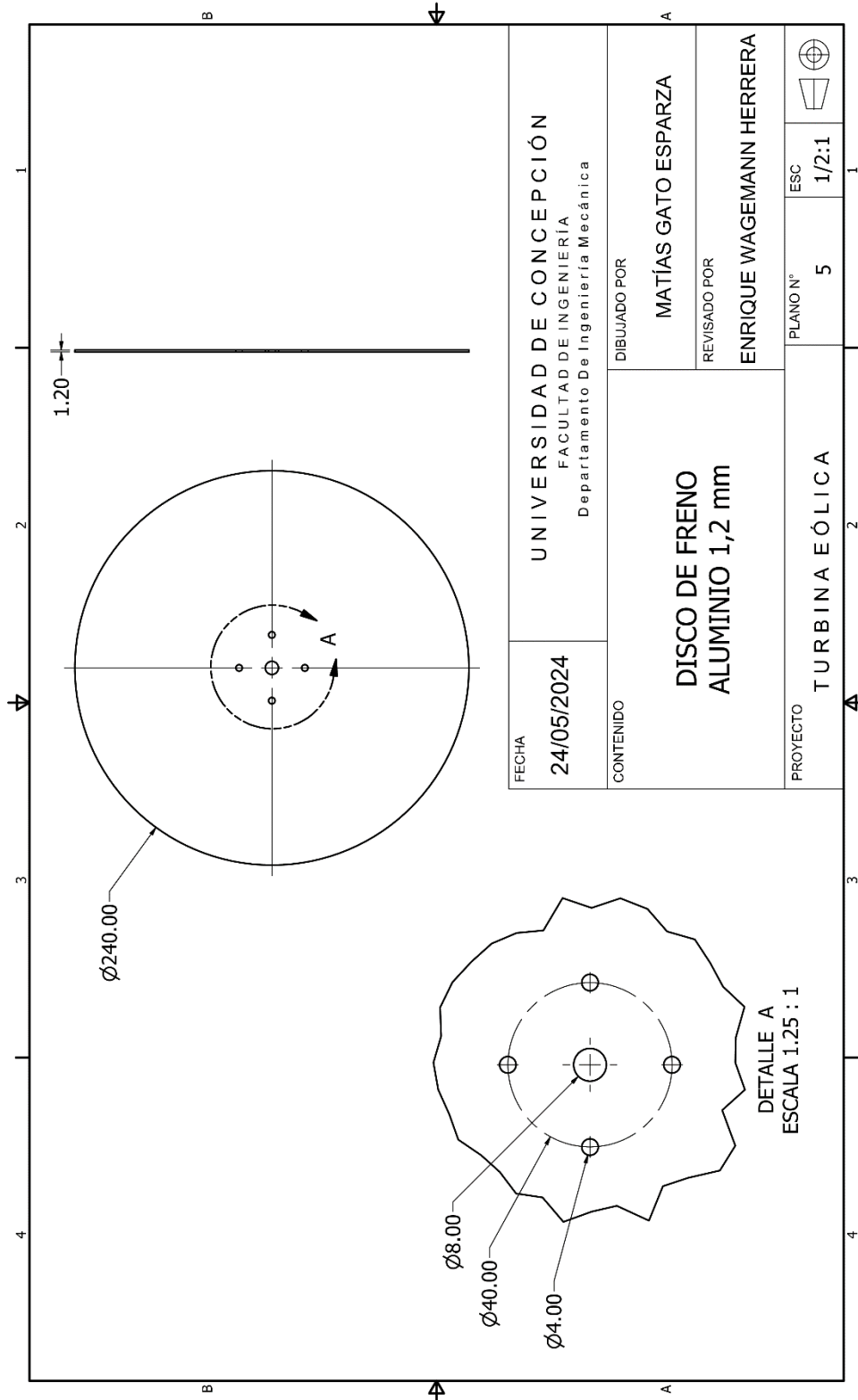


Figura 50: Plano de fabricación del disco de freno.

## Anexo D: Script de Matlab

```

clc
clearvars

R=22;           %Radio del aspa
z=3;           %Número de aspas
Lambda=5;      %Tip speed ratio [Entre 3 y 6]
V_1=22.5;     %Velocidad del viento
rho=1.246     %Densidad [kg/m3]

% Omega=Lambda*V_1/R*(30/pi)   %RPM
Omega=13
r=linspace(R/20,R,20);       %Secciones

%% PERFIL S818
a_1 =9.25;                   %Ángulo de ataque en grados
CL_1=1.4311;                 %Coeficiente de sustentación
CD_1=0.0135;                 %Coeficiente de arrastre
CM_1=-0.1314;                %Coeficiente de momento

c=2*pi*R*1/z*8/(9*CL_1)*1./(Lambda*sqrt(Lambda^2*(r/R).^2+4/9));
beta=atan(2/3*R./(r*Lambda))*180/pi-a_1;

Chord_S818(1,:)=eval(subs(c));
Chord_S818(2,:)=eval(subs(beta));

%% PERFIL 827
a_2 =6.00;
CL_2=0.9592;
CD_2=0.0079;
CM_2=-0.0879;

c=2*pi*R*1/z*8/(9*CL_2)*1./(Lambda*sqrt(Lambda^2*(r/R).^2+4/9));
beta=atan(2/3*R./(r*Lambda))*180/pi-a_2;

Chord_S827(1,:)=eval(subs(c));
Chord_S827(2,:)=eval(subs(beta));

%% PERFIL 828
a_3 =5.75;
CL_3=0.8276;
CD_3=0.0073;
CM_3=-0.0436;

c=2*pi*R*1/z*8/(9*CL_3)*1./(Lambda*sqrt(Lambda^2*(r/R).^2+4/9));
beta=atan(2/3*R./(r*Lambda))*180/pi-a_3;

Chord_S828(1,:)=eval(subs(c));
Chord_S828(2,:)=eval(subs(beta));

r2= [1.10 9.90 17.6 22.0];
v2= [8.0391 3.6391 2.4408 1.9622];
vq2=interp1(r2,v2,r,'spline');

```

```

r3= [1.10 9.90 11.0 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5 17.6 18.7 19.8 20.9 22.0];
v3= [3.6391 3.6391 3.3748 3.1524 2.9653 2.8071 2.6713 2.5513 2.4408 2.3330 2.2217 2.1002
1.9622];
vq3=interp1(r3,v3,r,'spline');

x=0.25.*vq3;
Chord_mean=mean(vq3);

%% BEM S818

a1_0=0;
a2_0=0;
phi=atan((1-a1_0)/((Omega*(pi/30)*r/V_1)*(1+a2_0)));
for i=1:2
    F_1=z*vq3.*(CL_1*cos(phi)+CD_1*sin(phi))./(8*pi*r.*(sin(phi).^2));
    F_2=z*vq3.*(CL_1*cos(phi)-CD_1*sin(phi))./(4*pi*r.*sin(2*phi));
    a1_0=F_1./(1+F_1);
    a2_0=F_2./(1-F_2);
    phi=atan((1-a1_0)/((Omega*(pi/30)*r/V_1).*(1+a2_0)));
end
a_S818(1,:)=a1_0;
a_S818(2,:)=a2_0;

T_S818(1)=rho*V_1^2*4*a_S818(1,1)*(1-a_S818(1,1))*pi*((r(1)/100)^2);
Q_S818(1)=4*a_S818(2,1)*(1-a_S818(1,1))*rho*V_1*pi*Omega*(pi/30)*((r(1)/100)^4);
for i=1:19
    T_S818(i+1)=rho*V_1^2*4*a_S818(1,i+1)*(1-a_S818(1,i+1))*pi*((r(i+1)/100)^2-
(r(i)/100)^2);
    Q_S818(i+1)=4*a_S818(2,i+1)*(1-
a_S818(1,i+1))*rho*V_1*pi*Omega*(pi/30)*((r(i+1)/100)^4-(r(i)/100)^4);
end

%% BEM S827

a1_0=0;
a2_0=0;
phi=atan((1-a1_0)/((Omega*(pi/30)*r/V_1)*(1+a2_0)));
for i=1:2
    F_1=z*vq3.*(CL_2*cos(phi)+CD_2*sin(phi))./(8*pi*r.*(sin(phi).^2));
    F_2=z*vq3.*(CL_2*cos(phi)-CD_2*sin(phi))./(4*pi*r.*sin(2*phi));
    a1_0=F_1./(1+F_1);
    a2_0=F_2./(1-F_2);
    phi=atan((1-a1_0)/((Omega*(pi/30)*r/V_1).*(1+a2_0)));
end
a_S827(1,:)=a1_0;
a_S827(2,:)=a2_0;

T_S827(1)=rho*V_1^2*4*a_S827(1,1)*(1-a_S827(1,1))*pi*((r(1)/100)^2);
Q_S827(1)=4*a_S827(2,1)*(1-a_S827(1,1))*rho*V_1*pi*Omega*(pi/30)*((r(1)/100)^4);
for i=1:19
    T_S827(i+1)=rho*V_1^2*4*a_S827(1,i+1)*(1-a_S827(1,i+1))*pi*((r(i+1)/100)^2-
(r(i)/100)^2);
    Q_S827(i+1)=4*a_S827(2,i+1)*(1-
a_S827(1,i+1))*rho*V_1*pi*Omega*(pi/30)*((r(i+1)/100)^4-(r(i)/100)^4);
end

```

```

%% BEM S828

a1_0=0;
a2_0=0;
phi=atan((1-a1_0)./((Omega*(pi/30)*r/V_1)*(1+a2_0)));
for i=1:2
    F_1=z*vq3.*(CL_3*cos(phi)+CD_3*sin(phi))./(8*pi*r.*(sin(phi).^2));
    F_2=z*vq3.*(CL_3*cos(phi)-CD_3*sin(phi))./(4*pi*r.*sin(2*phi));
    a1_0=F_1./(1+F_1);
    a2_0=F_2./(1-F_2);
    phi=atan((1-a1_0)./((Omega*(pi/30)*r/V_1).*(1+a2_0)));
end
a_S828(1,:)=a1_0;
a_S828(2,:)=a2_0;

T_S828(1)=rho*V_1^2*4*a_S828(1,1)*(1-a_S828(1,1))*pi*((r(1)/100)^2);
Q_S828(1)=4*a_S828(2,1)*(1-a_S828(1,1))*rho*V_1*pi*Omega*(pi/30)*((r(1)/100)^4);
for i=1:19
    T_S828(i+1)=rho*V_1^2*4*a_S828(1,i+1)*(1-a_S828(1,i+1))*pi*((r(i+1)/100)^2-
(r(i)/100)^2);
    Q_S828(i+1)=4*a_S828(2,i+1)*(1-
a_S828(1,i+1))*rho*V_1*pi*Omega*(pi/30)*((r(i+1)/100)^4-(r(i)/100)^4);
end

%% Gráficos

figure(1)
plot(r,Chord_S818(1,:),r,Chord_S827(1,:),r,Chord_S828(1,:),r,vq2,r2,v2,'0')
title('Distribución del chord a lo largo del radio')
xlabel('Radio [m]')
ylabel('Chord [m]')
legend('Perfil S818','Perfil S827','Perfil S828','Interpolación')

figure(2)
plot(r,vq2,r,vq3)
title('Distribución del chord a lo largo del radio')
xlabel('Radio [m]')
ylabel('Chord [m]')
legend('Interpolación','Ajuste')

```

## Anexo E: Guía de ensamblaje

En el siguiente apartado se presentan las instrucciones paso a paso que seguir para realizar el montaje del banco de ensayos para turbinas eólicas basado en impresión 3D.

1. Introducir rodamientos en los orificios diseñados para ello de las partes de la góndola. Uno para el extremo frontal, dos para cada cuerpo 1, uno para el cuerpo 2 y 1 para el extremo posterior. Resulta en un total de 9 rodamientos utilizados. Para fijar con mayor firmeza los descansos a las ranuras se pueden utilizar adhesivos.
2. Introducir rodamientos en los engranajes planeta del sistema planetario. Dos para cada planeta. Resulta en un total de 6 rodamientos. Para fijar con mayor firmeza los descansos a las ranuras se pueden utilizar adhesivos.
3. Insertar los engranajes planeta sobre los ejes del porta-planetas. Para ello se debe tener cuidado que los rodamientos puedan girar libremente en el sistema.
4. Alinear la tapa del porta-planetas sobre el porta-planetas. Para esto se puede ayudar de un pequeño resalte en la tapa que encaja con el final del eje sobre los cuales están ubicados los engranajes planeta.
5. Fijar pernos y tuerca sobre el porta-planetas. Para que la tapa del porta-planetas no se desplace, se fijan tres pernos M6x50 en los orificios diseñados con esta intención.
6. Introducir el porta-planetas en el extremo que tiene el orificio a 20 mm del fin del eje de baja velocidad, cuidando que la tapa quede orientada hacia el extremo del eje.
7. Fijar pernos y tuerca sobre el porta-planetas y el eje de baja velocidad. Para esto se alinean los orificios de ambas partes y se inserta un perno M4x20 para sujetar.
8. Introducir un engranaje conductor en el extremo que tiene el orificio a 60 mm del fin del eje medio 1, cuidando que el engranaje esté orientado hacia el extremo del eje.
9. Fijar pernos y tuerca sobre el engranaje conductor y el eje medio 1. Para esto se alinean los orificios de ambas partes y se inserta un perno M4x20 para sujetar.
10. Introducir un engranaje conductor y un engranaje conducido en los extremos del eje medio 2, cuidando que cada engranaje esté orientado hacia el extremo del eje.
11. Fijar pernos y tuerca sobre los engranajes y el eje medio 2. Para ello se alinean los orificios de los engranajes y el eje para luego insertar un perno M4x20 en cada lado.
12. Introducir un engranaje conducido en el extremo que tiene el orificio a 30 mm del fin del eje de alta velocidad, cuidando que el engranaje esté orientado hacia el extremo del eje.
13. Fijar pernos y tuerca sobre el engranaje conducido y el eje de alta velocidad. Para ello se alinean los orificios de los engranajes y el eje y se inserta un perno M4x20 para sujetar.
14. Unir el extremo frontal con el cuerpo 1. Para esto se utiliza como guía la unión por medio de tarugos, lo que garantiza que ambas partes estén alineadas. Para fijar estos extremos se utilizan dos clips de 4 mm que se ubican en los costados en las ranuras diseñadas con este propósito en mente.
15. Introducir el eje de baja velocidad en los descansos del extremo frontal y el cuerpo 1, de tal forma que el porta-planetas se encuentre dentro de la góndola.
16. Introducir el extremo del eje medio 1 en el que se encuentra el engranaje conductor al descanso que se haya en el cuerpo 2. Mientras se toma otro componente de cuerpo 1 y se une a un costado del cuerpo 2 ayudándose para su alineación de la unión por medio de tarugos, esto cuidando que el eje medio 1 se halle introducido en el descanso central del cuerpo 1. Ambos cuerpos de la góndola son fijados en posición por el uso de dos clips de 4 mm en los costados con sus respectivas ranuras.
17. Unir el extremo posterior con otro componente de cuerpo 1. Para esto se usa como guía la unión por medio de tarugos, lo que garantiza que ambas partes estén alineadas. Para fijar estos extremos se utilizan dos clips de 4 mm que se ubican en los costados con sus respectivas ranuras.

18. Introducir el eje de alta velocidad en los descansos del extremo posterior y el cuerpo 1, de tal forma que el engranaje conducido se encuentre dentro de la góndola.
19. Introducir un extremo del eje medio 2 en el descanso libre del cuerpo 1 unido al cuerpo 2 de tal manera que el engranaje conducido del eje medio 2 se encuentre posicionado sobre el engranaje conductor del eje medio 1.
20. Posicionar el cuerpo 1 unido al extremo posterior junto al cuerpo 2 y juntarlos utilizando como guía los tarugos. Se debe tener cuidado de que el extremo del eje medio 2 en el que se encuentra el engranaje conductor quede reposado sobre un descanso y que este engranaje se halle sobre el engranaje conducido del eje de alta velocidad. Si el paso fue realizado correctamente, entonces se puede unir el cuerpo 1 con el cuerpo 2 por medio de clips de 4 mm en que se ubican en los costados.
21. Posicionar el engranaje anillo junto al cuerpo 1 unido al extremo frontal. Para esto se utilizan como guía nuevamente los tarugos, además se debe tener el cuidado de que el porta-planetas engrane correctamente con el anillo, para asegurar su movimiento.
22. En el extremo libre del eje medio 1 se introduce el engranaje sol. El cual es fijado por medio de un perno M4x20 y su respectiva tuerca. Para esto se alinean los orificios del engranaje y el eje con cuidado y se verifica que el engranaje esté de cara al extremo del eje.
23. Se ubica el cuerpo 1 sobre el cual descansa el eje medio 1 junto al engranaje anillo. Se utilizan como guía las uniones por medio de tarugos para el correcto alineamiento. Para esto se debe asegurar que el engranaje sol quede introducido en el porta-planetas y este sistema engrane correctamente. Si es el caso, entonces se proceden a fijar en posición las partes por medio del uso de dos clips de 80 mm que se ubican en los costados libres de ambas piezas de cuerpo 1, de forma que se amordace el engranaje anillo. Con esto se finalizaría lo que es el ensamble de la transmisión.
24. En el extremo libre del eje de baja velocidad que se encuentra fuera de la góndola, se ubica el cabezal del rotor. Los orificios para la unión son alineados y a través de ellos se introduce un perno M4x40, el cual es fijado con su respectiva tuerca.
25. En el extremo libre del eje de alta velocidad que se encuentra fuera de la góndola, se ubica la primera brida, que fue diseñada con el objetivo de unirse a este eje. Sus agujeros son alineados para luego introducir un perno M4x20, el cual es fijado en posición con su respectiva tuerca.
26. Ambas partes de la base son introducidas debajo de la góndola en las ranuras ubicadas en el extremo frontal y posterior. Se recomienda su fijación por medio de adhesivos.
27. La base se atornilla o es apernada a una superficie rígida como lo puede ser una tabla, para esto existen orificios de 4 mm de diámetro en las patas de la base.
28. Con la góndola de pie, es posible instalar las aspas del rotor, cuidando que estas apunten en la dirección adecuada. Se recomienda su fijación por medio de adhesivos.
29. La segunda brida se ubica en el eje del generador pequeño y es fijada por medio de un perno M4, se debe tener cuidado de que ambos elementos se encuentren alineados de forma correcta.
30. La segunda brida es luego unida a la primera brida para generar la cupla, estos elementos son fijados por medio de cuatro pernos M4x20 y sus respectivas tuercas.
31. Para finalizar se pueden aflojar los rodamientos utilizando WD40, lo cual reduce la fricción. También se pueden lubricar los engranajes con aceite para reducir el contacto y el ruido.
32. Verificar que el movimiento del banco de ensayos es correcto, en caso negativo se deben revisar nuevamente los pasos anteriores.