

FABRICACIÓN DE UN MODELO DE TURBINA TIPO GORLOV A ESCALA DE
LABORATORIO

SEBASTIAN CAMILO BULLA AVELLANEDA

NELSON DAVID ROMERO SALINAS

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

BOGOTÁ D.C

2018

FABRICACIÓN DE UN MODELO DE TURBINA TIPO GORLOV A ESCALA
LABORATORIO

SEBASTIAN CAMILO BULLA AVELLANEDA

NELSON DAVID ROMERO SALINAS

Proyecto de trabajo de grado en la modalidad de solución a un problema de
ingeniería para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

Ing.Mco, PhD. Jorge Andrés García Barbosa

Codirector

Ing. Mca, Msc. Adriana Fernanda Alarcón Sierra

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

BOGOTÁ D.C 2018

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial al Ingeniero Jorge García por compartir su conocimiento con nosotros, por su tiempo, paciencia y esfuerzos que nos encaminaron a lograr este objetivo. A la Universidad Santo Tomás y a sus docentes por acogernos y guiarnos en nuestra formación académica y personal. ¡Orgullosamente Tomasinos!

Sebastian Bulla

En primer lugar agradezco a mi madre, por todo su apoyo, por el tiempo y esfuerzo que ha dedicado en la realización de este proyecto y por motivarme cada día a ser mejor. A mi padre le agradezco su ayuda incondicional, sin él, su conocimiento y su mente maravillosa no me hubiera sido posible llegar hasta este punto. A mi hermana, gracias por animarme en los momentos difíciles, por su voz de aliento cuando la necesité. Por último a mi novia y colega, gracias por su ayuda y su saber que facilitaron los procesos académicos en el transcurso de estos años.

Nelson Romero

Gracias a mi papá por su apoyo y amor incondicional, por tratar de hacer de mí una mejor persona, por acompañarme en cada momento importante de mi vida, en pocas palabras a él se lo debo todo. A mi amada Abuelita, que con sus consejos me levantó en los momentos en los que pude haber abandonado, valoro cada esfuerzo que hizo para llevarme a conseguir este objetivo. A mi hermana, gracias por ser la inspiración para seguir adelante.

RESUMEN

Varias regiones de nuestro país no cuentan con suministro de energía eléctrica debido a la poca accesibilidad que tienen las poblaciones para implementar los elementos necesarios en la instalación y abastecimiento del servicio. Además el uso de energías no renovables genera altos índices de contaminación y grandes daños a la vida y salud de las personas.

En respuesta a este panorama, se deben aprovechar los recursos naturales de las poblaciones para producir energía y crear los mecanismos capaces de generarla y es allí, en este ámbito, donde tiene lugar este proyecto, diseñar y fabricar una turbina hidro- cinética que convierta la energía de una corriente de agua en energía mecánica que mediante la rotación de un generador produzca electricidad.

El diseño y fabricación de la turbina hidro-cinética que se muestra en este documento está condicionado para el tamaño del canal de agua de la Universidad Santo Tomás. El uso de este canal con el rotor implementado colaborará con los estudios posteriores sobre todo en el campo de energías renovables.

De acuerdo con lo anterior, se realiza el diseño de los álabes con ayuda del software Q-Blade, los cuales serán fabricados con ABS de alto impacto. Después se procede con el diseño del eje principal, usando el criterio falla por fatiga y más adelante se hará la selección de los rodamientos.

Para comprobar el funcionamiento de Rotor Gorlov, se realizarán las pruebas necesarias en el canal de agua y en el canal de aire bajo el protocolo para experimentos y pruebas que rige en el laboratorio. Lo anterior con el fin de analizar los resultados, hacer las correcciones necesarias y concluir las recomendaciones para los usuarios y posteriores estudios sobre el sistema implementado.

CONTENIDO

Pag

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS.....	3
GENERAL	3
ESPECÍFICO.....	3
1. CAPÍTULO MARCO REFERENCIAL	4
1.1. GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA.....	4
1.2. LA TURBINA HIDROKINÉTICA TIPO GORLOV	5
1.3. CONCEPTOS TEÓRICOS.....	7
1.3.1. Número de Reynolds.....	7
1.3.2. Limite Betz.	7
1.3.3. Teoría del elemento pala.....	8
1.4. MANUFACTURA.....	10
1.4.1. Historia	10
1.4.2. Requerimientos generales para selección de materiales y procesos	10
1.4.3. Relación con la planificación de procesos y operaciones.	11
1.4.4. Selección de procesos de manufactura	11
1.5. VARIABLES DE MANUFACTURA CNC	11
1.5.1. Velocidad de Corte.....	12
1.5.2. Avance de la herramienta	12
1.5.3. Profundidad de corte	12
1.5.4. Revoluciones del husillo.....	13
1.5.5. Tiempo de maquinado.....	13
1.5.6. Potencia de corte	14
1.5.7. Variables para la selección de la herramienta.....	14
1.6. VARIABLES DE MANUFACTURA ADITIVA	14
1.6.1. Variables de máquina (Impresora)	15
1.6.1.1. Extrusor.....	15

1.6.1.2.	Movimientos X-Y	15
1.6.1.3.	Movimiento en Z	15
1.6.1.4.	Superficie de impresión horizontal	15
1.6.1.5.	Material	15
1.6.2.	Variables de impresión.....	16
1.6.2.1.	Camas de adhesión	16
1.6.2.2.	Soportes auxiliares de Apoyo	16
1.6.2.3.	Temperatura	16
1.6.2.4.	Velocidad	16
1.6.2.5.	Cáscaras (Shells).....	16
1.6.2.6.	Relleno o “infill”	17
2.	ESPECIFICACIONES Y CONDICIONES DE DISEÑO	18
2.1.	DISPONIBILIDAD DEL CANAL DE AGUA DE IMPLEMENTACIÓN.....	18
2.2.	DIMENSIONAMIENTO EN DETALLE DEL ROTOR	18
2.3.	PERFIL Y NÚMERO DE ÁLABES.....	18
2.4.	RELACIÓN DE SOLIDEZ DEL ROTOR.....	19
2.5.	CUERDA DEL PERFIL SELECCIONADO	20
2.6.	NÚMERO DE REYNOLDS.....	20
2.7.	ÁNGULO DE ATAQUE	21
2.8.	ÁNGULO DE PASO	22
2.9.	CARACTERÍSTICAS DEL ÁLABE	22
3.	DESARROLLO CAD	27
3.1.	EXPORTAR A SOLIDEDGE.	27
3.2.	MODELADO EN SOLIDEDGE.....	30
3.3.	DISEÑO DEL EJE ROTOR	34
3.3.1.	Cálculo de reacciones presentes en el eje principal.....	41
3.3.2.	Cálculo de momento resultante máximo	41
3.3.3.	Cálculo de esfuerzos alternos y medios para análisis del eje	42
3.3.4.	Selección de los rodamientos para el eje principal.....	45
4.	CAPITULO SISTEMA DE SUJECCIÓN.....	50

4.1.	REQUERIMIENTOS PARA EL SISTEMA DE SUJECCIÓN DE LA TURBINA AL CANAL DEL AGUA.	50
4.2.	ESPECIFICACIONES DE INGENIERIA.....	51
4.3.	RELACION DE REQUERIMIENTOS Y ESPECIFICACIONES	53
4.4.	OPCIONES POR EVALUAR	54
4.4.1.	Opción 1.....	54
4.4.2.	Opción 2.....	55
4.4.3.	Opción 3.....	57
4.4.4.	Opción 4.....	57
4.4.5.	Matriz de decisión	59
5.	CAPÍTULO PLANIFICACIÓN MANUFACTURA.....	62
5.1.	PLANIFICACIÓN DE LA MANUFACTURA	62
5.1.1.	Diseñar para la manufactura	62
5.1.2.	Requerimientos generales para selección de materiales y procesos	63
5.1.3.	Relación planificación de procesos y operaciones.	66
5.2.	ANÁLISIS DE ENSAMBLABILIDAD.....	68
5.2.1.	Diseño para la manufactura y ensamble.	68
5.2.2.	Implementación de “diseño para ensamble”	68
5.2.3.	Ensamble Manual.....	69
5.3.	FABRICACIÓN DE COMPONENTES.....	69
5.3.1.	Fabricación en CNC Fintech GTX-170.....	69
5.3.1.1.	Montaje de materia prima.	69
5.3.1.2.	Mecanizado de piezas.....	70
5.3.2.	Fabricación Carcaza Rodamientos	73
5.3.3.	Fabricación en Polygym Diamond.....	75
5.3.4.	Fabricación Eje.....	75
5.4.	ANÁLISIS DE ENSAMBLABILIDAD DE CONJUNTO	80
5.5.	SECUENCIA DE ENSAMBLE DEL PROYECTO	81
6.	METROLOGÍA.....	83
7.	PRUEBAS DE LABORATORIO.....	88
7.1.	TEOREMA DE SEMEJANZA Y SIMILITUD	88

7.1.1.	Semejanza de Reynolds	88
7.1.2.	Semejanza en TSR	88
7.1.3.	Coeficiente de potencia	89
7.1.4.	Semejanza de Froude	89
7.2.	PRUEBA DEL ROTOR CON AGUA EN LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS	90
7.3.	PRUEBA DEL ROTOR CON AIRE	91
7.4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	94
7.4.1.	Canal de agua	94
7.4.2.	Prueba Aire	95
7.4.3.	Análisis por semejanzas	96
8.	COSTOS	99
	RECOMENDACIONES	100
	CONCLUSIONES	101
	BIBLIOGRAFÍA	103
	Anexos	107

LISTA DE FIGURAS

	Pag
Figura 1. Fluido a través de un aerogenerador	7
Figura 2. División de palas en elementos.	9
Figura 3. Perfil Naca 0021	21
Figura 4. Ángulo de ataque.....	21
Figura 5. Ángulo de paso.	22
Figura 6. Grafica C_l vs Alpha.	23
Figura 7. Grafica C_m vs Alpha.....	24
Figura 8. Grafica C_d vs Alpha.	25
Figura 9. Grafica C_l/C_d vs Alpha.	25
Figura 10. Grafica de Reynolds.	26
Figura 11. Desplazamiento del flujo.....	26
Figura 12. Perfil con parámetros establecidos.	26
Figura 13. Archivo para Solid Edge.	28
Figura 14. Recuadro de conversión de datos	29
Figura 15. Perfil de puntos relacionados.....	29
Figura 16. Herramienta de escala.....	30
Figura 17. Alabe escalado.	30
Figura 18. Posición Inicial de los álabes.	30
Figura 19. Planos Paralelos.	31
Figura 20. Herramienta Operación hélice.	32
Figura 21. Vista Boceto álabes.	32
Figura 22. Rotor extruido.	32
Figura 23. Placas modificadas.	32
Figura 24. Agujero en la tapa.....	33
Figura 25. Base para el eje.....	33
Figura 26. Rotor completo	34
Figura 27 Características de eje	36
Figura 28 Tabla de Propiedades del eje	36
Figura 29 Gráfica de TSR	37
Figura 30 Diagrama de Rotor con fuerzas FL.....	38
Figura 31.Torque entregado sobre el eje.....	39
Figura 32.Figura de secciones del eje.	40
Figura 33 Diagrama de cuerpo libre del eje.	40
Figura 34 Catalogo de rodamiento 6002Z	47
Figura 35 Catalogo de Rodamiento 6000Z.	48
Figura 36. Correlaciones de las especificaciones de ingeniería.	52
Figura 37. Relación del Como y el qué.....	53

Figura 38. Opción 1 sistema de soporte.	55
Figura 39. Opción 2 sistema de paredes laterales.	55
Figura 40. Opción 2 ubicación del rodamiento.	56
Figura 41. Opción 2 ubicación para datos de salida.	56
Figura 42. Opción 3 tornillos de sujeción.	57
Figura 43. Parte Frontal del sistema	58
Figura 44. Sistema de transmisión.....	58
Figura 45. Sistema sensorial	58
Figura 46. Opción 4 sistema de soporte.	59
Figura 47. Opción Seleccionada.	60
Figura 47 Arbol de proceso para DFM.	62
Figura 49 Plano Placa Sujeción.	70
Figura 50 comparador.....	70
Figura 51 Modelo Placa Sujeción.....	71
Figura 52 Plano Placa Sujeción	71
Figura 53 Flujograma Placa Sujeción	72
Figura 54 Carcaza rodamientos CAD.	73
Figura 55 Carcaza rodamientos CAD.	73
Figura 56 Flujograma carcasa.	74
Figura 57 Torno tipo suizo PO LY GIM DIAMOND	75
Figura 58.Plano Eje	76
Figura 59.Plano Eje	76
Figura 60.Flujograma Eje.....	77
Figura 61 Rotor Gorlov CAD.	78
Figura 62 Rotor Gorlov Impresión.....	79
Figura 63 Explosionado Proyecto	80
<i>Figura 64 Diagrama de ensamble de la turbina</i>	82
Figura 65. Vista inferior metrología de placa	83
Figura 66 Metrología de placa.	84
Figura 67. Placa vista lateral.....	85
Figura 68 Metrología de eje	86
Figura 69 TSR en un álabe.....	89
Figura 70. Montaje turbina en el canal de agua.	90
Figura 71. Sistema de Canal de agua.....	90
Figura 72. Montaje turbina para aire	92
Figura 73. Tacómetro digital y anemómetro.	93
Figura 74 Gráfica de velocidad vs nivel del agua.....	94
Figura 75 Gráfica de datos de prueba de aire.	95

LISTA DE ECUACIONES

	Pag
Ecuación 1. Potencia de sistema.....	4
Ecuación 2 Número de Reynolds.....	7
Ecuación 3 Límite de Betz.	8
Ecuación 4. Fuerza de sustentación.	9
Ecuación 5. Fuerza de arrastre.....	9
Ecuación 6. Momento de cabeceo.....	10
Ecuación 7 Velocidad de corte.....	12
Ecuación 8 Avance de la herramienta	12
Ecuación 9 Revoluciones del husillo	13
Ecuación 10 Tiempo Maquinado.....	13
Ecuación 11 Potencia de Corte.....	14
Ecuación 12. Relación de solidez del rotor.	19
Ecuación 13.. Cuerda de perfil.....	20
Ecuación 14.Numero de Reynolds.....	20
Ecuación 15 Ecuación de potencia.	35
Ecuación 16.Ecuación de potencia eléctrica.....	36
Ecuación 17. Ecuación de velocidad de diseño de rotor.....	37
Ecuación 18. Ecuaciones de Torque.	38
Ecuación 19. Ecuación de fuerza de sustentación.....	38
Ecuación 20.Ecuación de fuerza de Arrastre.	39
Ecuación 21. Ecuación de momento de cabeceo.	39
Ecuación 22.Ecuación dados por flexión.	42
Ecuación 23.Ecuación de esfuerzo dados por torsión.	42
Ecuación 24. Ecuación dados por flexión.	42
Ecuación 25. Ecuación esfuerzos dados por torsión.	42
Ecuación 26. Ecuación del esfuerzo alternante prima	42
Ecuación 27. Ecuación del esfuerzo medio prima.	43
Ecuación 28. Criterio de falla por fatiga.	43
Ecuación 29. Ecuación límite de resistencia.	43
Ecuación 30.Ecuación de factor de seguridad con respecto a SY.....	44
Ecuación 31. Esfuerzo máximo.....	45
Ecuación 32.Carga equivalente.	45
Ecuación 33. Ecuación de vida de horas de servicio.	46
Ecuación 34. Ecuación de vida estimada.	46
Ecuación 35 carga dinámica.....	47
Ecuación 36. Ecuacion de carga dinámica.	47
Ecuación 37.Ecuación de par de arranque.	48

Ecuación 38 Perdida total de un rodamiento.	49
Ecuación 39.Semejanza de Reynolds.	88
Ecuación 40. Top Speed Ratio. (TSR).....	88
Ecuación 41. Coeficiente de potencia.....	89
Ecuación 42. Semejanza de Froude.	89
Ecuación 43.Equivalencia con número de Reynolds.	91
Ecuación 44. Semejanza Match.....	96
Ecuación 45. Potencia de disponible del fluido.	98
Ecuación 46.Potencia disponible del rotor.	98
Ecuación 47.Betz	98

LISTA DE TABLAS

	Pag
Tabla 1. Características del alabe.....	22
Tabla 2. Puntos exportados de QBLADE.....	27
Tabla 3 . Velocidades Acueducto Bogotá	35
Tabla 4 Reacciones en el eje.....	41
Tabla 5.Tabla de momento resultante.	41
Tabla 6. Tabla de factores para el cálculo del límite de resistencia.	44
Tabla 7 Factor de carga equivalente.....	45
Tabla 8. Requerimientos y nivel de prioridad	50
Tabla 9. Especificaciones de ingeniería.....	51
Tabla 10. Matriz de decisión para alternativas de diseño.	59
Tabla 11.Requerimientos de materiales.	63
Tabla 12.Selección del material para el rotor.....	63
Tabla 13.Selección de material para la placa de sujeción y carcaza.	64
Tabla 14.Selección de material del eje.	65
Tabla 15. Relación placa de sujeción y carcaza.	66
Tabla 16.Relación eje principal.....	67
Tabla 17. Relación de rotor.....	67
Tabla 18. Tabla parámetros de impresión.	78
Tabla 19. Tabla DFMA de ensamble.	80
Tabla 20 Resultados de metrologia	83
Tabla 21 Datos de metrología.....	84
Tabla 22 Metrología de placa vista lateral.	86
Tabla 23 Metrología del eje	86
Tabla 24 Datos de Experimento de Laboratorio en canal de agua.	91
Tabla 25 Tablas de propiedades termodinámicas.	92
Tabla 26 Datos de velocidad de aire en prueba de aire.....	93
Tabla 27 Datos obtenidos del prueba de aire.	93
Tabla 28 Velocidad Promedios de Prueba en canal de agua.	94
Tabla 29 Tabla de datos de prueba de aire.	95
Tabla 30 Tabla de relacion de datos de fluidos en pruebas.....	96
Tabla 31 Tabla de Reynolds de los fluidos.	96
Tabla 32 Tabla de número de Mach.	97
Tabla 33 Tabla de número de Froude.....	97
Tabla 34 Tabla de TSR.....	97
Tabla 35 relacionamiento de energía cinética en fluidos.	98
Tabla 36 Limite de Betz.	98
Tabla 37 Costos Turbina.....	99

LISTA DE ANEXOS

	Pag
Anexos A. CÁLCULO DE FUERZAS GENERADAS EN LOS ÁLABES.....	107
Anexos B. DISEÑO EJE	108
ANEXOS C. CÁLCULO DE FACTORES DE SEGURIDAD.....	110
ANEXOS D. EJE PLANOS, HOJA DE PROCESO, Y CÓDIGO G	116
ANEXOS E. PLANOS PLACA Y HOJA DE PROCESO.....	126
ANEXOS F. PLANO CARCASA	135
Anexos G. PLANO ROTOR Y HOJA DE PROCESO	136
Anexos H . PLANO PROYECTO Y PLANO TOTAL	143

INTRODUCCIÓN

Muchas regiones de nuestro país no cuentan con suministro de energía eléctrica debido a la poca accesibilidad que tienen las poblaciones para implementar los elementos necesarios en la instalación y abastecimiento del servicio. Además el uso de energías no renovables genera altos índices de contaminación que afectan el medio ambiente y ocasiona grandes daños a la vida y salud de las personas.

Como respuesta a esta problemática, se deben aprovechar los recursos naturales de las poblaciones para producir energía y además crear los mecanismos capaces de generarla y es allí, en este ámbito, donde surge la necesidad de este proyecto, diseñar y fabricar una turbina hidro- cinética que convierta la energía de una corriente de agua en energía mecánica que mediante la rotación de un generador produzca electricidad.

El diseño de perfiles para turbo maquinaria busca definir la geometría de un cuerpo, con el fin de satisfacer características hidrodinámicas como: coeficiente de resistencia al avance, coeficiente de levantamiento, fineza hidrodinámica, coeficiente de momento de cabeceo, distribución de presiones o en su defecto distribución de velocidades, retardo en la transición de flujo laminar a flujo turbulento; características de naturaleza estructural como: momento de inercia, área, esfuerzos de compresión, tensión y de corte.

Cumplir con las anteriores características de diseño, en perfiles de turbo maquinaria, suele implicar geometrías complejas. Estas geometrías suponen también un reto en cuanto a los procesos de manufactura, que suelen ser elaborados y costosos. Aun así, es preciso desarrollar prototipos experimentales a escala, que permitan comprobar los modelos teóricos.

En este sentido el grupo de investigación GEAMEC, de la Universidad Santo Tomás, está desarrollando una turbina tipo Gorlov. Parte de este proyecto es

hacer un modelo a escala de la misma, que pueda ser adaptado al canal de agua del laboratorio de fluidos, con los fines de obtener material didáctico, y colaborar con el crecimiento en el ámbito institucional e investigativo por parte de docentes y estudiantes de la facultad.

La investigación, diseño y ejecución de rotores hidro-cinéticos tipo Gorlov, supone para la Universidad Santo Tomás estar a la vanguardia en la implementación de este tipo de proyectos, que pueden pasar del plano académico a ser parte de las soluciones viables de problemáticas reales.

OBJETIVOS

GENERAL

- Implementar un modelo a escala de rotor para turbina tipo Gorlov, para el laboratorio de mecánica de fluidos.

ESPECÍFICO

- Dimensionar hidrodinámicamente el rotor de una turbina tipo Gorlov para el funcionamiento en el canal de laboratorio de mecánica de fluidos
- Planificar el proceso de manufactura para la obtención del modelo del rotor.
- Manufacturar el modelo experimental de rotor para la turbina tipo Gorlov como material didáctico.

1. CAPÍTULO MARCO REFERENCIAL

1.1. GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

La generación hidroeléctrica se basa principalmente en el aprovechamiento de las corrientes de flujo en los mares y ríos por medio de turbinas que se conectan a generadores para producir electricidad por energías limpias. En este proceso las turbinas hidro-cinéticas dan ciertas ventajas, ya que no se requiere la construcción de presas o canales que distribuyan el agua o la fuercen para determinado sistema. Estas turbinas hidro-cinéticas son instaladas sobre estructuras flotantes o ancladas al fondo del lecho acuático, principalmente se deben ubicar cerca de la superficie para aprovechar las máximas velocidades de las corrientes de los flujos, que son aproximadamente el 20% de las corrientes de las fuentes hídricas .[1] La potencia disponible en estas corrientes se calcula mediante la ecuación de potencia por unidad de área [2].

Ecuación 1. Potencia de sistema

$$\frac{\dot{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3.$$

Fuente: [2]

Donde.

ρ : Densidad del agua.

A: Área de barrido de la turbina.

V: Velocidad promedio del río.

P: Potencia del sistema

Las turbinas eólicas son la base de funcionamiento de las hidro cinéticas, ya que el principio es el mismo, lo que las diferencia es el fluido de trabajo, debido a que este es más denso y viscoso, permitiendo mayor aprovechamiento energético de las corrientes de los flujos.

La clasificación de las turbinas hidro-cinéticas se da por la disposición del eje, es decir si este es vertical u horizontal. Las turbinas de eje horizontal requieren estar dispuestas en la dirección de la corriente, por esa razón tienen un alto costo de manufactura por la forma de sus álabes que deben ser lo suficientemente rígidos para soportar las cargas hidrodinámicas, sin llegar a sufrir alguna ruptura por la fatiga generada en el material. [4]

Ya en las turbinas de eje vertical, la dirección del eje es perpendicular a la dirección de la corriente del flujo, pero estas permiten gracias a su diseño el aprovechamiento de la energía de la corriente en cualquier dirección, generando así un valor agregado en el problema de orientación.

1.2. LA TURBINA HIDROKINÉTICA TIPO GORLOV

Fue desarrollada por el investigador y científico ruso Alexander Gorlov, consiste en unas hélices helicoidales dentro de una estructura, clasificada dentro de las turbinas verticales, eso sí con la condición de que su eje se puede ubicar de cualquier forma, pero siempre perpendicular a la corriente del flujo. [5] Gracias a sus álabes de forma helicoidal aprovechan la energía cinética del agua en mayor proporción y eficiencia, alcanzando velocidades hasta 3600 rpm, con bajos niveles de agua (0.40-0.70m)[6], resultando conveniente para generar electricidad en ríos de poca profundidad o en épocas de verano.

Este tipo de turbina es de diseño, construcción y compleja fabricación, sin embargo, ha demostrado ser un dispositivo eficiente en aerogeneradores. [7] En el caso de implementarse en los ríos se pueden colocar seguidas para generar mayor potencia y aprovechamiento de la corriente, este proceso tiene un bajo nivel de impacto ambiental, ya que por el ángulo y distancia entre sus álabes es posible el paso de fauna marina.[5]

La ejecución de trabajos con turbinas Gorlov y el análisis de los resultados discutidos a permitido su mejoramiento y evolución. Respecto a este tema

podemos encontrar algunos casos en particular. El primero es el trabajo realizado por Campos [8] en el canal de riego Latacunga en la provincia de Cotopaxi – Ecuador. Allí se llevó a cabo un análisis técnico–económico de la utilización de un rotor Gorlov, de 0.6 m de alto por 0,45m de diámetro con un perfil NACA 0018 para una velocidad de flujo de 1,2 m/s. Se realizaron simulaciones para estudiar las fuerzas que intervienen en su funcionamiento y la determinación del rendimiento.

Por otra parte, está el trabajo realizado por Abril [9], en el cual se reportaron las pruebas realizadas en un canal de laboratorio de una turbina Gorlov diseñada de acuerdo a las condiciones hidrológicas del río Vaupés en Mitú-Colombia, que genera 111,67 W a una velocidad de flujo de 1,348 m/s.

Bussett [10]desarrolló una turbina Gorlov con una potencia nominal de 140 W que fue probada en un canal de práctica de remo de 1,5 m/s a 94 rpm. En el trabajo de Marturet [11]. Se desarrolló la simulación computacional del comportamiento fluido dinámico de una turbina Gorlov. De acuerdo a los resultados obtenidos su máximo rendimiento con una velocidad de flujo de 5 m/s se consigue a 10 rpm y entregando una potencia de 55 W.

Wright y Hasen [12]Trabajaron sobre la optimización del diseño de una turbina Gorlov. En esta investigación se evaluó la solidez y el número de álabes por medio de simulaciones computacionales y pruebas en laboratorio, una vez verificadas las configuraciones de diseño, se procedió a construir un modelo escala con un perfil NACA 0022 que se probó en un canal de agua para validar los resultados computacionales.

1.3. CONCEPTOS TEÓRICOS

1.3.1. Número de Reynolds.

En este trabajo es necesario conocer el número de Reynolds para poder hacer un análisis mediante el software QBlade, con el fin de establecer el ángulo de ataque que daría mayor rendimiento hidrodinámico.

El número de Reynolds es la relación que existe entre la fuerza de inercia y la fuerza de la viscosidad. Para un fluido específico la viscosidad se mantiene y la única variable que se presenta, en este caso para las turbinas hidro-cinéticas, es la longitud de la cuerda del perfil. (Ver Ecuación 2) [13], donde V_0 es la velocidad característica de los fluidos, C el área de barrido del sistema y ν la viscosidad cinemática del fluido.

Ecuación 2 Número de Reynolds.

$$Re: \frac{V_0 * C}{\nu}$$

Fuente: [14]

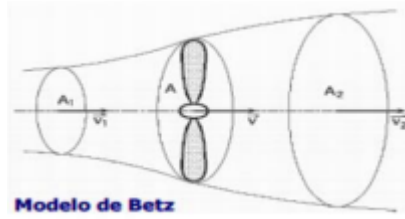
El número de Reynolds es un parámetro que permite conocer si un flujo es laminar o turbulento. [15]

1.3.2. Limite Betz.

Las turbinas hidro cinéticas están ligadas al mismo principio físico que utilizan los aerogeneradores, ya que convierten el flujo de agua en corriente eléctrica, gracias a la energía que proporciona la corriente del agua.

Como las turbinas hidro cinéticas y las turbinas eólicas son similares, hacen uso del principio del Límite de Betz. El límite de Betz expone que la velocidad antes de pasar por los álabes es una velocidad sin perturbar, mientras la velocidad de salida ya perturbada hace que la velocidad disminuya. [13]

Figura 1. Fluido a través de un aerogenerador.



Fuente: [13]

El círculo que encierra la hélice se asume como un disco de área A, donde V1 es la velocidad de entrada y V2 la velocidad de salida para encontrar la potencia útil, la cual se define como la eficiencia breve de la energía cinética del flujo del agua antes y después de atravesar las hélices en diferencia de tiempo. [13] [16]

Ecuación 3 Límite de Betz.

$$P_{Util}: \frac{1}{2} \rho A (v_1^2 - v_2^2)$$

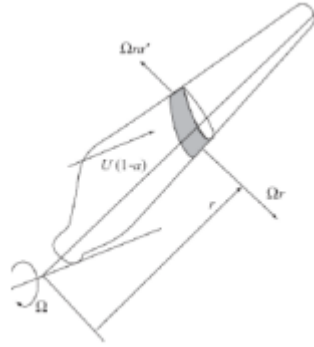
Fuente: [13]

1.3.3. Teoría del elemento pala.

La mayoría de las selecciones de álabes para turbinas eólicas en nuestro caso hidrodinámicos, se basan en el funcionamiento de palas o álabes como los de la serie NACA. Para conseguir un buen rendimiento es fundamental que, para el ángulo de ataque de trabajo exista una alta proporción entre la fuerza hidrodinámica de sustentación y la de resistencia. [17]

De acuerdo a la teoría, se evalúan las fuerzas a lo largo de todo el álabe y se considera que la pala se puede dividir en elementos infinitesimales sin interacción. Las fuerzas sobre cada elemento son calculadas mediante características de perfiles bidimensionales por lo que se desprecia los efectos tridimensionales derivados. [13] [18]

Figura 2. División de palas en elementos.



Fuente: [18]

La fuerza de sustentación (F_L), es definida como la fuerza que actúa perpendicular a la dirección de la corriente de un fluido. Esta fuerza de sustentación es proporcional al ángulo de ataque, entre mayor sea el ángulo de ataque mayor será el coeficiente de sustentación (C_l). A continuación, la ecuación 4 es utilizada para encontrar el valor de la fuerza de sustentación. [13]

Ecuación 4. Fuerza de sustentación.

$$F_L : C_L * A * V^2_0$$

Fuente: [13]

La fuerza de arrastre (F_D) actúa paralela al flujo y en sentido opuesto al avance. Esta fuerza se descompone en tres fuerzas, fuerza de arrastre por fricción, fuerza de arrastre por presión y la fuerza de arrastre inducido. A continuación, en la ecuación 5. El coeficiente de arrastre (C_d) depende de la geometría del álabe, el número de Reynolds y la rugosidad de la superficie del álabe. [13]

Ecuación 5. Fuerza de arrastre.

$$F_D = C_D * \frac{\rho}{2} * A * V^2$$

Fuente: [13]

Adicionalmente a la fuerza de sustentación y arrastre, hay un momento ejercido sobre el álabe, llamado momento de cabeceo (M). [13]

Para calcular el momento de cabeceo utilizamos la ecuación 6.

Ecuación 6. Momento de cabeceo.

$$M = C_M * \frac{\rho}{2} * C^2 + V_0^2$$

Fuente: [13]

1.4. MANUFACTURA

1.4.1. Historia

Hasta los años 80 las medidas cuantificables en la manufacturabilidad de un producto y componentes no estaban presentes en todo momento, ya después se empezó a diseñar bajo lo que está correctamente disponible para el diseñador sin tener que esperar las fechas estimadas de abastecimiento.[19]

Los diseñadores deberían poner más atención a los posibles problemas de manufacturabilidad que los han sofocado por muchos años, un ingeniero de diseño debería estar familiarizado con la manufactura para evitar costos innecesarios durante la fabricación de las piezas. Desafortunadamente en varias universidades han quitado esto de las áreas académicas debido a que muchas piensan que es un crédito desperdiciado.

1.4.2. Requerimientos generales para selección de materiales y procesos

Los requerimientos que se deben tener en cuenta para seleccionar los materiales de construcción de la turbina son los siguientes:

- Volumen de la vida de producto
- Niveles permitidos de gastos de herramientas
- Posibles categorías de la forma de piezas y niveles de complejidad

- Requerimientos de servicios y ambientes
- Factores de apariencia
- Factores de exactitud

Los aspectos anteriormente mencionados se analizan para establecer la relación entre las características de diseño y los costos de manufactura para la selección de proceso.

1.4.3. Relación con la planificación de procesos y operaciones.

Aquí hay una obvia relación entre la planeación de los procesos, la selección de materiales y la secuencia de operaciones de manufactura y máquinas determinadas, en esta etapa se estimará el costo real de la fabricación de la turbina.

1.4.4. Selección de procesos de manufactura

La selección de los apropiados procesos para la manufactura son una parte particular que se basa en la coincidencia de los atributos requeridos de la pieza y las diversas capacidades de proceso. Una vez que se ha determinado la función general de una pieza, se puede formular una lista con las características geométricas esenciales, las propiedades del material y otros atributos que se requieran.

Esto representa una “Shopping List” que debe llenarse con las propiedades del material y las capacidades de los procesos. Los atributos en la “Shopping List” están relacionados con la función final de la pieza y están determinados por las condiciones geométricas y de servicio. Estos se deben categorizar por procesos primarios, secundarios y terciarios.

1.5. VARIABLES DE MANUFACTURA CNC

En este apartado se verán las características físicas y geométricas de la pieza a fabricar, estas características condicionarán posteriormente determinados parámetros a la hora del mecanizado, tales como son velocidades de corte,

avances, profundidades de corte, así como las posibles alternativas a la hora de seleccionar las herramientas que intervendrán en la operación de mecanizado[20]

1.5.1. Velocidad de Corte

La velocidad de corte, como es sabido, es la velocidad superficial a la cual se desplaza la herramienta a lo largo de la pieza en metros por minuto[20]. En la operación de torneado a una velocidad de giro fija, la velocidad de corte variará con el diámetro de la pieza a mecanizar. Un diámetro mayor significa que hay que dar más pasadas de corte por minuto y la herramienta tendrá que ir a una mayor velocidad. El cálculo se obtiene mediante la siguiente ecuación, donde D_m es diámetro de la herramienta y n el número de revoluciones del husillo.

Ecuación 7 Velocidad de corte

$$v_c = \frac{D_m * \pi * n}{1000}$$

Fuente:[21]

1.5.2. Avance de la herramienta

Este es un valor clave para determinar la calidad de la superficie a mecanizar y para asegurar que la formación de la viruta está dentro del campo de la geometría de corte. Por tanto, este valor determinará el espesor de la viruta y la proporción de rotura de esta[20], en la siguiente ecuación n son las rpm del husillo, V_c avance por filo y F_n el número de filos.

Ecuación 8 Avance de la herramienta

$$Q = n * v_c * f_n$$

Fuente: [34]

1.5.3. Profundidad de corte

La profundidad de corte y el ángulo de posición determinarán la longitud o ancho de la viruta, es decir la longitud de la arista de corte, la cual está en contacto con la pieza.

1.5.4. **Revoluciones del husillo**

La velocidad de husillo es un factor clave para conseguir el mejor resultado de las herramientas de corte, lo cual influye en los desgastes de la herramienta y la máquina. Dm se refiere al diámetro de la herramienta y vc el avance por filo de la misma

Ecuación 9 Revoluciones del husillo

$$n = \frac{v_c * 1000}{\pi * D_m}$$

Fuente: [34]

1.5.5. **Tiempo de maquinado**

El mecanizado completo de una pieza requiere llevar a cabo una sucesión de tareas y operaciones que abarcan la preparación de la máquina, de las herramientas de corte, y el mecanizado propiamente dicho, durante el cual hay lapsos de tiempo en los que hay remoción de virutas y lapsos que solo involucran maniobras pasivas indispensables, pero de carácter improductivo[22].

Entre los tiempos improductivos pueden citarse: colocación y retiro de la pieza, de herramientas, maniobras de reglaje, cambio de herramientas, tomas de medida, cambios de marcha, cambio de posición de la pieza, etc. Estos tiempos no pueden cuantificarse previamente con precisión, solo pueden hacerse estimaciones que variarán con el tipo de máquina, de pieza y de operario.

Todas estas variables anteriormente se ven reflejados en aspectos monetarios, por lo tanto, es importante saber cómo tal, cuanto se demora el proceso de maquinado. En la ecuación Lm es longitud por mecanizar, Fn número de filos de la herramienta y n rpm del husillo.

Ecuación 10 Tiempo Maquinado.

$$T_c = \frac{l_m}{f_n * n}$$

Fuente: [36]

1.5.6. Potencia de corte

La energía específica de corte puede variar considerablemente para un material dado y es afectada por cambios en la velocidad de corte, el avance e inclinación de la herramienta, etc. Por tanto, para una inclinación de la herramienta a velocidades de corte altas y avances grandes, la energía específica de corte tiende a permanecer constante.[20]. En la siguiente ecuación a_p es la profundidad de corte, V_f velocidad de avance, a_e ancho de corte, k_c fuerza específica de corte y η eficiencia de máquina.

Ecuación 11 Potencia de Corte

$$p_c = \frac{a_e * a_p * v_f * k_c}{\eta}$$

Fuente: [34]

Este valor constante puede ser útil para determinar las fuerzas requeridas para cortar un material dado en velocidades y avances grandes.

1.5.7. Variables para la selección de la herramienta

La selección y la aplicación de las herramientas de torneado pueden llevarse a efecto mediante una serie de pasos lógicos basados en un número de factores relevantes que describen la pieza, la máquina y las operaciones concernientes. Equipado con un plano de la pieza, las especificaciones del material de esta, así como la información necesaria de las herramientas de corte, puede seguirse una rutina de selección, aplicación y optimización del torneado[3].

1.6. VARIABLES DE MANUFACTURA ADITIVA

En términos generales, la técnica de extrusión vertical de material y deposición en movimiento X-Y capa a capa, tiene varias características propias que deben examinarse con detenimiento y evaluar cómo repercuten en el objeto impreso.

1.6.1. Variables de máquina (Impresora)

1.6.1.1. Extrusor

Diámetro de la boquilla de extrusión como medida mínima de resolución X-Y y máxima de la dimensión Z[23]. El extrusor funciona depositando material de forma vertical y esto caracteriza la forma de funcionamiento de la técnica.

1.6.1.2. Movimientos X-Y

Límite o precisión dada por el método de transporte y la precisión de los motores paso a paso. Determina la dirección en la que se acumulan las distintas extrusiones de material, definiendo direcciones de mayor resistencia mecánica y resolución superficial.

1.6.1.3. Movimiento en Z

Es el movimiento que permite ajustar una resolución menor a la del diámetro del extrusor. Permite combinado con la velocidad de movimiento X-Y y la velocidad de avance del material, lograr distintos tipos de extrusiones y capas.

1.6.1.4. Superficie de impresión horizontal

Es donde se realiza la impresión, tiene una influencia importante en el acabado de la impresión de la pieza. Determina la necesidad de generación de volúmenes y accesorios como son los soportes o la cama de impresión.

1.6.1.5. Material

De los mayores atractivos de esta técnica es la posibilidad de ser utilizada con innumerable cantidad de materiales. El material define los rangos de velocidad, resolución, temperatura, que debe tener la impresión. En este caso se trabajó con los polímeros ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y PLA (Ácido Poliláctico).

1.6.2. Variables de impresión

1.6.2.1. Camas de adhesión

Son estructuras opcionales generadas por software que permiten aumentar la superficie de contacto entre la pieza impresa y la superficie horizontal de soporte[23]. Se utiliza generalmente cuando el material a imprimir tiene baja adhesión o pocos puntos de contacto con la superficie, logra más estabilidad de la pieza durante la impresión.

1.6.2.2. Soportes auxiliares de Apoyo

Debido a que la impresión se realiza capa a capa en secuencia sobre una superficie plana horizontal, las piezas que por sus características formales o por su disposición en la máquina contienen partes voladas con determinadas características, estas deben ser soportadas desde el “piso” con estructuras auxiliares. En el caso de este los álabes del rotor por su forma helicoidal y sin ninguna estructura que las soportara, se coloca este soporte auxiliar para que durante la impresión no perdieran la forma.

1.6.2.3. Temperatura

Una variable muy importante en la extrusión de polímeros, tanto el extrusor como la superficie de apoyo deben estar a temperaturas determinadas, esa temperatura está definida por el tipo de material y sus características físicas y por configuraciones particulares, como son la velocidad de impresión elegida.

1.6.2.4. Velocidad

La velocidad de desplazamiento del cabezal de impresión y la velocidad de la extrusión de material, en ambos casos, estas variables dependen del material que se está extruyendo y de la configuración de temperatura, resolución Z, etc.

1.6.2.5. Cáscaras (Shells)

Los modelos 3D digitales son procesados en términos generales “de afuera hacia adentro”. Se pueden configurar la cantidad de shells que tendrá una pieza, y estas

serán extrusiones de espesor igual al diámetro del extrusor, colocadas una junto a la otra hacia el interior de la pieza. Una vez que culmina la cáscara o shell, comienza el relleno[23].

1.6.2.6. Relleno o “infill”

Es la parte central de la pieza y está separado por el exterior mediante las cáscaras. Habitualmente no podemos verlos, salvo durante la fabricación. El relleno puede ser configurado en distintas densidades y patrones de entramados.[23] Tanto el tipo de trama como la densidad de esta afectan a las características mecánicas de la pieza final, pues afecta directamente su resistencia ante esfuerzos externos.

2. ESPECIFICACIONES Y CONDICIONES DE DISEÑO

2.1. DISPONIBILIDAD DEL CANAL DE AGUA DE IMPLEMENTACIÓN

La turbina, está restringida por las dimensiones morfológicas del canal, tales como la profundidad, ancho y largo de este, al igual que el flujo y volumen de agua que correrá dentro del mismo.

Estas características son la guía para el diseño de este rotor, y las condiciones que hay que tener en cuenta son:[24]

- El diámetro de la turbina no puede ser mayor a 0.7 veces la altura del canal.
- La altura del rotor no debe ocupar más del 50% de la altura del canal.
- La densidad del agua en Chapinero, Bogotá es determinada por la temperatura de la zona que en promedio se tiene de 11°C correspondiendo así a 998 Kg/m³
- La velocidad promedio es de 0.7 m/s determinada por un informe de laboratorio de este canal.

2.2. DIMENSIONAMIENTO EN DETALLE DEL ROTOR

En este capítulo se procede hacer el cálculo y diseño del rotor, en el cual se deben determinar los siguientes cálculos.

- Relación de solidez del rotor.
- Número de álabes
- Selección de perfil, cuerda, ángulo de ataque, longitud, ángulo de paso.

2.3. PERFIL Y NÚMERO DE ÁLABES

La cantidad de los álabes que deben ir en el rotor están determinadas por varios factores como: la eficiencia que aportan al rotor y el impacto ambiental que se puede generar, es importante decir aquí que para efectos de este proyecto el

impacto ambiental no es un objeto clave, por lo tanto, nos enfocaremos en la fabricación de este rotor como medio e instrumento para investigación, educación y aprendizaje en el laboratorio de mecánica de fluidos de la universidad. Según el artículo escrito por Alexander Gorlov, titulado “Helical Turbine And Fish Safety” se dice que las mayores eficiencias se presentan en los rotores de tres álabes,[5] de acuerdo a esto se fabricará el rotor hidro-cinético.

Los álabes se fabricarán de acuerdo al perfil NACA 0021, estos son los encargados de convertir el movimiento de un fluido en energía mecánica, en el caso de la geometría de un álabe de un rotor Gorlov, se comprenden aspectos como: tipo de perfil transversal, cuerda, longitud, ángulo de ataque y ángulo de paso; para el perfil transversal se consideraron los resultados de la investigación realizada en la tesis de maestría “Optimization of helical turbine in log head applications”, en la cual se analizan varios perfiles aerodinámicos para turbinas Gorlov,[12] y concluyen que el perfil más apropiado es el NACA 0021.

2.4. RELACIÓN DE SOLIDEZ DEL ROTOR

Esta relación de solidez se encuentra con el fin de que junto con el número de álabes que se van a utilizar, se pueda encontrar la cuerda del perfil que es la sección transversal del perfil aerodinámico. [24]

La relación de solidez está definida como la resistencia estática y dada por la ecuación 12.

Ecuación 12. Relación de solidez del rotor.

$$\sigma = \frac{3}{\pi} (d - \sqrt{3} + \text{send} + \sqrt{3}\text{cosd})$$

Fuente: [18]

d =Diámetro del rotor

$$\sigma = 0,09157896 \text{ Adimensional}$$

2.5. CUERDA DEL PERFIL SELECCIONADO

Seleccionando el perfil, el siguiente paso es la determinación de la cuerda del perfil, que es la longitud máxima que se tiene en la sección transversal del perfil aerodinámico y se calcula mediante la ecuación 13. Donde el valor de BAR está en un rango entre 10 y 51 dependiendo de la aplicación.

Ecuación 13.. Cuerda de perfil.

$$C = \sqrt{\frac{A * \sigma}{N * BAR}}$$

Fuente: [18]

$$C = 0.01895 \simeq 0.019m$$

Para este caso se utilizó un valor de 10 con el fin de obtener una cuerda más pequeña y garantizar un espaciado entre los álabes, debido a las pequeñas dimensiones del rotor.

2.6. NÚMERO DE REYNOLDS

El número de Reynolds explica y caracteriza el flujo al cual el rotor diseñado estará interaccionando, explicando si el flujo sigue un molde laminar o turbulento, por lo tanto, se calcula con la siguiente ecuación 14. Así con este número se podrá realizar la simulación en el software Q. Blade para obtener los respectivos valores del ángulo de ataque y de paso.

Ecuación 14. Número de Reynolds

$$RE = \frac{V_0 * C}{\nu}$$

Fuente: [18]

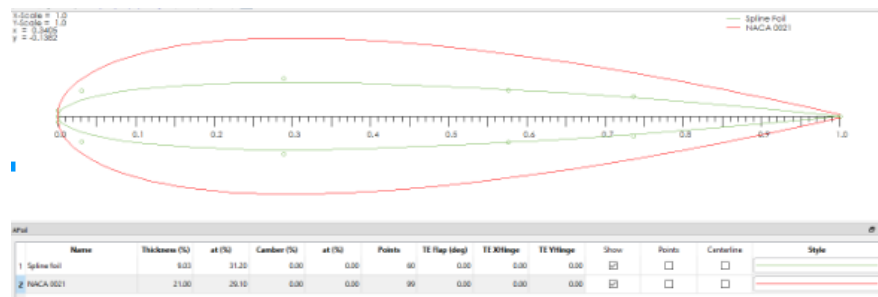
$$RE = \frac{0.7 \text{ m/s} * 0.0428m}{1.2779 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$RE = 23446.73$$

2.7. ÁNGULO DE ATAQUE

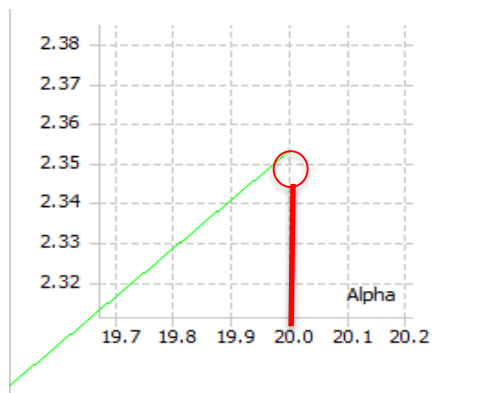
Después de encontrar el valor de la cuerda, se procede con el análisis en el software Q.Blade con el fin de determinar el ángulo de ataque para el cual el perfil anteriormente seleccionado tiene el mayor rendimiento, el cual relaciona el coeficiente de arrastre (C_D) y coeficiente de sustentación (C_L). Se debe tener presente el valor del número de Reynolds para este análisis ya que es un valor que el software necesita como parámetro de entrada.

Figura 3. Perfil Naca 0021



Fuente: [25]

Figura 4. Ángulo de ataque.



Fuente:[25]

Después de ingresar todos los parámetros en el software nos proyecta un ángulo de ataque de 20°

2.8. ÁNGULO DE PASO

Este ángulo de paso es el ángulo que forman sus álabes con respecto al vector de movimiento del fluido al eje longitudinal del rotor, el cual lo definirá el software siendo el rotor Gorlov un rotor helicoidal, es necesario el cálculo del ángulo de hélice de los álabes como función del número de álabes(n), el diámetro del rotor($\emptyset$) y la altura del rotor(h) como se muestra a continuación.

Figura 5. Ángulo de paso.



Fuente: [18]

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{n h}{\pi \emptyset} \right)$$

Fuente[18]

$$\delta = 54,32^\circ$$

2.9. CARACTERÍSTICAS DEL ÁLABE

Ya al haber calculado las características del álabes que compondrá la turbina, se busca modelar con ese perfil NACA 0021, las hélices de la turbina, a continuación, se muestra en una tabla el resumen de las características que obtendrá la hélice. A lo cual está sustentado por el software Q-Blade y además por cálculos matemáticos.

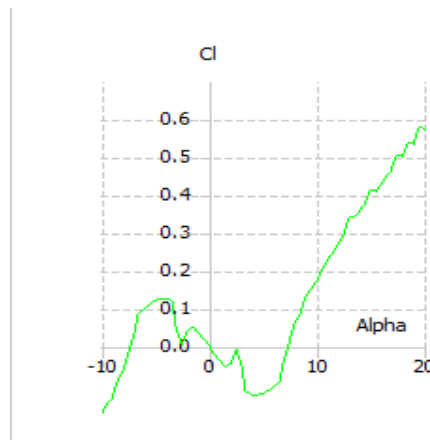
Tabla 1. Características del Álabes.

Características del álabe	
Perfil	NACA 0021
Número de Reynolds	23444,71
Cuerda (m)	0,019
Ángulo de ataque	20°
Coeficiente de Arrastre	0,257
Coeficiente de sustentación	0,584
Ángulo de paso	54,32°

Fuente: Autor

La sustentación o LIFT que genera un perfil aerodinámico depende del ángulo de ataque del vector del flujo. Esta dependencia es fundamental para el aprovechamiento del fluido que correrá a través del perfil, lo cual en la figura 6, muestra una curva típica del LIFT vs el Alpha, pero del perfil NACA 0021, esta muestra una variación semejante de -10 a 10 de alpha, pero se supera este valor y empieza a aumentar, esto se debe al fenómeno en inglés, de “stall”. Este fenómeno ocurre cuando el ángulo de ataque es demasiado alto, y se produce separación del flujo en la estela del perfil. Esta separación tiene como resultado una caída abrupta del LIFT y aumento del Drag debido a las recirculaciones producidas a la salida del flujo. En la figura 6 se muestra el punto máximo alcanzado es 20 grados.

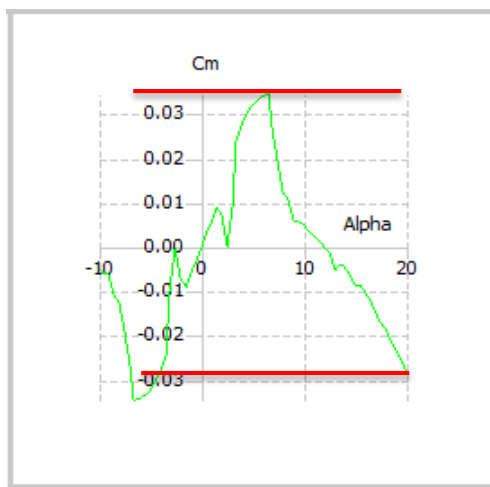
Figura 6. Grafica C_l vs Alpha.



Fuente: [25]

El grafico 7 determina la dinámica del perfil sobre su rotación y la(s) posición(es) que estable, lo cual en la figura 6, muestra su punto máximo la cual empieza descender a los 20 grados, a la del ángulo de ataque. Esto se debe a la tensión constante sobre el perfil y como la presión del flujo sobre este, genera una fuerza que es conocida como el coeficiente de momento, cuando el perfil genera cierto C_m a un cierto α , significa que tiene tendencia a rotar y de consecuencia va a variar su ángulo de ataque α .

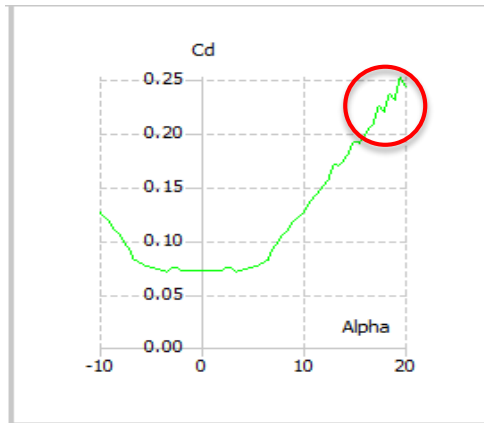
Figura 7. Grafica C_m vs α



Fuente:[25]

En la gráfica 8 se muestra el coeficiente de resistencia, la fuerza de rozamiento que opone un fluido al movimiento de un objeto sólido. La fuerza de rozamiento es proporcional al cuadrado de la velocidad relativa V del objeto respecto del fluido y la constante de proporcionalidad, denominada coeficiente de arrastre C_D que depende a su vez del número de Reynolds. Arrojando el dato de resistencia en α a 20° , siendo este valor mayor a los α menores de 20° , ósea nos genera más coeficiente resistencia. el aprovechamiento de la fracción cinética del fluido será mayor, pero también influenciará en su rotación y eficiencia.

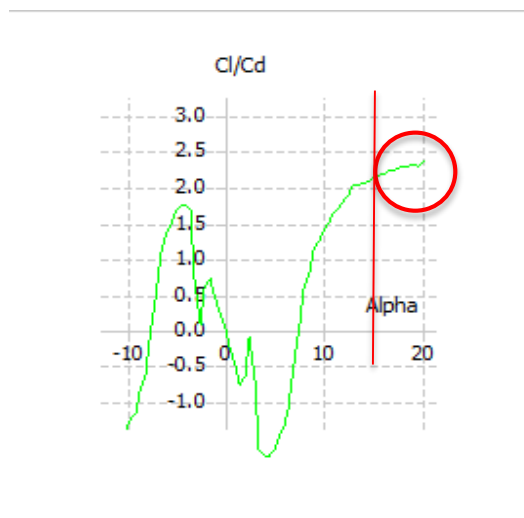
Figura 8. Grafica C_d vs Alpha.



Fuente: [25]

En la siguiente gráfica muestra la relación del CL/CD vs Alpha, lo cual determina en qué punto hay mayor relación y eficiencia aerodinámica, y por ende es el mejor ángulo de ataque para la rotación y aprovechamiento del fluido que pasa por el álabe, su eficiencia iría entre los 15 y 20° .

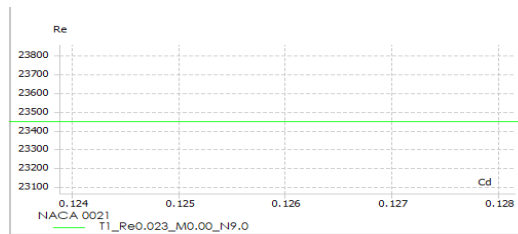
Figura 9. Grafica CL/CD vs Alpha.



Fuente:[25]

En la grafica de reynolds, se muestra un valor constante, ya que el flujo es de un caudal muy bajo y no percibe muchas turbulencias en su trayecto, esta grafica es puesta para la comprobacion del resultado en la ecuacion 2.4 de calculo del Reynolds.

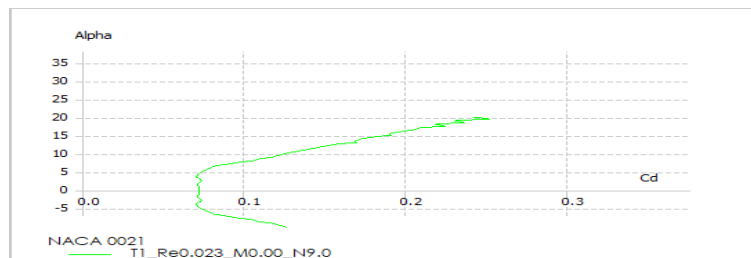
Figura 10. Grafica de Reynolds.



Fuente: [25]

Esta grafica muestra como es el comportamiento del fluido sobre el perfil NACA 0021, que permite visualizar las líneas de desprendimiento del flujo, al momento del choque con el ángulo de ataque.

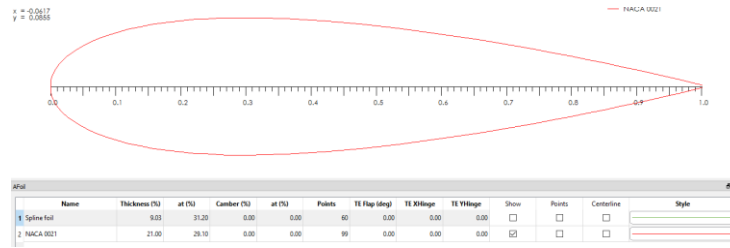
Figura 11. Desplazamiento del flujo.



Fuente: [25]

Ya el perfil queda diseñado para los parámetros que se necesita. En una escala unitaria, que luego debe ser escalado a la longitud de la cuerda.

Figura 12. Perfil con parámetros establecidos.



Fuente: [25]

3. DESARROLLO CAD

Este capítulo se basa en utilizar un software para crear un modelo 3D, con el fin de saber cómo se ve un perfil con las especificaciones requeridas. A continuación, en un software CAD “SOLIDEDGE” se buscará crear la hélice con ese perfil, para así modelar el rotor Gorlov.

3.1. EXPORTAR A SOLIDEDGE.

El primer paso después de haber utilizado el software QBLADE, es exportar los datos de los puntos de este, para así proyectarlos en el software CAD “SOLIDEDGE”, generando así un perfil que daría la forma de la hélice, los puntos tomados son a partir del perfil unitario del perfil ya estandarizado.

Tabla 2. Puntos exportados de QBLADE.

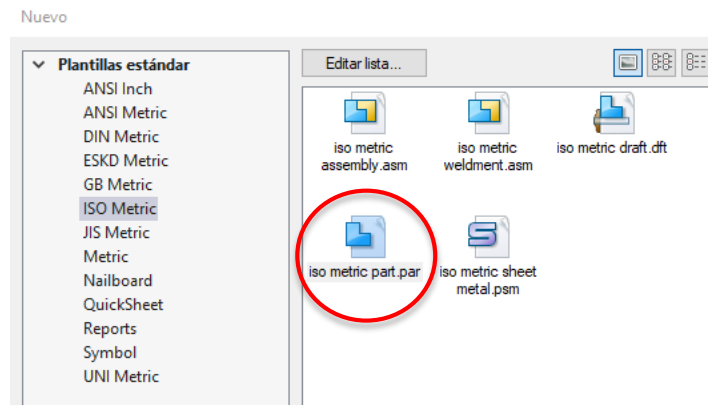
NACA 0021		0.56607	0.08456
1.00000	0.00220	0.53680	0.08833
0.99280	0.00396	0.50774	0.09178
0.97989	0.00708	0.47895	0.09488
0.96352	0.01097	0.45050	0.09762
0.94455	0.01537	0.42246	0.09996
0.92350	0.02014	0.39488	0.10188
0.90075	0.02517	0.36782	0.10336
0.87658	0.03037	0.34135	0.10439
0.85123	0.03567	0.31551	0.10494
0.82489	0.04101	0.29035	0.10499
0.79774	0.04634	0.26594	0.10455
0.76991	0.05163	0.24231	0.10360
0.74154	0.05684	0.21951	0.10214
0.71275	0.06193	0.19760	0.10016
0.68365	0.06687	0.17661	0.09767
0.65434	0.07163	0.15660	0.09468
0.62492	0.07619	0.13760	0.09118
0.59547	0.08051	0.11965	0.08721
		0.10280	0.08276
		0.08709	0.07787

Fuente: [25]

Qblade nos da la opción de exportar los datos en un archivo bloc de texto, para poderlo llevar a SolidEdge se deben pasar a un archivo en Excel con el fin de poderle indicar cuáles son los puntos en (AXIS X) y en (AXIS Y). Posteriormente se guarda el archivo para después abrirlo desde Solid Edge.

Cuando se trata de abrir el archivo desde Solid Edge el programa no va a reconocer el formato del archivo, por lo que solicita que lo abra desde uno de los formatos que este reconoce. De esta forma se debe seleccionar ISO METRIC PART como se muestra en la figura13.

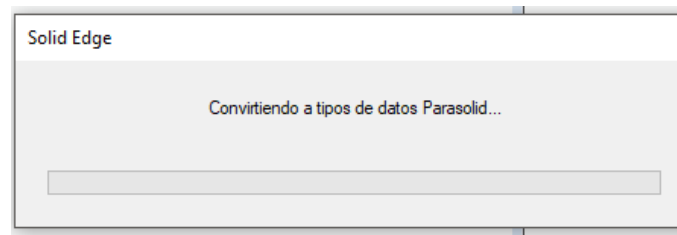
Figura 13. Archivo para Solid Edge.



Fuente: [26]

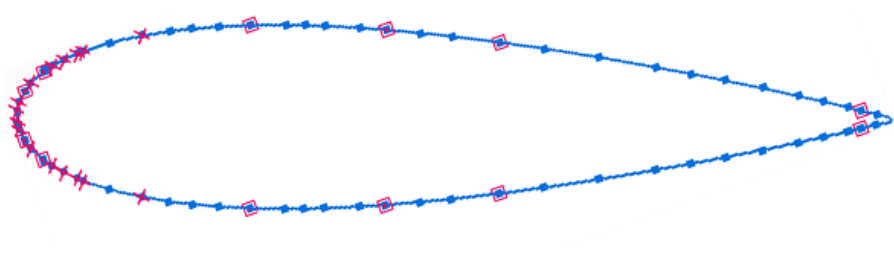
El software procesa los datos, convirtiendo los puntos de AXIS en puntos para el boceto.

Figura 14. Recuadro de conversión de datos



Fuente: [26]

Figura 15. Perfil de puntos relacionados

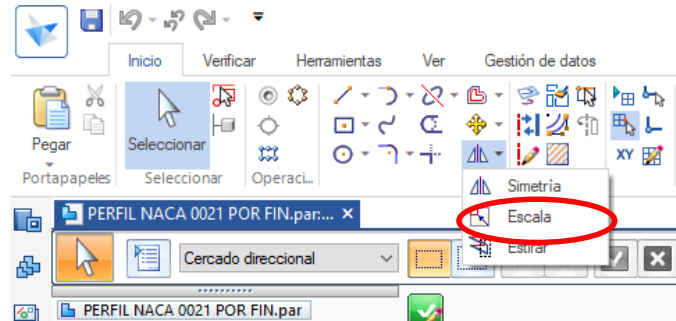


Fuente: [26].

3.2. MODELADO EN SOLIDEDGE.

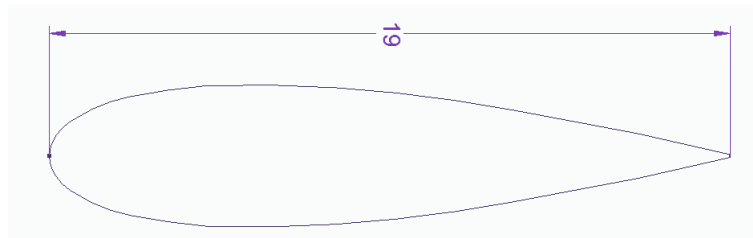
Abriendo el documento de Excel de los puntos con Solid Edge, este genera el perfil del álabe, al cual más adelante con la herramienta de Escalar que se muestra en la siguiente imagen, se logra dar la medida calculada.

Figura 16. Herramienta de escala.



Fuente: [26]

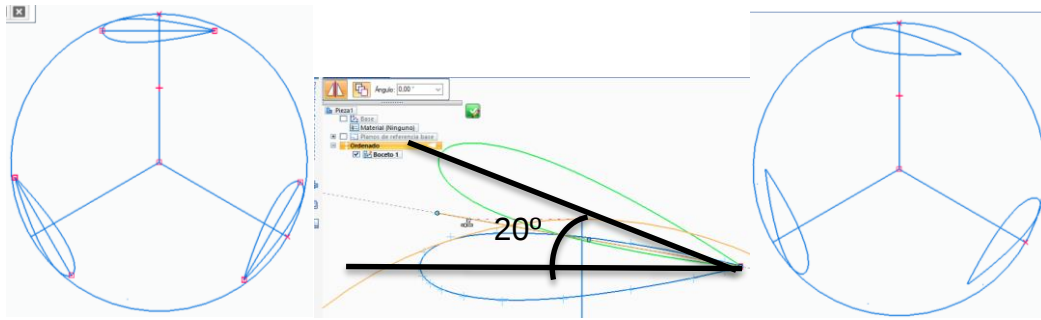
Figura 17. Álabe escalado.



Fuente: [26]

Teniendo el perfil, se traza una línea a 20 grados por la mitad del perfil para definir el ángulo de ataque 20° el cual fue calculado anteriormente mediante el programa Q.Blade y con la herramienta de simetría, se crea un perfil por la línea trazada, así consiguiente se utiliza la herramienta patrón circular para definir la posición de inicio de los álabes de la turbina desde su centroide calculado por SOLIDEDGE, así como se muestra en la imagen16.

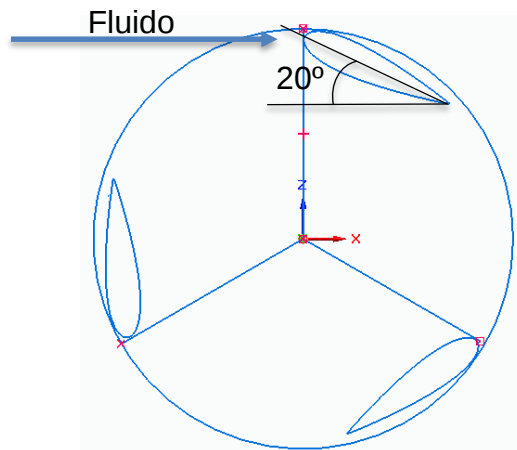
Figura 18. Posición Inicial de los álabes.



Fuente: [26]

En la anterior imagen los álabes fueron posicionados en todo su centroide, para así al momento de girarlos sobre el centro del eje, fueran correctamente rotados, lo cual se  utiliza la herramienta de rotar para que los perfiles queden detrás de las líneas que dividen la circunferencia.

Figura 19. Planos Paralelos.



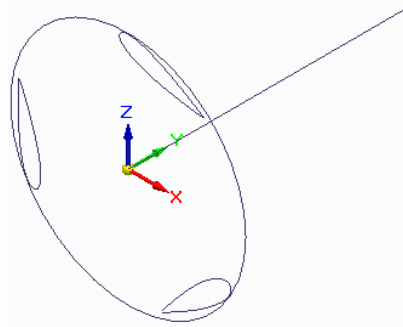
Fuente: [26]

Después de dejar el boceto listo, se traza una línea, que va a actuar como el eje de extrusión de hélice de los perfiles que se muestran en la figura 20, y así utilizando la  herramienta hélice, se selecciona los perfiles y se le describe al sistema como debe ser la extrusión de estos en el círculo amarillo de la figura 20, después en el círculo rojo de la figura 20 se le selecciona la forma de la hélice, que en el caso del presente trabajo se utilizó longitud de eje y paso.

Figura 20. Herramienta Operación hélice.

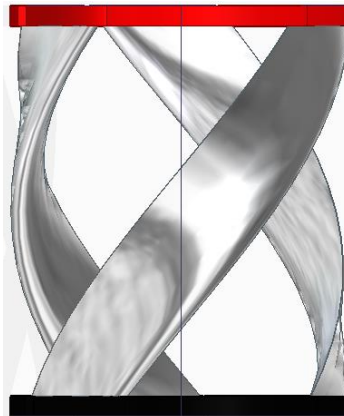


Figura 21. Vista Boceto álabes.



Fuente: [26]

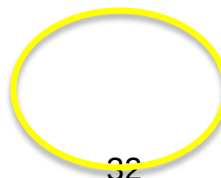
Figura 22. Rotor extruido.

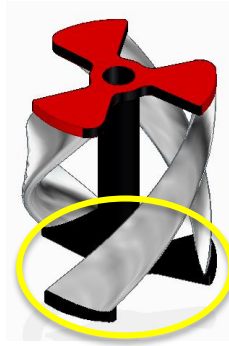


Fuente: [26]

Con el fin de disminuir el peso de la turbina, se hace arreglos a las dos tapas de la turbina, como se muestra en la siguiente Figura 22. Los cuales no interfieren con el proceso de rotación del rotor

Figura 23. Placas modificadas.





Fuente: [26]

En el siguiente paso se realiza un agujero para ensamblar el eje que va a transmitir el torque, como se muestra en la Figura 23.

Figura 24. Agujero en la tapa.



Fuente: [26]

Se procede a realizar la base para atornillar el eje al rotor con su correspondiente agujero, y un tipo de carcasa para este, lo cual se muestra en la figura 24.

Figura 25. Base para el eje



Fuente: [26]

En la Figura 25 se muestra el isométrico del rotor de la turbina con sus correspondientes detalles.

Figura 26. Rotor completo



Fuente: [26]

3.3. DISEÑO DEL EJE ROTOR

En este capítulo se hace el diseño del eje principal, este diseño se realiza haciendo un análisis por fatiga ya que el eje es el elemento encargado de transmitir el movimiento.

Según el periódico “el tiempo” en una entrevista que se le hizo al gerente de Planeamiento del Acueducto, Luis Fernando dice para que ese servicio llegue a cada vivienda y con la misma presión y velocidad (3,6 km por hora en su máximo y como mínimo 2,0 km por hora) a todos los puntos cardinales, se han construido

más de 560 kilómetros de red matriz (que incluyen 14 km de túneles por donde corre el agua) y 8.500 km de tuberías de distribución las que llegan a las casas en una compleja red de 'autopistas' acuáticas que atraviesan el subsuelo bogotano[27].

Teniendo estos datos como base para los cálculos, el sistema no se puede diseñar con alguna de las dos velocidades porque el flujo está en constante cambio, por esto se decidió manejar tres velocidades más, generando una tabla con las nuevas velocidades promedio dentro de los rangos obtenidos.

Tabla 3 . Velocidades Acueducto Bogotá

Velocidad	Dato(km/h)	Dato(m/s)
Velocidad máxima del acueducto	3,6	1,0
Velocidad media entre promedio y máxima	3,2	0,88
Velocidad promedio	2,8	0,77
Velocidad media entre mínima y promedio	2,4	0.66
Velocidad mínima del acueducto	2,0	0,56

Fuente: autor

Con las velocidades mostradas en la anterior tabla, y con la longitud del álabe de 60 mm se pudo determinar el potencial que se puede extraer del canal.

Ecuación 15 Ecuación de potencia.

$$\bar{P} = \frac{1}{2} (\rho A V_0^3)$$

Fuente: [10]

$$\dot{W}_{ele.mín} = \frac{1}{2} \left(998 \frac{Kg}{m^3} * \pi * ((0.06m)^2) * \left(0.56 \frac{m}{s} \right)^3 \right) = 0.991W$$

$$\dot{W}_{ele.med} = \frac{1}{2} \left(998 \frac{Kg}{m^3} * \pi * (0.06m^2) * \left(0.77 \frac{m}{s} \right)^3 \right) = 2.576W$$

$$\dot{W}_{ele.máx} = \frac{1}{2} \left(998 \frac{Kg}{m^3} * \pi * (0.06m^2) * \left(1.0 \frac{m}{s} \right)^3 \right) = 5.64W$$

El material del eje usado es un acero ANSI 1045 cromado, Como el sistema hidrocínético se encuentra expuesto a perdidas en la transmisión, las turbinas hidrocínicas manejan una eficiencia máxima del 60%, en este trabajo se asumió una

eficiencia del 35% por los aspectos de velocidad y condiciones a los que está expuesta. Esto es calculado para un sistema de micro generación que sea instalado en el canal de agua.

Ecuación 16. Ecuación de potencia eléctrica.

$$\dot{W}_{ele} = \bar{\rho} * C_p * \eta_{conv}$$

Fuente: [4]

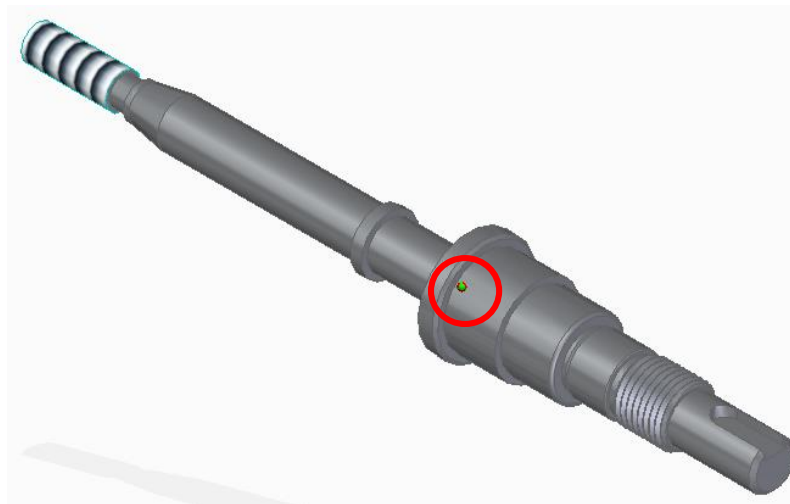
$$\dot{W}_{ele.min} = \frac{1}{2} \left(998 \frac{Kg}{m^3} * \pi * ((0.06m)^2) * \left(0.56 \frac{m}{s} \right)^3 \right) * 0.25 * 0.96 * 0.95 = 0.316W$$

$$\dot{W}_{ele.med} = \frac{1}{2} \left(998 \frac{Kg}{m^3} * \pi * (0.06m^2) * \left(0.77 \frac{m}{s} \right)^3 \right) * 0.25 * 0.96 * 0.95 = 0.822W$$

$$\dot{W}_{ele.máx} = \frac{1}{2} \left(998 \frac{Kg}{m^3} * \pi * (0.06m^2) * \left(1.0 \frac{m}{s} \right)^3 \right) * 0.25 * 0.96 * 0.95 = 1.800W$$

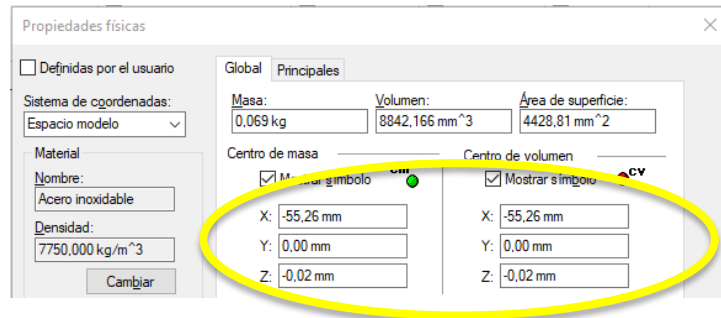
El eje de la figura 27 se muestra los cambios de sección presentes, el centro de inercia de este, de los cuales se analiza cual es la sección que presenta una mayor carga crítica.

Figura 27 Características de eje



Fuente: Autor

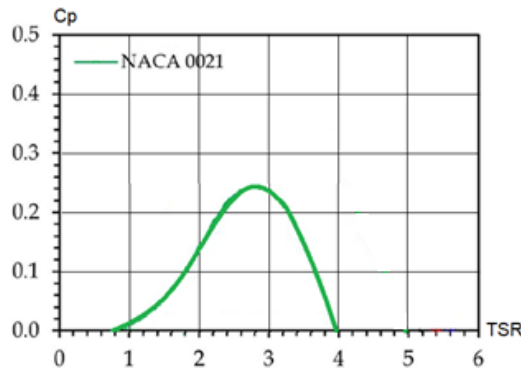
Figura 28 Tabla de Propiedades del eje



Fuente: [26]

Con la configuración establecida en la figura 29 se logró que con una velocidad específica (TSR) de 2.7 se consiguiera una relación con un C_p de 0,25, que es el valor de eficiencia para la turbina que se especificó anteriormente.

Figura 29 Gráfica de TSR



Fuente: [25]

Para determinar la velocidad con la que gira el rotor se utiliza la ecuación 17 para la velocidad de giro en una turbina de río. En la Figura 23 se muestra el diámetro total del rotor, el área de barrido por los álabes y el movimiento del eje vertical por el cual se trasmite la energía mecánica.

Ecuación 17. Ecuación de velocidad de diseño de rotor.

$$\eta_{tur} = \frac{60 * \lambda * V_0}{\pi * D_{rot}}$$

Fuente:[24]

$$\eta_{tur} = \frac{60 * 2.7 * 0.7 \frac{m}{s}}{\pi * 0.06m}$$

$$\eta_{tur} = 401,6 \text{ RPM}$$

Una vez se determinó la velocidad de giro en la turbina se calculó el torque que tendrá el sistema por medio de la siguiente ecuación

Ecuación 18. Ecuaciones de Torque.

$$T = \frac{P}{\omega}$$

Fuente: [28]

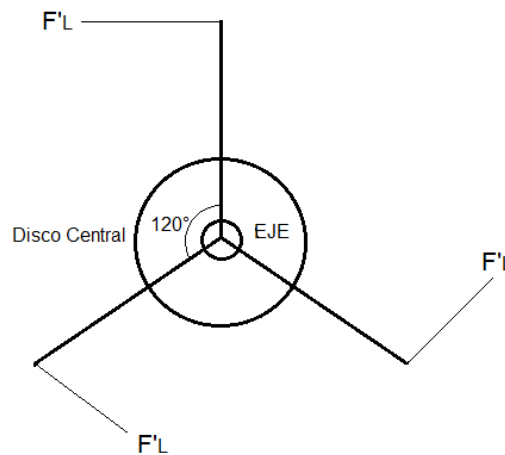
$$T = \frac{5.64W}{(401.6rpm * \frac{2\pi}{60})}$$

$$T = 0.6Nm$$

El eje se encuentra sometido a una carga de torsión la cual se produce por la fuerza de sustentación. En la figura 30 se observa el efecto de la fuerza de sustentación trasladada al eje. La carga aplicada en los tres álabes tiene el mismo valor correspondiente a 3.2415 N. Ver en anexo A

Figura de fuerza de sustentación sobre eje

Figura 30 Diagrama de Rotor con fuerzas FL.



Fuente: Autor

Ecuación 19. Ecuación de fuerza de sustentación.

$$FL = \frac{1}{2} \rho v^2 A Cl$$

Fuente:[29]

$$Fl = 3.2415 \text{ N}$$

Ecuación 20. Ecuación de fuerza de Arrastre.

$$Fd = \frac{Fl}{\varepsilon} \text{ Ó } Fd = C_D * \frac{\rho}{2} * A * V^2$$

Fuente:[30]

$$Fd = 1.3972 \text{ N}$$

Ecuación 21. Ecuación de momento de cabeceo.

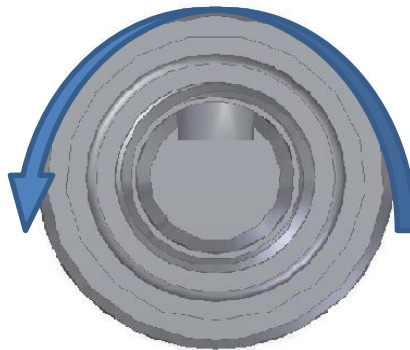
$$M = Cm \frac{\rho}{2} C^2 v^2$$

Fuente: [29]

$$M = 0.1302 \text{ Nm}$$

En la figura 31 se muestra la carga de torsión resultante en el eje. Además, la fuerza de arrastre genera una carga axial en el eje la cual se contrarresta con los apoyos que se usan en el sistema.

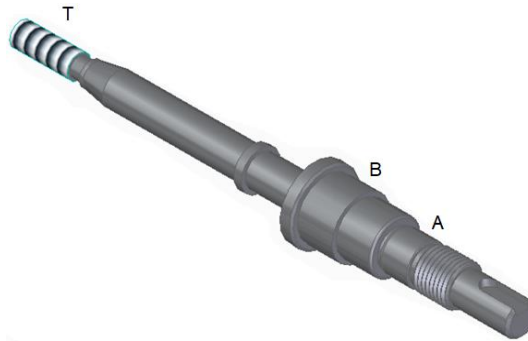
Figura 31. Torque entregado sobre el eje.



Fuente: Autor

En la figura 32 se muestra el eje principal y cada una de las secciones (numeradas T, A y B) en donde se encuentran los diferentes elementos usados como son los apoyos y el sistema de transmisión.

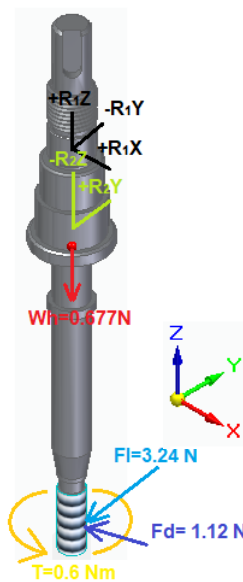
Figura 32. Figura de secciones del eje.



Fuente: Autor

De acuerdo con la figura anterior en el punto A va acoplado un rodamiento que le permite contrarrestar las fuerzas radiales, en el punto B también va acoplado a un rodamiento rígido de bolas que tiene un anillo segger para contrarrestar los movimientos axiales y radiales, la carga torsional de la figura 33 del punto T corresponde al acoplamiento con la tuerca del rotor. En la siguiente imagen se muestra un diagrama de cuerpo libre.

Figura 33 Diagrama de cuerpo libre del eje.



Fuente: Autor

De acuerdo con el diagrama de cuerpo libre del eje se realiza el cálculo de las reacciones que se presentan en el eje debido a las cargas. El valor del peso de la sección del rotor (W_h) equivale a 0.677 N, el torque ya anteriormente calculado igual 0.6 Nm y por último los prefijos de las reacciones dadas por los rodamientos. Se traslada la fuerza de sustentación y arrastre que ocurren en los álabes y generan fuerzas en el eje.

3.3.1. Cálculo de reacciones presentes en el eje principal

En el anexo B se observa el cálculo de reacciones presentes en el eje principal. En la tabla 4 se muestran los resultados de las reacciones.

Tabla 4 Reacciones en el eje.

R1x	R1y	R2y	R1z	R2z
1.125N	-62.73N	-59.49N	0.61N	0.90N

Fuente: Autor

3.3.2. Cálculo de momento resultante máximo

A partir de los diagramas de fuerza cortante y momento flector que se observan en el anexo B, se calculó cada uno de los momentos resultantes, en cada una de las secciones críticas presentes en el eje, representadas por las líneas rojas en los diagramas de cortante y flector, en el anexo B se observan los momentos resultantes calculados, en la tabla 5 se muestran los resultados de los momentos.

Con respecto a los momentos resultantes calculados, el valor máximo es M_{Br} que equivale a -106.43 Nm lo que quiere decir que:

$$M_{max} = -106.43 \text{ Nm}$$

Tabla 5. Tabla de momento resultante.

Momentos resultantes en el eje principal		
Mar	MBr	MTr
1.251Nm	108.11Nm	20.27Nm

Fuente: Autor

3.3.3. Cálculo de esfuerzos alternos y medios para análisis del eje

Ya que el eje se encuentra en rotación y sometido a cargas, el análisis de falla se realiza por fatiga. Para el análisis de los esfuerzos medios y alternantes se usarán las ecuaciones 22 y 23, se usarán para el análisis en la ecuación de teoría de falla de Von Mises.

Ecuación 22. Ecuación dados por flexión.

$$\sigma_a = Kf \frac{Ma C}{I} \quad y \quad \sigma_m = Kf \frac{Mm C}{I}$$

Fuente:[28]

Ecuación 23. Ecuación de esfuerzo dados por torsión.

$$\tau_a = Kfs \frac{Ma C}{I} \quad y \quad \tau_m = Kfs \frac{Mm C}{I}$$

Fuente:[28]

De acuerdo con la teoría planteada en [28] para el caso de un eje sólido redondo se usan las siguientes ecuaciones

Ecuación 24. Ecuación dados por flexión.

$$\sigma_a = Kf \frac{32 Ma}{\pi d^3} \quad y \quad \sigma_m = Kf \frac{32 Mm}{\pi d^3}$$

Fuente:[28]

Ecuación 25. Ecuación esfuerzos dados por torsión.

$$\tau_a = Kfs \frac{16 Ma}{\pi d^3} \quad y \quad \tau_m = Kfs \frac{16 Mm}{\pi d^3}$$

Fuente:[28]

Tomando la teoría de fallas se obtiene las siguientes las ecuaciones 26 y 27.

Ecuación 26. Ecuación del esfuerzo alternante prima

$$\sigma'_a = \sqrt{\left(Kf \left(\frac{32 Ma}{\pi d^3} \right)^2 \right) + 3 \left(Kfs \left(\frac{16 Ta}{\pi d^3} \right)^2 \right)}$$

Fuente:[28]

Ecuación 27. Ecuación del esfuerzo medio prima.

$$\sigma' m = \sqrt{\left(Kf \left(\frac{32Mm}{\pi d^3} \right)^2 \right) + 3 \left(Kfs \left(\frac{16Tm}{\pi d^3} \right)^2 \right)}$$

Fuente:[28]

Y reemplazando en el criterio de falla por fatiga de la línea de Goodman se obtiene el factor de seguridad con la ecuación 26 y 27.

Ecuación 28. Criterio de falla por fatiga.

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma a}{Se} + \frac{\sigma m}{Sut}$$

Fuente:[28]

Calculando los valores de esfuerzos alternante prima y medio prima, reemplazando en las ecuaciones 26 y 27 en el anexo C se observa el cálculo realizado.

El esfuerzo alternante por torsión es cero ya que el torque en el eje es constante

$$\sigma' a = 0.9Mpa$$

El esfuerzo medio por flexión es cero ya que corresponde a un valor medio nulo

$$\sigma' m = 0.5Mpa$$

Se calcula el valor del límite de resistencia, para esto se usa la ecuación

Ecuación 29. Ecuación límite de resistencia.

$$Se = Ka Kb Kc Ke Kf S'e$$

Fuente:[28]

En el anexo B se observa la selección de límite de resistencia a la fatiga y factores para el cálculo del límite de resistencia en la tabla 6 se muestran los resultados de los factores.

Tabla 6. Tabla de factores para el cálculo del límite de resistencia.

Límite de resistencia a la fatiga y factores						
S'e	Ka	Kb	Kc	Kd	Ke	Kf
690Mpa	0.64	0.97	1	1	0.81	1.06

Fuente: Autor

Seleccionando los factores se reemplazó en la ecuación 29 y se calculó el (Se).

$$Se = 0.64 \times 0.97 \times 1 \times 1 \times 0.81 \times 1.06 \times 690$$

$$Se = 367.78Mpa$$

Con los resultados conseguidos se reemplazan en la ecuación 28 y se calculó el factor de seguridad. El cual indica que no fallará por fatiga.

$$\frac{1}{n} = \frac{0.9}{367.78} + \frac{0.5}{690}$$

$$n = 15.28$$

Se obtuvo un factor superior a 1 lo que indica que no fallará por fatiga.

Verificación del esfuerzo máximo con respecto a la fluencia, este esfuerzo máximo se compara siempre con la resistencia a fluencia, para esto se usa la ecuación 30.

Ecuación 30. Ecuación de factor de seguridad con respecto a SY.

$$Ny = \frac{Sy}{\sigma_{\max}}$$

Fuente:[28]

Calculando el factor de seguridad con respecto a la resistencia a la fluencia, la estimación del esfuerzo máxima se puede tomar de la suma de $\sigma'a$ y $\sigma'm$.

Ecuación 31. Esfuerzo máximo.

$$\sigma_{\max} = \sigma'_a + \sigma'_m$$

Autor:[28]

$$\sigma_{\max} = 1.4 \text{ Mpa}$$

Reemplazando los valores en la ecuación 30.

$$N_y = \frac{196 \text{ Mpa}}{1.4 \text{ Mpa}}$$

$$N_y = 140$$

Calculado el factor de seguridad por fluencia se observa que el eje en el punto más crítico no fallará, está más que suficiente, ver plano eje Anexo D.

3.3.4. Selección de los rodamientos para el eje principal

Con el fin de realizar la selección de los rodamientos se tiene en cuenta las fuerzas que actúan en el eje tanto radial como axialmente, los valores obtenidos previamente fueron hallados.

Ecuación 32. Carga equivalente.

$$P = XFr + YFa$$

Fuente:

Donde X es el factor radial y Y es el factor de empuje

Tabla 7 Factor de carga equivalente.

F_d/C_0	e	$F_d/F_r \leq e$		$F_d/F_r > e$	
		X_1	Y_1	X_2	Y_2
0.014*	0.19	1.00	0	0.56	2.30
0.021	0.21	1.00	0	0.56	2.15
0.028	0.22	1.00	0	0.56	1.99
0.042	0.24	1.00	0	0.56	1.85
0.056	0.26	1.00	0	0.56	1.71
0.070	0.27	1.00	0	0.56	1.63
0.084	0.28	1.00	0	0.56	1.55
0.110	0.30	1.00	0	0.56	1.45
0.17	0.34	1.00	0	0.56	1.31
0.28	0.38	1.00	0	0.56	1.15
0.42	0.42	1.00	0	0.56	1.04
0.56	0.44	1.00	0	0.56	1.00

*Utilice 0.014 si $F_d/C_0 < 0.014$.

Autor:[31]

$$\frac{0.06273 \text{ kN}}{2.85 \text{ kN}} = 0.0134$$

Con el valor obtenido para $X=0.56$ y $Y=2.30$, reemplazando estos valores en la ecuación 32.

$$P = 0.56 \times 62.73 + 2.30 \times 0.61N$$

$$P = 36.53N$$

Se toma un valor de L_{10h} de 10000 horas de servicio

Con la ecuación (siguiente) se despejó el valor de la vida estimada en horas (L_{10}) donde n corresponde al valor de las revoluciones.

Ecuación 33. Ecuación de vida de horas de servicio.

$$L_{10h} = \frac{1000000}{60 \times n} \times L_{10}$$

Autor:[28]

Se despeja L_{10} y reemplazando se obtiene

$$L_{10} = 240$$

Usando la ecuación 34 de vida estimada se obtiene el valor de la carga dinámica

Ecuación 34. Ecuación de vida estimada.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^a$$

Autor:[28]

Despejando la carga dinámica (C) de la ecuación 35 se obtuvo el siguiente valor, el valor p es de 3 para rodamientos de bolas:

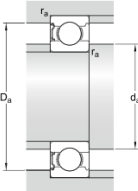
Ecuación 35 carga dinámica.

$$C = \sqrt[p]{L10}xP = 395.98N$$

Autor:[28]

Con estas características más las restricciones geométricas y de operación se selecciona el rodamiento y se verifica sus valores, el rodamiento sección A se observa en la figura 34.

Figura 34 Catalogo de rodamiento 6002Z .

Dimensiones de los resaltes			
	d_a	min.	17 mm
	d_a	max.	20.4 mm
	D_a	max.	30 mm
	r_a	max.	0.3 mm
Datos del cálculo			
Capacidad de carga dinámica básica	C	5.85	kN
Capacidad de carga estática básica	C ₀	2.85	kN
Carga límite de fatiga	P _u	0.12	kN
Velocidad de referencia		50000	r/min
Velocidad límite		32000	r/min
Factor de cálculo	k _r	0.025	
Factor de cálculo	f ₀	14	
Masa			
Rodamiento de masa		0.03	kg

Autor:[32]

Rodamiento sección B, se calculó la carga dinámica, usando la ecuación 35 despejada.

Ecuación 36. Ecuacion de carga dinámica.

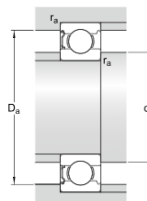
$$C = \sqrt[p]{L10}xP$$

Autor:[28]

$$C = \sqrt[3]{240}x59.49N = 369.69N$$

Se repite el mismo procedimiento para la selección del rodamiento para esta sección. Teniendo las mismas características nombradas anteriormente. Ver figura 35

Figura 35 Catalogo de Rodamiento 6000Z.

Dimensiones de los resaltes			
			
d _a	min.	12	mm
d _a	max.	14.7	mm
D _a	max.	24	mm
r _a	max.	0.3	mm
Datos del cálculo			
Capacidad de carga dinámica básica	C	4.75	kN
Capacidad de carga estática básica	C ₀	1.96	kN
Carga límite de fatiga	P _u	0.083	kN
Velocidad de referencia		67000	r/min
Velocidad límite		40000	r/min
Factor de cálculo	k _r	0.025	
Factor de cálculo	f ₀	12	

Fuente:[33]

Por último, el eje tiene que vencer un torque conocido como Par de inicio, y este dado por la ecuación 37 El par de arranque en un rodamiento se define como el momento de fricción que el rodamiento debe superar para empezar a girar, a una temperatura ambiente de 20 a 30 °C. Por lo tanto, solo se considera el momento de fricción deslizante y el momento de fricción de los sellos, si corresponde [33].

Ecuación 37.Ecuación de par de arranque.

$$M_{\text{arranque}} = Ms + Msello$$

Autor:[33]

Ms corresponde al momento de fricción total y M sello corresponde a la fricción con los sellos. Los cuales se encuentran en un catálogo de SKF

Donde Ms total calcula de la siguiente manera

Ecuación de Modelo SKF de fricción del rodamiento, para cada uno de estos elementos hay una forma de calcularlo según tablas de SKF. Visitar referencia.

Ecuación 38 Perdida total de un rodamiento.

$$M_s = M_{rr} + M_{sl} + M_{perdida\ de\ energia}$$

Fuente:[32]

$$M = 0.21 + 0.18 + 0.56$$

$$M = 0.95\ Nm$$

Reemplazando en la ecuacion 38 de par de arranque, se obtiene el valor de:

$$M_{arranque} = 1.45Nm$$

Se repite el proceso con el otro rodamiento que se encuentra presente en el eje, y se suman los dos datos obtenidos. Lo cual nos da para un total 2.56 Nm, por lo tanto, es un torque muy alto que no permite girar fácil al rotor, consiguientemente, se les hace una modificación a los rodamientos para bajar el coeficiente de M arranque. Se retiran los sellos, a su vez el aceite o lubricante, logrando quitar estos coeficientes, para así volver a recalcular el M arranque, obteniendo un valor 0.99 Nm total de los dos rodamientos.

4. CAPITULO SISTEMA DE SUJECIÓN

Este capítulo se basa en seleccionar la opción más adecuada para el soporte del rotor que se implementará en el canal.

Para cumplir lo mencionado, en este capítulo se realiza un QFD, con el fin de relacionar los requerimientos del cliente con las especificaciones de ingeniería.

También se proponen tres opciones diferentes, para más adelante evaluarlas mediante un cuadro de decisiones.

4.1. REQUERIMIENTOS PARA EL SISTEMA DE SUJECIÓN DE LA TURBINA AL CANAL DEL AGUA.

A continuación, se enumeran los requerimientos del cliente con su respectivo nivel de prioridad para el sistema de sujeción de la turbina.

En esta ponderación se propone una máxima calificación de diez y mínima de 0, como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Requerimientos y nivel de prioridad

Requerimiento	Nivel de Prioridad
1. Facil Ensamblabilidad	8.2
2. Facil Mantenimiento	7.9
3. Proteccion al Canal	8.6
4. Resistencia a la Corrosión	8.1
5. Seguro para los usuarios	8.8
6. Sistema de medición	8.4
Total	50

Fuente: Autor

De la anterior tabla podemos concluir que las principales prioridades para el sistema de sujeción de la turbina Gorlov que se va a implementar al canal son:

- Que el sistema de sujeción de la turbina garantice seguridad a las personas que hagan uso de la turbina.
- Que el canal no sufra daños debido al uso de la turbina.

4.2. ESPECIFICACIONES DE INGENIERIA

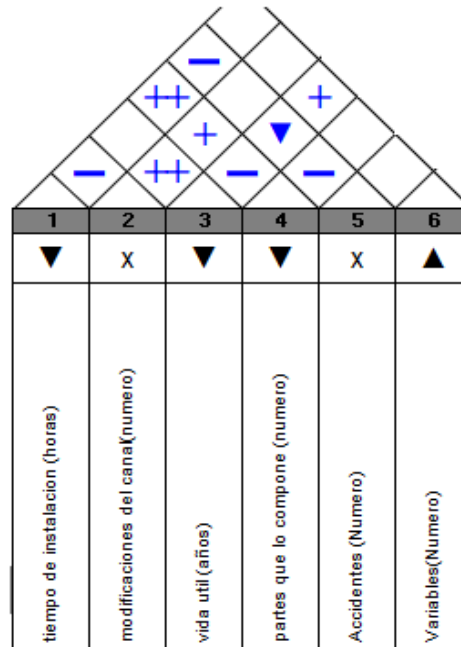
A partir de los requerimientos de cliente establecidos (Ver tabla 9) se establecerán las especificaciones de ingeniería. Las especificaciones de ingeniería se clasifican de la siguiente manera. Minimizar (▼), maximizar (▲) y estado neutral (X). La clasificación sirve para darle un grado de evaluación a las especificaciones de ingeniería. [13]

Tabla 9. Especificaciones de ingeniería.

Especificaciones de ingeniería.	Descripción.	Valor.	Unidad.	Clasificación.
Tiempo de instalación.	Tiempo en poner a funcionar la turbina.	7	Minutos	▼
Modificación del canal.	Acciones que hagan variar la originalidad del canal.	0	Numero	X
Vida Útil.	Cantidad de años de uso del sistema se sujeción de la turbina.	5	Años	▲
Partes del sistema	Partes necesarias para facilitar el ensamble del sistema.	>12	Numero	▼
Accidentes	Número de personas afectadas al usar el sistema.	0	Numero	X
Variables para medir	Cantidad de información, extraída del sistema.	3	Numero	▲

Fuente: Autor

Figura 36. Correlaciones de las especificaciones de ingeniería.



Fuente: Autor

- El tiempo de instalación está relacionado con la cantidad de piezas con las que cuente el sistema, a menor cantidad de piezas en el ensamble menor es el tiempo de instalación.
- Las modificaciones están altamente relacionadas con la vida útil del mismo. A mayores modificaciones en el canal puede llegar a disminuir su vida útil.
- La vida útil del sistema depende de la selección de los materiales que se van a utilizar, ya que se debe tener en cuenta las condiciones a las que va exponer en cada práctica. También se debe tener presente una instalación óptima para evitar dañar en el montaje y desmontaje del sistema.
- La cantidad de partes en el componente está altamente relacionada con el tiempo de instalación del sistema al canal. Ver anexo F
- La cantidad de variables que podemos determinar del sistema dependerá de la ubicación del punto de medición en el sistema.

4.3. RELACION DE REQUERIMIENTOS Y ESPECIFICACIONES

En este ítem se busca encontrar la relación de los requerimientos del cliente con las especificaciones de ingeniería.

A continuación, se encuentran 3 tipos de relación. (⊖) El cual indica la relación más alta con una puntuación de 9 puntos, (O) indica una relación media con una puntuación de 3 puntos, ▲ este ítem es el de menor relación el cual tiene una puntuación de 1. En caso de que el requerimiento de cliente y la especificación de ingeniería no tenga ningún tipo de relación no se le asigna ninguno dejándolo básico.

Figura 37. Relación del Como y el qué.

			Column #	1	2	3	4	5	6
			Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (X)	▼	X	▼	▼	X	▲
Relative Weight	Weight / Importance	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows") Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	tiempo de instalacion (horas)	modificaciones del canal(numero)	vida util (años)	partes que lo compone (numero)	Accidentes (Numero)	Variables(Numero)	
14,3	3,0	FACIL ENSAMBLABILIDAD	⊖	⊖	▲	⊖	▲	▲	
4,8	1,0	FACIL MANTENIMIENTO	⊖	▲	⊖	⊖			
23,8	5,0	PROTECCIÓN AL CANAL	▲	⊖	⊖	⊖			
9,5	2,0	RESISTENCIA A LA CORROSIÓN		▲	⊖	⊖			
28,6	6,0	SEGURA PARA EL USUARIO	▲	▲	⊖	⊖	⊖		
19,0	4,0	SISTEMA PARA MEDICIÓN		▲	▲	⊖		⊖	

Fuente: Autor

- Fácil ensamble: El sistema debe tener un tiempo de ensamble bajo para agilizar las prácticas de laboratorio. Para optimizar el ensamblaje se debe mantener la menor cantidad de piezas en el sistema y operaciones a su vez.

- **Fácil Mantenimiento:** El mantenimiento es un requerimiento importante para mantener la vida útil del canal, este no debe presentar dificultades a la hora de realizarse.
- **Protección al canal:** Se debe garantizar que la implementación del sistema de sujeción para la turbina no produzca desgaste en el canal en las partes que están en contacto. También se debe tener presente que las modificaciones al canal no están permitidas, por lo que no hacer modificaciones en el canal es importante para cumplir este requerimiento.
- **Resistencia a la corrosión:** Para cumplir este requerimiento se debe tener claras las condiciones en las que el sistema va a operar, para poder hacer una selección de materiales adecuada.
- **Seguridad para el usuario:** Este requerimiento se cumple garantizando que el sistema de sujeción de la turbina al canal preste las garantías con respecto a estabilidad.
- **El sistema de medición está relacionado con la cantidad de piezas que lleva el sistema,** ya que si el sistema queda demasiado básico será difícil tener una ubicación correcta para estos instrumentos.

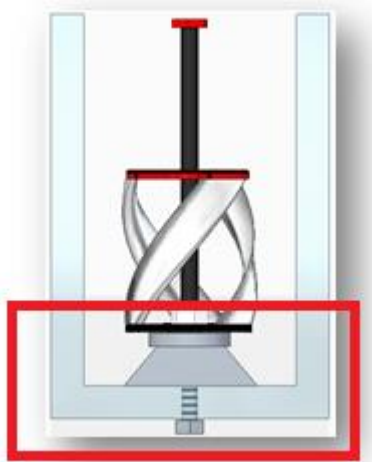
4.4. OPCIONES POR EVALUAR

A continuación, se muestran las opciones que se van a evaluar para el sistema de sujeción de la turbina.

4.4.1. Opción 1

En la primera opción se utiliza para el sistema de sujeción un tornillo el cual va sujeto al canal en la parte inferior. Para evitar filtraciones de agua por la perforación en el canal se instala una base de forma cónica. Con el fin de permitir el movimiento del eje se adecua un rodamiento de bolas. El sistema se puede ver en la figura 38.

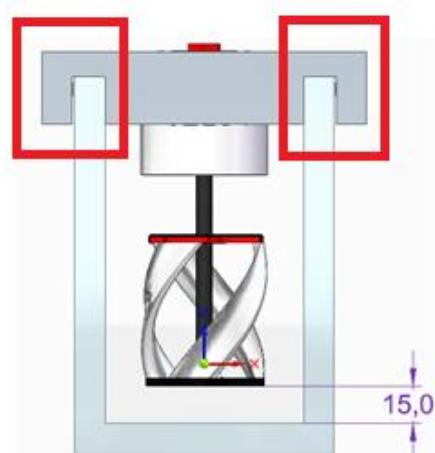
Figura 38. Opción 1 sistema de soporte.



4.4.2. Opción 2

Este sistema de sujeción, está soportado con las paredes laterales del canal, con el fin de permitir la instalación de la turbina en cualquier lugar horizontalmente. Ver figura 39. El sistema cuenta con un rodamiento de rodillos en la parte superior para permitir el movimiento del eje y contrarrestar los esfuerzos axiales que se generen. Ver figura 40.

Figura 39. Opción 2 sistema de paredes laterales.



Fuente: Autor

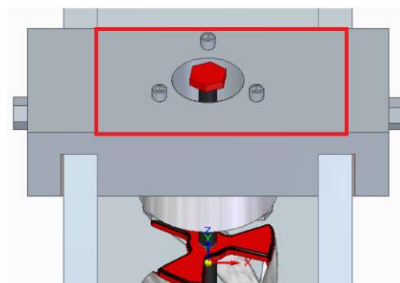
Figura 40. Opción 2 ubicación del rodamiento.



Fuente: Autor.

A continuación, en la Figura 41, se muestra la ubicación del lugar donde se conectará el dispositivo de medición que se desee implementar para tomar los datos de salida que se requieran en el laboratorio.

Figura 41. Opción 2 ubicación para datos de salida.

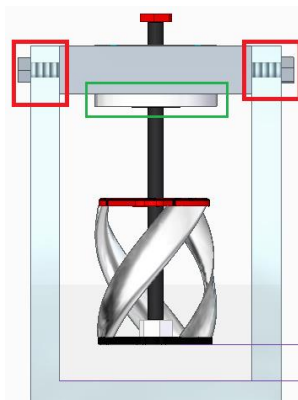


Fuente: Autor

4.4.3. Opción 3

Este sistema de sujeción cuenta con dos tornillos pasantes en ambas paredes laterales del canal. Cuenta con un rodamiento de rodillos en la parte superior para permitir el movimiento del eje y contrarrestar los esfuerzos axiales que se generen. Ver figura 42.

Figura 42. Opción 3 tornillos de sujeción.



Fuente: Autor

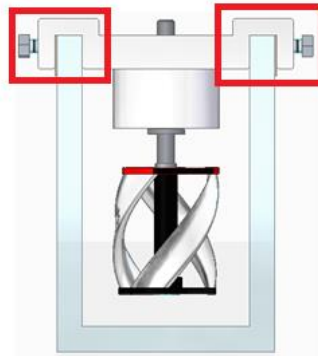
El sistema permite en la parte superior tomar los datos de salida que sean requeridos en el laboratorio de fluidos.

4.4.4. Opción 4

Esta propuesta permite el desplazamiento horizontal, dando variedad en el punto de ubicación de la turbina.

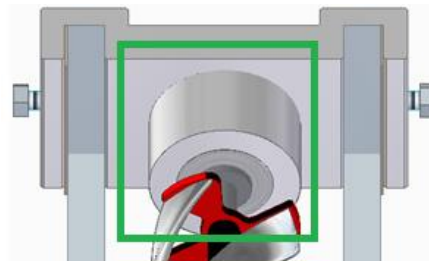
La opción, lleva dos rodamientos de bola en la parte superior del eje, tiene dos extremos roscados, uno que va al rotor y el otro para el sistema que se le quiera adaptar para medir alguna condición del rotor.

Figura 43. Parte Frontal del sistema



Fuente: Autor

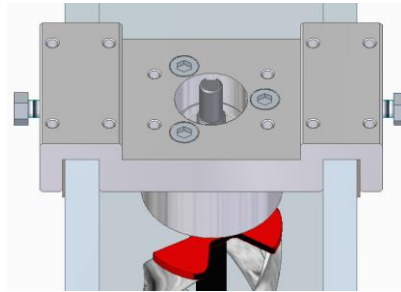
Figura 44. Sistema de transmisión



Fuente: Autor

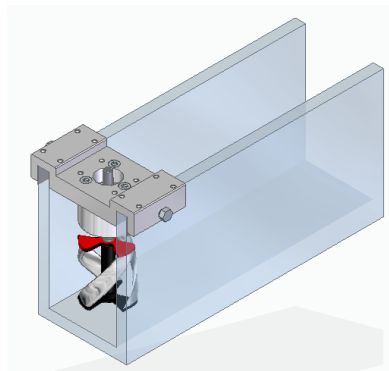
En la figura 45, se indica un sistema para la fácil adaptación de cualquier dispositivo sensorial, los agujeros que sujetan la carcasa del sistema del rotor tienen tornillos allen. Los tornillos laterales se utilizan para apretar como prensa el canal con la pieza, teniendo un empaque para no dañar la estructura física del canal.

Figura 45. Sistema sensorial



Fuente: Autor

Figura 46. Opción 4 sistema de soporte.



Fuente: Autor

4.4.5. Matriz de decisión

A continuación, se evaluará los requerimientos del cliente con el fin de seleccionar la alternativa de diseño más adecuada para el sistema de sujeción de la turbina al canal.

Para la evaluación, 1 indica que la alternativa cumple con el requerimiento, 0 cumple el requerimiento, pero no en su totalidad y -1 no cumple con el requerimiento.

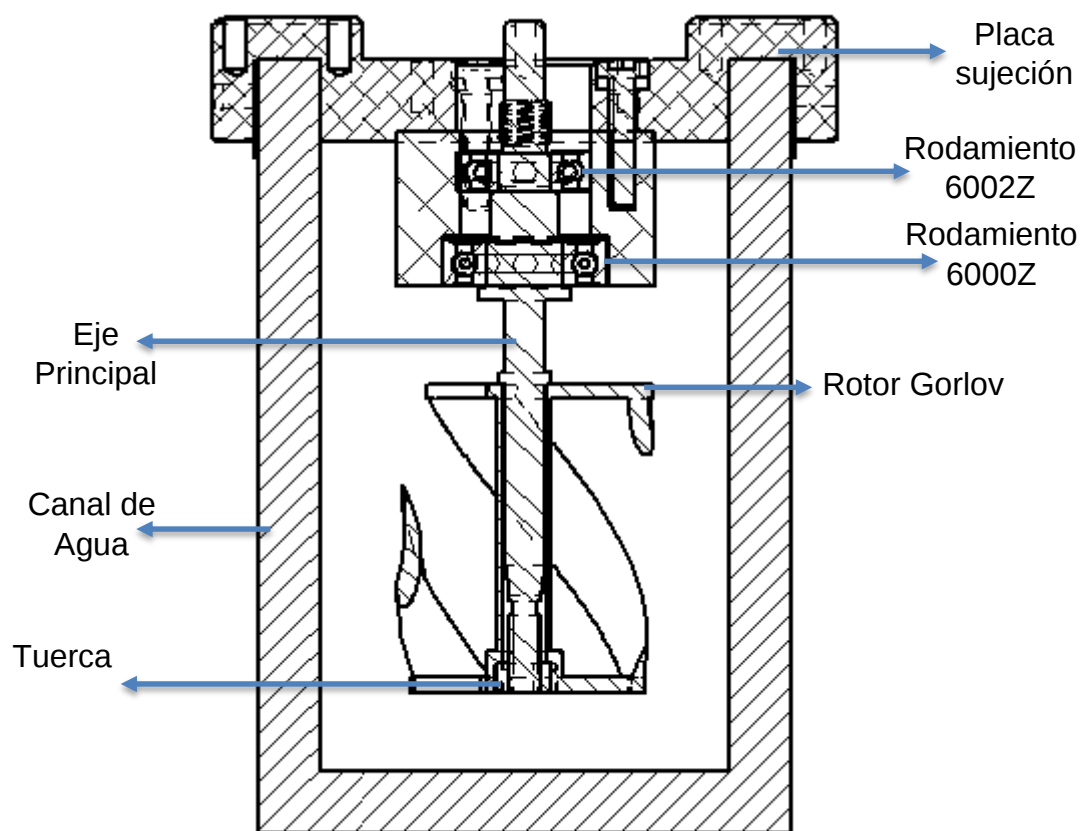
Tabla 10. Matriz de decisión para alternativas de diseño.

REQUERIMIENTO	NIVEL DE PRIORIDAD	DATUM	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVO 2	ALTERNATIVA 3	ALTERNATIVA 4
FACIL ENSAMBLABILIDAD	8.2	DATUM	0	1	0	0
FACIL MANTENIMIENTO	7.9		1	1	1	1
PROTECCIÓN AL CANAL	8.6		-1	1	-1	1
RESISTEENCIA A LA CORROSIÓN	8.1		1	1	1	1
SEGURO PARA LOS USUARIOS	8.8		1	0	1	1
SISTEMA PARA MEDICIÓN	8.4		-1	0	0	1
TOTAL	50		7.8	32.8	16.2	41.8

Fuente: Autor

Así viendo en la tabla anterior que la mejor alternativa para el canal del agua es la alternativa cuatro ver figura 46.Ver Anexo F.

Figura 47. Opción Seleccionada.



5. CAPÍTULO PLANIFICACIÓN MANUFACTURA

5.1. PLANIFICACIÓN DE LA MANUFACTURA

Para realizar el conformado de las piezas se debe planificar un proceso de manufactura pensando en la serie de operaciones que se deben lograr para obtener cada componente, se debe establecer cuál es la manera adecuada con la que se debe iniciar a mecanizar las piezas, con el objetivo de utilizar un posicionamiento para realizar la mayor cantidad de operaciones

5.1.1. Diseñar para la manufactura

Esta técnica, que está orientada a mejorar la fabricación de piezas analizando geometrías, valores y tolerancias, es utilizada en las primeras etapas de diseño para disminuir los costos de los elementos a fabricar. Se estudió el diseño para la manufactura estableciendo reglas de diseño a fin de elaborar una metodología para diseño en la manufactura de las piezas en máquinas de control numérico.

Figura 48 Arbol de proceso para DFM.

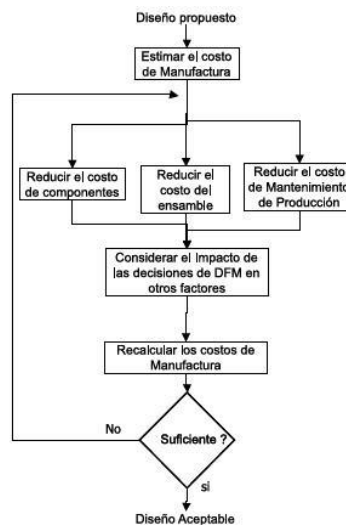


Figura 3. Metodología de DFM. Fuente: Ulrich, K.; Eppinger, S., Product Design and Development, Ed. McGraw-Hill, 1995.

Fuente: [3]

5.1.2. Requerimientos generales para selección de materiales y procesos

A continuación, se realiza una tabla de ponderación con el fin de selección los materiales más adecuados para nuestros procesos. En esta ponderación se propone una máxima calificación de quince y mínima de 0, como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Requerimientos de materiales.

REQUERIMIENTO	NIVEL DE PRIORIDAD
FÍSICOS	12
MECÁNICOS.	7
POSIBILIDAD DE FABRICACIÓN	8
DURACIÓN DE COMPONENTE	10
COSTO Y DISPONIBILIDAD	13
TOTAL.	50

FUENTE: AUTOR

Teniendo presente la ponderación presentada en la tabla anterior, a continuación, se hace una evaluación de 4 materiales para cada una de las piezas. Para el procedimiento ya mencionado se debe tener presente que, 1 indica que el material cumple con el requerimiento, 0 cumple el requerimiento, pero no en su totalidad y -1 no cumple con el requerimiento.

Tabla 12. Selección del material para el rotor.

SELECCIÓN DE MATERIAL ROTOR.						
REQUERIMIENTO	NIVEL DE PRIORIDAD	DATUM	ACERO INOXIDABLE 304	PLA (ÁCIDO POLILÁCTICO).	ABS (ACRILONITRILO BUTADIENO) ESTIRENO)	DURALUMINIO
FÍSICOS.	12		1	1	1	1

MECÁNICOS.	7		1	1	1	1
POSIBILIDAD DE FABRICACIÓN	8		0	1	1	0
DURACIÓN DE COMPONENTE	10		1	0	0	1
COSTO Y DISPONIBILIDAD	13		-1	1	1	0
TOTAL	50		16	40	40	29

Fuente: Autor

Los resultados nos muestran que los materiales PLA Y ABS alcanza una ponderación óptima para ser utilizados en la fabricación del rotor.

En la tabla siguiente se hace la ponderación de los materiales para la selección del material más adecuado para la placa de sujeción.

Tabla 13. Selección de material para la placa de sujeción y carcasa.

SELECCIÓN DE MATERIAL PLACA DE SUJECCIÓN Y CARCAZA.						
REQUERIMIENTO	NIVEL DE PRIORIDAD	DATUM	ACERO 10-45 CROMADO	ACERO INOXIDABLE 304	POLIMERO.	DURALUMINIO
FÍSICOS.	12	DATUM	1	1	1	1
MECÁNICOS.	7		1	1	-1	1
POSIBILIDAD DE FABRICACIÓN	8		0	1	1	1
DURACIÓN DE COMPONENTE	10		1	1	0	1
COSTO Y DISPONIBILIDAD	13		0	-1	1	0
TOTAL	50		29	24	26	37

Fuente: Autor

Como resultado en la tabla para la selección del material de la placa de sujeción encontramos que la mejor opción es fabricar en duraluminio.

En la tabla 14 encontramos la ponderación para la selección del mejor material para la fabricación del eje principal de la turbina.

Tabla 14. Selección de material del eje.

SELECCIÓN DE MATERIAL DEL EJE.						
REQUERIMIENTO	NIVEL DE PRIORIDAD	DATUM	ACERO 10-45 CROMADO	ACERO INOXIDABLE 304	POLIMERO.	DURALUMINIO
FISICOS.	12	DATUM	1	1	1	1
MECANICOS.	7		1	1	-1	-1
POSIBILIDAD DE FABRICACIÓN	8		1	1	1	1
DURACIÓN DE COMPONENTE	10		1	1	0	1
COSTO Y DISPONIBILIDAD	13		1	-1	1	0
TOTAL	50		50	24	26	37

Fuente: Autor

De la tabla 14 podemos concluir que el material más adecuado para fabricar el eje principal de la turbina es el ACERO 10-45 CROMADO.

5.1.3. Relación planificación de procesos y operaciones.

A continuación, en la tabla 15 se desea saber los costos con relación al tiempo de operación para las diferentes piezas en diferentes máquinas. En los casos en los que no hay relación no se pone ningún valor y se da por hecho que ese proceso no se puede hacer con esa máquina o es muy complicado y poco útil hacerlo. Los costos que se ponen a continuación son cotizaciones echas en taller o empresas que prestan estos servicios.

La tabla 15 presenta la relación de la placa de sujeción.

Tabla 15. Relación placa de sujeción y carcaza.

PIEZA	TORNO Y FRESA CONVENCIONAL		TORNO SUIZO. COP		CNC (CENTRO DE MECANIZADO). COP		IMPRESORA 3D	
	COP	TIEMP (m)	COP	TIEMP (m)	COP	TIEMP O (m)	COP	TIEMPO (m)
PLACA DE SUJECIÓN Y CARCAZA	No cumple con la posibilidad de fabricación.		No cumple con la posibilidad de fabricación.		80.000	60	Los materiales que usa la impresora no cumplen mecánicamente.	

Fuente: Autor

Como lo muestra la tabla 15 el torno convencional y el torno suizo (CNC) no cumplen con la posibilidad de fabricación y en la impresora 3D no se garantiza que el material cumpla mecánicamente, ya que esta parte de la turbina va a estar sometida a manipulaciones constantes por parte de los usuarios. Por lo tanto, podemos concluir que por costos, tiempo y posibilidad de fabricación el mejor proceso se presenta en el centro de mecanizado (CNC).

A continuación, se presenta la tabla 16 de relación para el eje principal.

Tabla 16. Relación eje principal.

PIEZA	TORNO Y FRESA CONVENCIONAL.		TORNO SUIZO. COP		CNC (CENTRO DE MECANIZADO). COP		IMPRESORA 3D	
	COP	TIEMPO (m)	COP	TIEMPO (m)	COP	TIEMPO (m)	COP	TIEMPO (m)
EJE PRINCIPAL	50.000	120	70.000	40	No cumple con la posibilidad de fabricación.		No cumple Mecánicamente.	

Fuente: Autor

De la tabla 16 se puede concluir, ya que los materiales de la impresora 3D no cumple mecánicamente con las condiciones a las que estará sometido el eje se evalúan los dos diferentes tipos de torno. El torno convencional es la herramienta más económica y con la cual se cuenta como recurso en la Universidad Santo Tomás. Ya que también se cuenta con el torno suizo se decide realizarse en este debido a que nos garantiza mejor precisión y un proceso óptimo respecto al tiempo de fabricación. A continuación, se presenta la tabla de relación del rotor.

Tabla 17. Relación de rotor.

PIEZA	TORNO Y FRESA CONVENCIONAL.		TORNO SUIZO. COP		CNC (CENTRO DE MECANIZADO). COP		IMPRESORA 3D	
	COP	TIEMPO (m)	COP	TIEMPO (m)	COP	TIEMPO (m)	COP	TIEMPO (m)
ROTOR	No cumple con la posibilidad de fabricación.		No cumple con la posibilidad de fabricación.		Aumenta el costo debido a la complejidad de fabricación.		No cumple Mecánicamente.	

Fuente: Autor.

De la tabla 17 se concluye que debido a la complejidad de la forma para realizase en centro de mecanizado CNC se decide realizarse por medio de impresión 3D.

5.2. ANÁLISIS DE ENSAMBLABILIDAD

5.2.1. Diseño para la manufactura y ensamble.

Para esta parte se busca entender que fabricar se refiere a la manufactura de componentes individuales de un producto, o ensamble para “ser armado” refiriéndose esto a la adicción o unión de componentes para el producto final. Por lo tanto, el termino de diseño para manufactura (DFM “Design for Manufacture), significa: diseñar para la fácil fabricación de la colección de partes que forman el producto, después el proceso de ensamblaje, lo cual el diseño para el ensamble (DFA “Design for Assembly), este término se refiere diseña para que el producto sea fácil de ser ensamblado. Estos dos principios se consolidan en el término DFMA, Design for Manufacture and Assembly [19].

Este término tiene tres actividades principales que se deben seguir para tener un uso correcto, primero que todo es proveer una guía para los diseñadores, para simplificar la estructura del producto para reducir los costos de producción y ensamble, y así cuantificar las mejoras del proceso, lo segundo es utilizar una herramienta comparativa para estudiar los productos de la competencia y cuantificar las posibles dificultades de fabricación y ensamblaje, y por último el ¿cuánto costaría? como herramienta para controlar los gastos y llevar un balance con las negociaciones con proveedores.

5.2.2. Implementación de “diseño para ensamble”

El objetivo de DFMA es proveer herramientas que sean utilizadas para los ingenieros de diseño o diseñadores para producción, el proceso por el cual los productos están diseñados considerando la facilidad de ensamble durante el armado. Si un producto contiene menos piezas, se necesita menos tiempo para montar, reduciendo así los costos de montaje. Además, si las partes están provistas de características que hacen que sea más fácil de agarrar, mover, orientar e insertar, esto también reducirá el tiempo costes de montaje. La

reducción del número de piezas en un conjunto tiene el beneficio añadido de reducir el costo general total de partes en el producto. En general son estos factores los que producen los principales beneficios de costos de la aplicación de diseño para ensamble[19].

5.2.3. Ensamble Manual.

Una parte integral del diseño para manufactura y ensamble es la temprana selección de materiales y combinación de procesos para la fabricación de las partes, las cuales pueden ser posicionadas para fabricar por una evaluación de criterios de producción. Para este caso se hizo una evaluación por la capacidad tecnológica respecto a máquinas, la fácil ensamblabilidad, y evaluación de la cantidad de procesos en etapas de fabricación y materiales de fácil maleabilidad.

Por lo tanto, se busca que después de la evaluación por parte de producción, la ensamblabilidad manual sea fácil y no retrase la entrega del producto final, por esa razón se buscó la menor cantidad de piezas para el ensamble del rotor y que fuera amigable con el usuario final, eso sin olvidar el propósito real de la manufactura, entregar productos de alta calidad, en el tiempo que debe ser y la completa satisfacción del usuario final.

5.3. FABRICACIÓN DE COMPONENTES

5.3.1. Fabricación en CNC Fintech GTX-170

5.3.1.1. Montaje de materia prima.

Como materia prima se utiliza un tramo de Duraluminio de longitud 101.6 mm y con un diámetro aproximado a de 127.0 mm para la placa y para la carcasa un tramo de longitud 40 mm y de diámetro 50.8 mm, se hace uso de este material debido a que es más blando que el material de la herramienta de corte, el Duraluminio es una aleación de aluminio de alta resistencia con dureza 150 - 180 HB, alta conductividad térmica, buena resistencia a la corrosión, excelente maquinabilidad y fácil obtención de superficies finas y brillantes, es altamente

utilizado en moldes de soplado, formado al vacío, moldeado de espuma, moldeado de goma, moldes de inyección de termoplásticos, placas contenedoras y de apoyo, guías y sujetadores[34].

Figura 49 Plano Placa Sujeción.



Fuente: Autor

5.3.1.2. Mecanizado de piezas

Se inicia el proceso de mecanizado de las piezas hallando el centro de la materia prima, esto se logra mediante un calibrador un brazo extensible y una base imantada con el comparador se realiza un acercamiento al material tanto el eje X y Y positivos y negativos y se sitúa el centro de pieza en el centro de la materia prima cilíndrica, en la Figura 50 se ilustra el correcto montaje de los dispositivos necesarios para hallar el centro de pieza.

Figura 50 comparador.

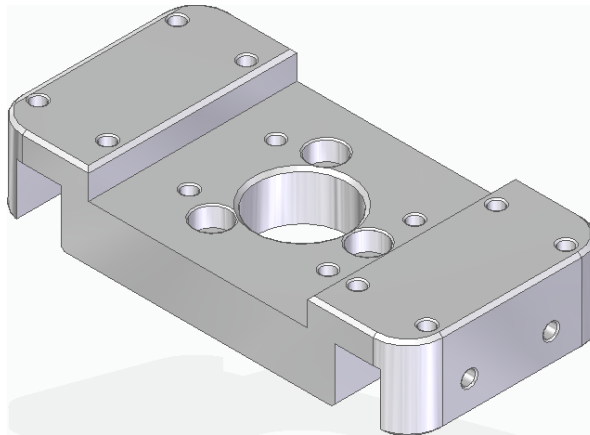


Fuente: Autor

5.3.1.3. Fabricación Placa Sujeción Canal

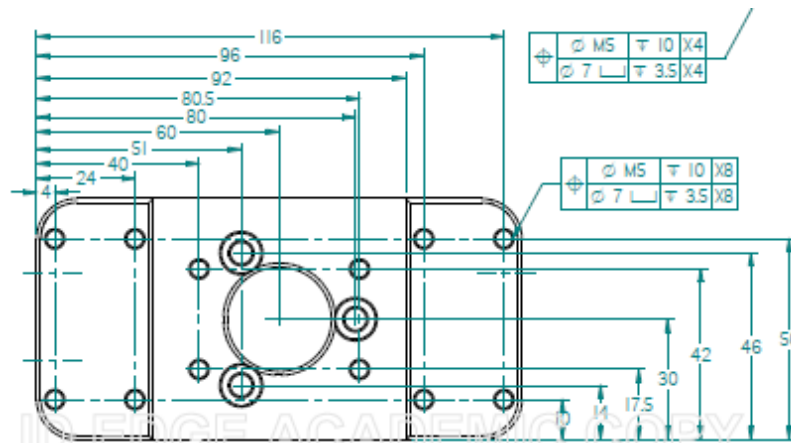
Ahora se dará la descripción de la placa que sujeta el rotor que como se puede ver en la figura 51 en un modelo CAD, esta pieza tiene una longitud de 121 mm de largo y un diámetro máximo de 24 mm, esta pieza tiene un nivel de complejidad media, ya que tiene dos procesos distintos de manufactura en sus caras, al igual que geometrías distintas, pero permitiendo la fácil operación de la máquina y dimensiones suficientes para las herramientas. Para ver a detalle el proceso de manufactura de esta pieza ver el anexo E.

Figura 51 Modelo Placa Sujeción



Fuente: Autor

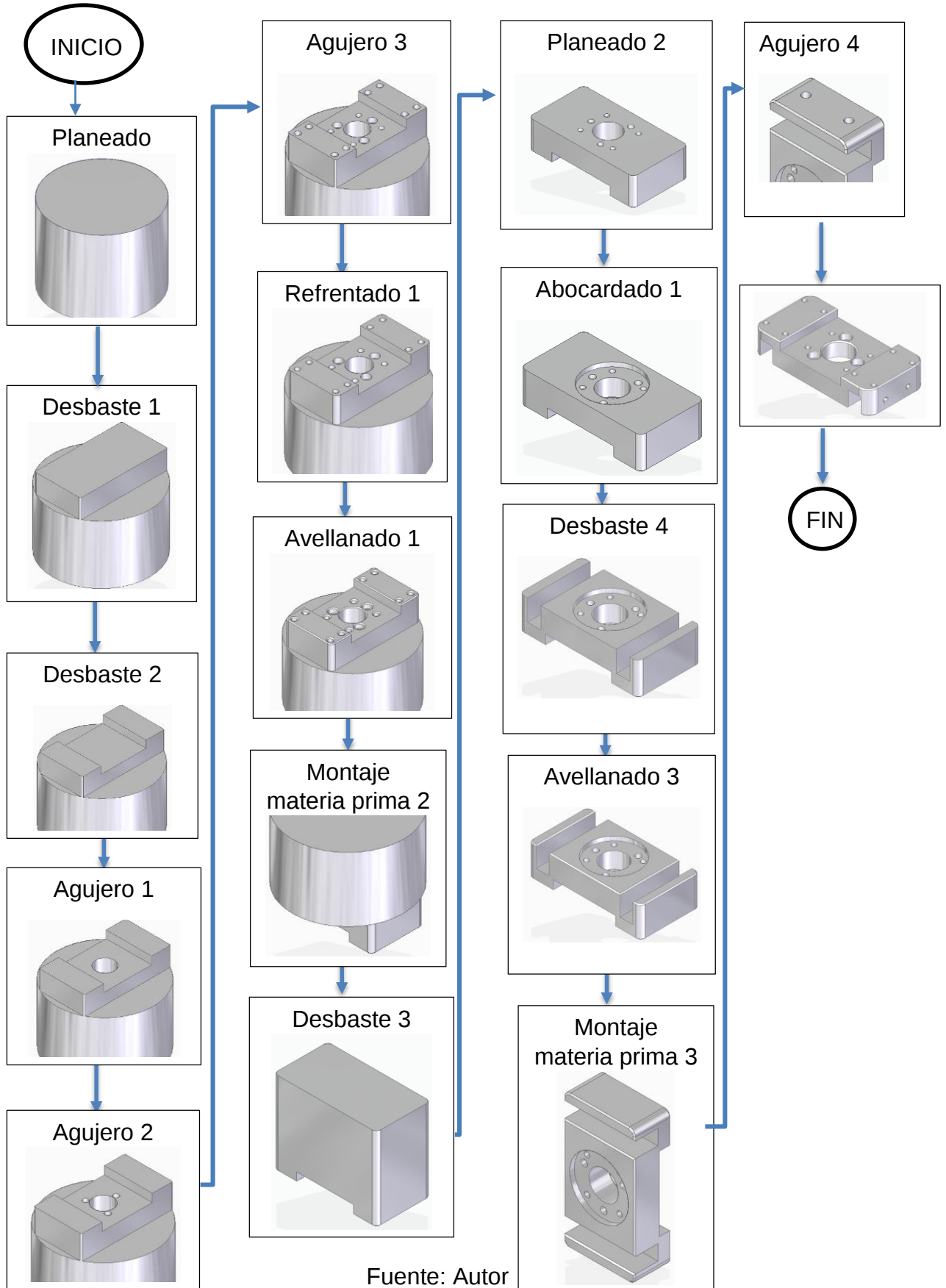
Figura 52 Plano Placa Sujeción



Fuente: Autor

5.3.1.4. Flujograma de proceso de fabricación placa

Figura 53 Flujograma Placa Sujeción

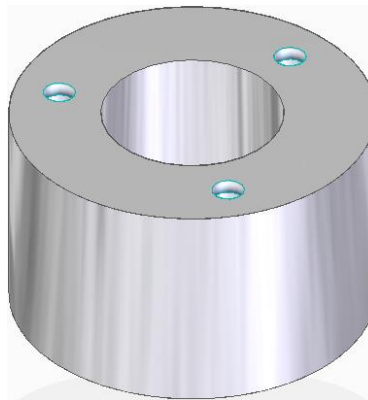


Fuente: Autor

5.3.2. Fabricación Carcaza Rodamientos

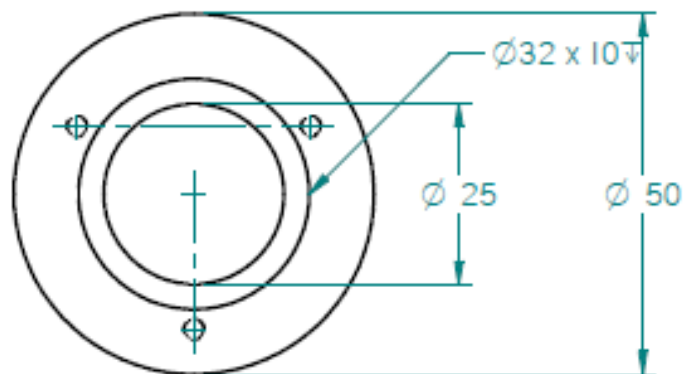
La descripción del armazón de los rodamientos que como se puede ver en la figura 54 en un modelo CAD, esta pieza tiene una longitud de 30 mm de largo y un diámetro máximo de 50 mm, los factores por lo que su proceso de manufactura es complejo es debido a que esto tiene un casquete interior con un diámetro mínimo de 25 mm el cual es de difícil acceso para generar un acabado con cualquier herramienta por el espacio de trabajo que permite la pieza, por otra parte tocó hacer dos tipos de montaje para la fabricación de esta. Para ver a detalle el proceso de manufactura de esta pieza ver el anexo F manufacturas piezas complejas

Figura 54 Carcaza rodamientos CAD.



Fuente: Autor

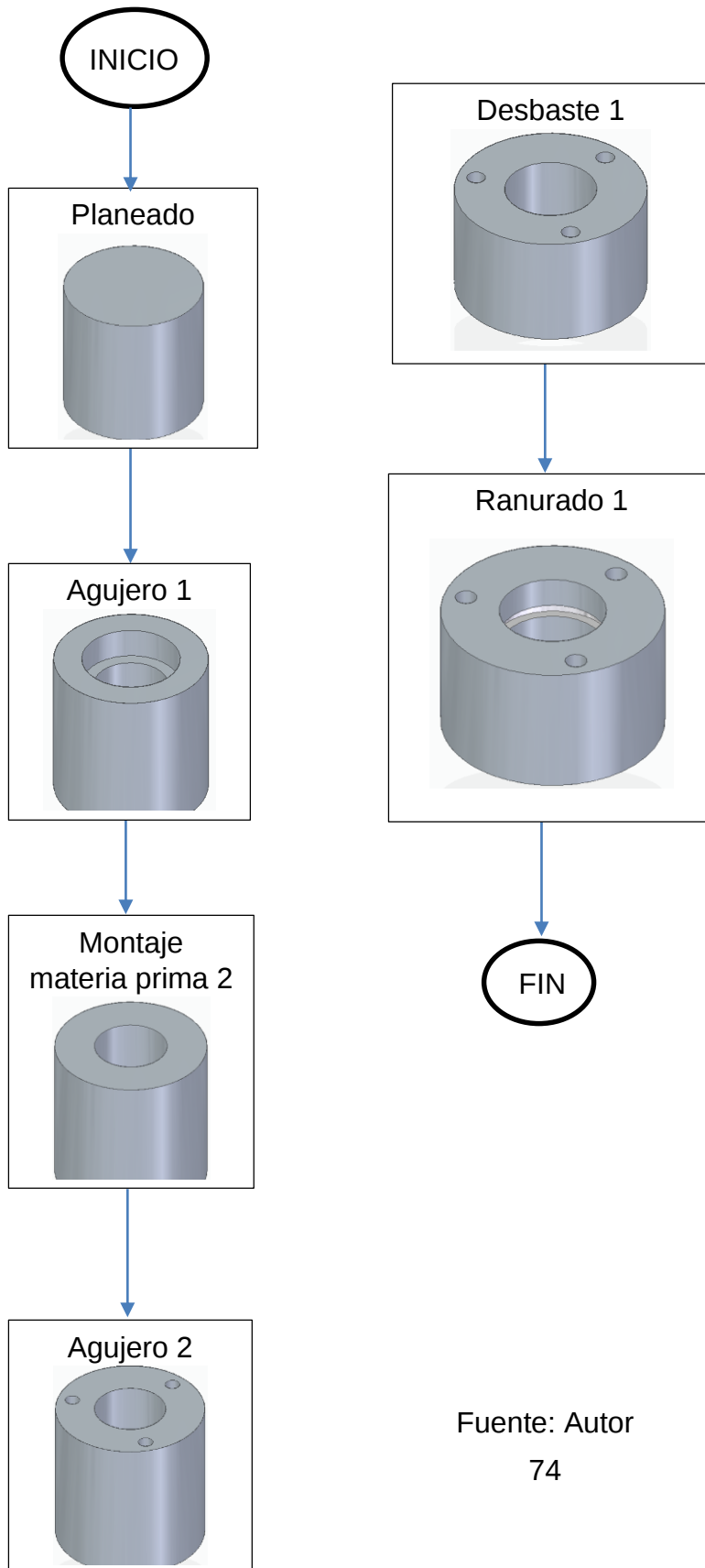
Figura 55 Carcaza rodamientos CAD.



Fuente: Autor

5.3.2.1. Flujograma de proceso de fabricación carcasa

Figura 56 Flujograma carcasa.



Fuente: Autor

5.3.3. Fabricación en Polygym Diamond

Luego de tener el diseño final del eje se procede a mecanizar la materia prima en el torno tipo suizo POLYGIM DIAMOND, que se encuentra en la Universidad Santo Tomás, la materia prima que se utiliza es acero ANSI 1045 con un diámetro de 3/4 in. Calibrado, para la fabricación del eje fue necesario escribir el código G ver: anexo D, así como también determinar la forma más adecuada de tallar el eje fue en el torno tipo suizo puede ser visto en la Figura 57.

Figura 57 Torno tipo suizo POLYGIM DIAMOND



Fuente: Autor

5.3.4. Fabricación Eje

Un factor importante a la hora de tener en cuenta la geometría de la pieza será la sujeción a esta en la máquina en cuestión, dado que se trata de una pieza que se va a obtener en rotación y provista de varios diámetros, los cuales tendrán un requisito de concentricidad entre ellos, el mejor agarre de la pieza ,será el amarre entre puntos, esto nos garantizará una gran concentricidad entre diámetros y una buena robustez, cuestión muy importante a la hora de evitar vibraciones que repercutan negativamente en el acabado de la pieza.

Esta pieza tiene una longitud de 130 mm de largo y un diámetro máximo de 18 mm, esta pieza tiene varios factores por los que su proceso de manufactura es complejo, empezando por que tiene una gran cantidad de operaciones como: refrentado, roscado, ranurado, cilindrado, tronzado, chaflanes, fabricando la pieza sin necesidad de cambiar de máquina ni realizar nuevos montajes. Ver figura 58.

Figura 58.Plano Eje

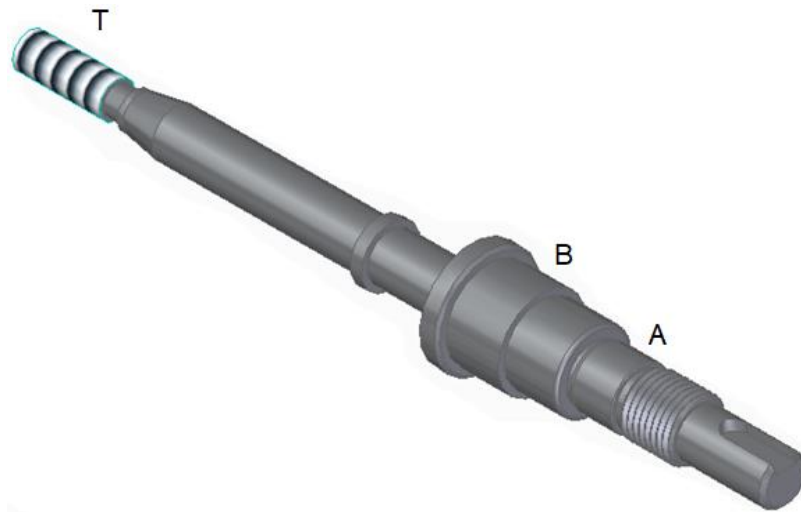
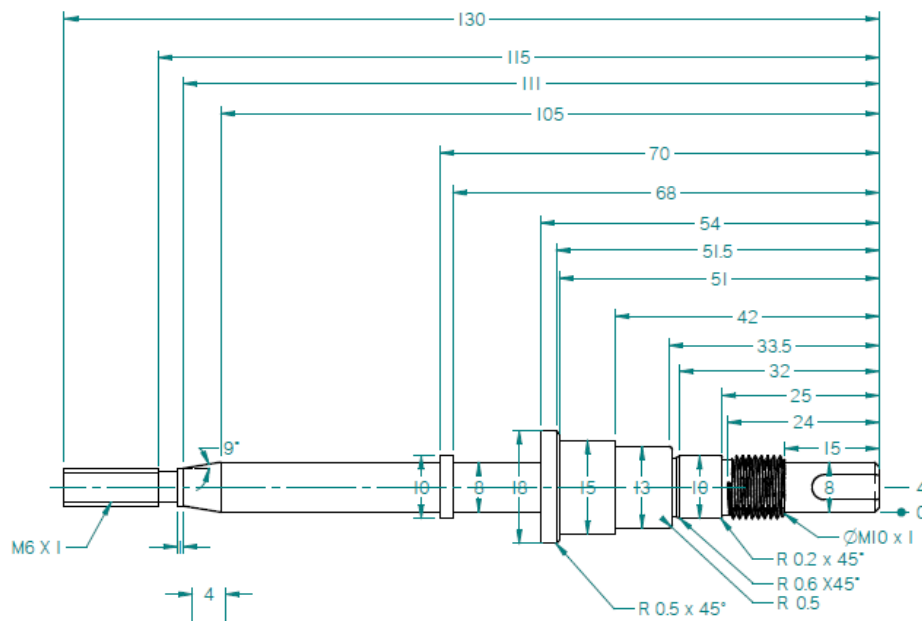


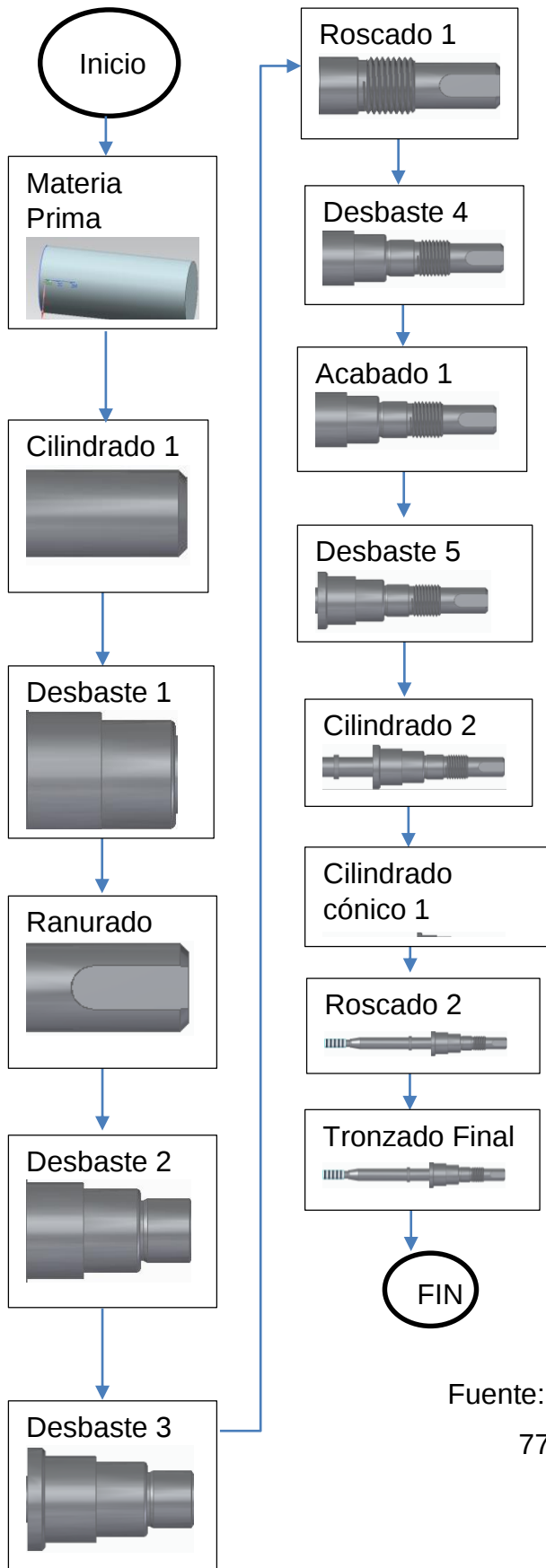
Figura 59.Plano Eje



Fuente: Autor

5.3.4.1. Flujograma de fabricación eje

Figura 60. Flujograma Eje



Fuente: Autor

5.3.5. Fabricación Rotor

Para la fabricación del rotor se comenzará por dar una descripción de un modelo CAD ver figura 60, esta pieza tiene una longitud de 60 mm de largo y un diámetro máximo de 50mm, esta pieza tiene varios factores por los que su proceso de manufactura es complejo empezando que tocaría montar un 4 y 5 eje para la fabricación, por lo tanto se escogió la impresión 3D o prototipado rápido para ver a detalle el proceso de manufactura de la pieza, ver el anexo G manufactura de piezas.

Figura 61 Rotor Gorlov CAD.



Fuente: Autor

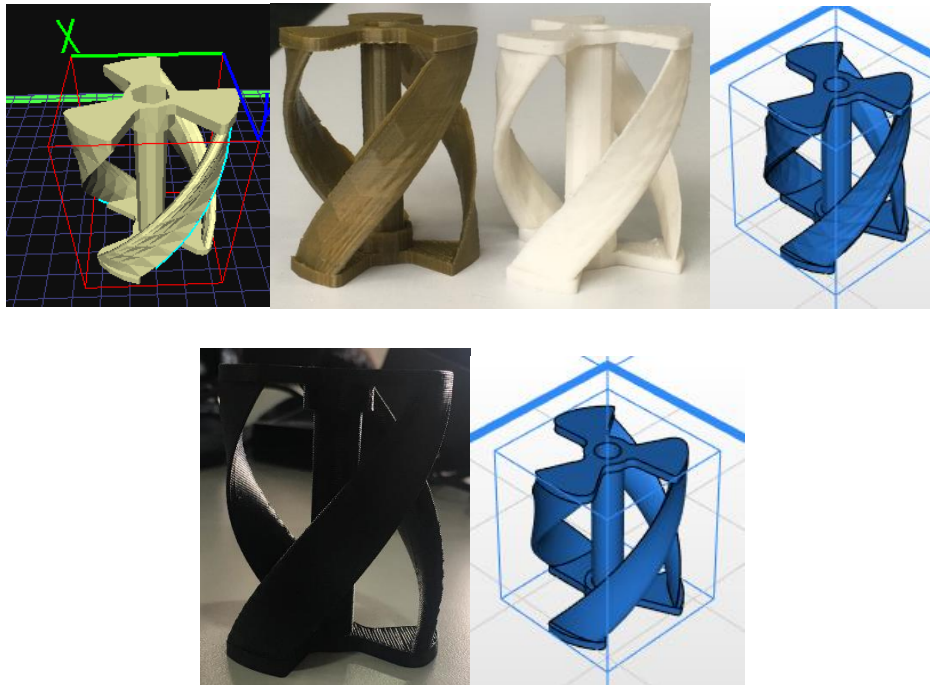
Se utiliza la impresora Zortrax M200 y la Impresora 3D Creator Tech S.A.S, lo cual, en las pruebas de acabado, se prefirió la Zortrax, por su precisión en la impresión. Para este rotor se utilizaron los siguientes parámetros de impresión. Ver anexo G de procedimiento.

Tabla 18. Tabla parámetros de impresión.

Parámetro	Valor
Temperatura	115°C
Velocidad	4 hilos in/s
Camas de adhesión	4 capas
Soportes auxiliares	3 torres de estructura hexagonal
Cáscara	0.8
Relleno o Infil	100%
Material	Z-ABS, Z-PLA

Fuente: Autor

Figura 62 Rotor Gorlov Impresión



Fuente: Autor

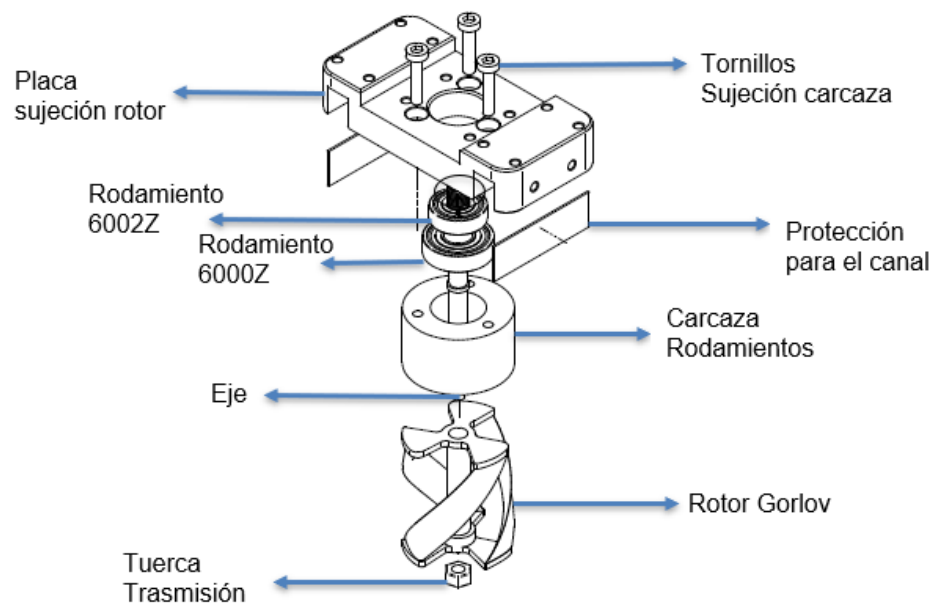
Al principio con los parámetros de menor velocidad de impresión, precisión de superficie y material, el acabado superficial del mismo varió considerablemente respecto a la primera impresión (rotor blanco) con la última (rotor negro). Ver figura 61. Y tabla 19

Parámetro	Valor en impresión 1	Valor en impresión 2	Valor en impresión 1
Temperatura	115°C	115°C	115°C
Velocidad	2 hilos in/s	1 hilos in/s	4 hilos in/s
Camas de adhesión	4 capas	4 capas	4 capas
Soportes auxiliares	3 torres de estructura hexagonal	3 torres de estructura cuadrada	3 torres de estructura hexagonal
Cáscara	0.6	0.4	0.8
Relleno o Infil	50%	75%	100%
Material	PLA	Z-ABS, Z-PLA	Z-ABS, Z-PLA
Tiempo	6h 50m	9h 44m	3h 46m

5.4. ANÁLISIS DE ENSAMBLABILIDAD DE CONJUNTO

Se muestra un explosionado a continuación para mostrar las piezas que componen el conjunto, para así mas adelante hacer el correspondiente análisis.

Figura 63 Explosionado Proyecto



Fuente: Autor

Tabla 19. Tabla DFMA de ensamble.

Pieza	No	Conteo de Partes	Tiempo de ensamble (s)	Costo de ensamble
Placa Base	1	1	4,66	\$19,41
Carcasa Rodamientos	1	1	4,18	\$17,41
Rodamiento Mayor	1	0	5,45	\$22,70
Rodamiento Inferior	1	0	4,36	\$18,16

Eje	1	1	1,2	\$5,00
Tornillos Placa	3	0	48,45	\$201,84
Tornillos Canal	4	0	15,68	\$65,32
Tuerca	1	0	1,0	\$4,17
Anillo Segger	1	0	3	\$12,50
Rotor Gorlov	1	1	8,88	\$36,99
Tuerca para rodamiento	1	0	2,58	\$10,75
Arandela Pin	1	0	2	\$8,33
TOTALES	11	4	101,44	\$422,60

Fuente: Autor

Hora de trabajo operario \$ 4.166COP por hora

Índice Ensamble $= (4 \times 4) / (101,44) \rightarrow 15,77\%$

Con este índice de ensamble no muestra que la pérdida en una línea de producción de este producto es menor al 40%, haciendo una pieza efectiva y de alta productividad.

5.5. SECUENCIA DE ENSAMBLE DEL PROYECTO

Una vez las partes del prototipo han sido manufacturadas, se procede a la realización del análisis del procedimiento de ensamble, cuyo objetivo es determinar la secuencia más adecuada para la unión de los componentes. A manera de ejemplo se ilustra en la Figura 64. Se observa que la unión de estas nueve partes es posible realizarla de diferentes formas.

Para la selección de la secuencia de ensamble, el criterio principal fue la que generara el menor esfuerzo en los componentes al momento de unirlos, debido a que se realizó de una forma manual. En el caso de un proceso industrial, en una

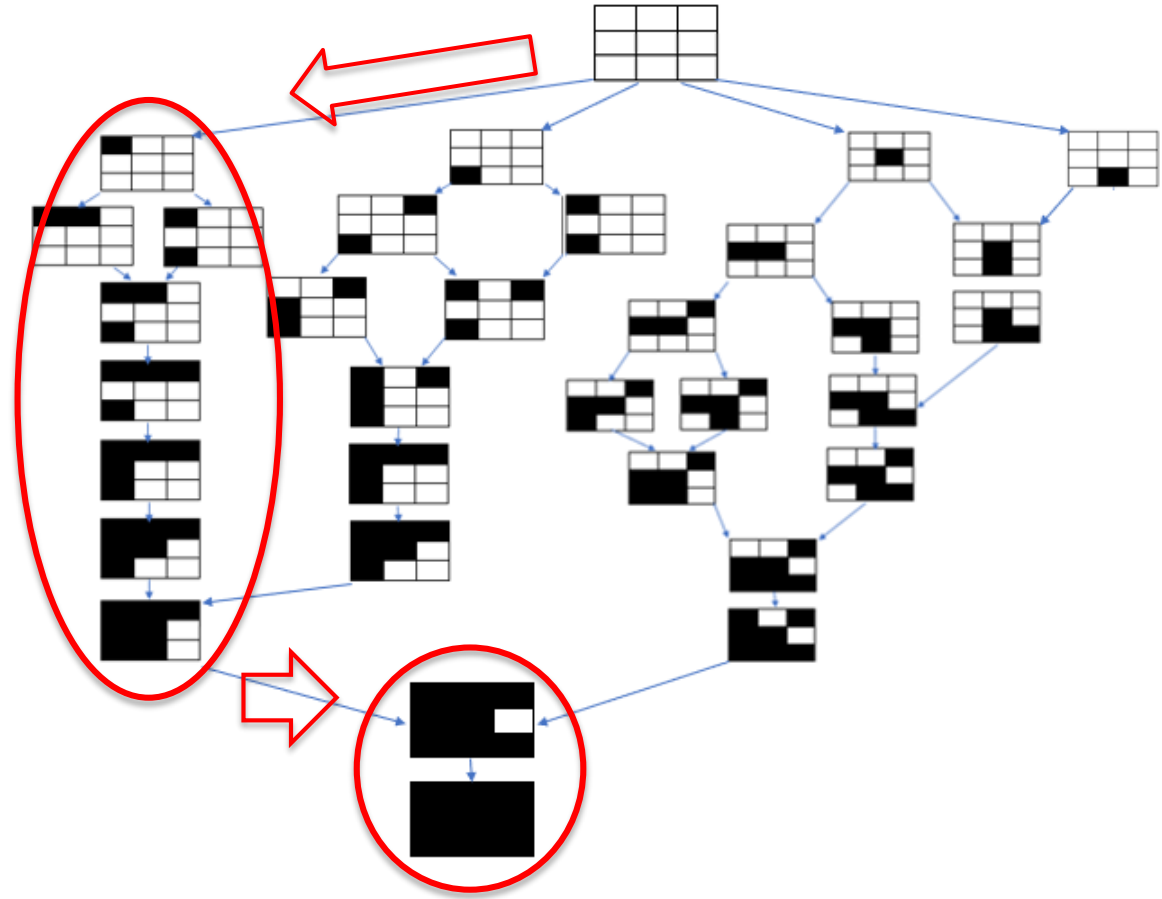
línea de ensamble, entran en consideración criterios relativos al proceso y grado de automatización disponible.

Tabla 20 Tabla de numeración de piezas.

Pieza	Número
Placa Sujeción Rotor	1
Tornillos sujeción carcaza	2
Rodamiento 6002Z	3
Rodamiento 6000Z	4
Eje rotor	5
Protección Canal	6
Carcaza rodamientos	7
Rotor Gorlov	8
Tuerca	9

1	2	3
4	5	6
7	8	9

Figura 64 Diagrama de ensamble de la turbina



Fuente: Autor

6. METROLOGÍA

La metrología en estas piezas es de vital importancia ya que esta es la forma de comprobar que el trabajo realizado cumplió con las características descritas en los capítulos anteriores, y es una de las formas de demostrar la capacidad tecnológica de la máquina en cuanto a requerimientos de calidad en la parte de la precisión, además de esto el uso que se le va a dar a estas piezas es para pruebas de laboratorio e investigación, su función se basa en la precisión para la medición de variables y demás, por tal manera que sus componentes deben ser precisos para que su funcionamiento sea de igual manera.

Para comenzar se dividió la pieza en las tres caras y en las 3 secciones para facilitar su medición como se ve en la figura 64, la metrología de las secciones se utilizó un calibrador pie de rey y galgas para los radios para tomar las medidas, los resultados se pueden ver en la 20.

Figura 65. Vista inferior metrología de placa

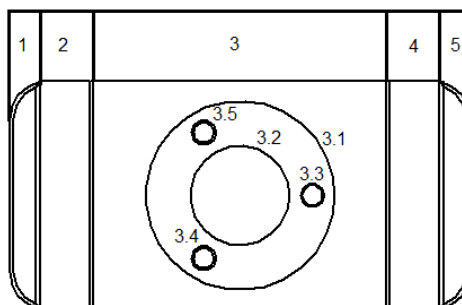


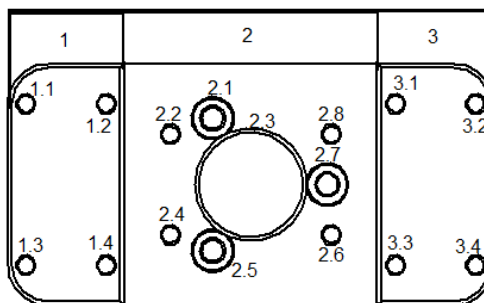
Tabla 21 Resultados de metrología .

Descripción	Valor Teórico (mm)	Valor Real (mm)	% Error
Longitud 1	60	59,8	0.33%
Radio 1.1	10	10	-
Radio 1.2	10	10	-
Ancho 1	8	7,9	-
Longitud 2	60	59,7	0.5%
Ancho 3	13	12,6	-

Longitud 3	60	59,8	0.33%
Ancho 3	63	63	-
Agujero 3.1	50	49,5	1%
Agujero 3.2	26	25,8	0.77%
Agujero 3.3	5	4,9	2%
Agujero 3.4	5	4,9	2%
Agujero 3.5	5	4,9	2%
Longitud 4	60	59,7	0.5%
Ancho 4	13	13	-
Longitud 5	60	59,7	0.5%
Ancho 5	8	8	-
Radio 5.1	10	10	-
Radio 5.2	10	10	-

Fuente: Autor

Figura 66 Metrología de placa.



Fuente: Autor

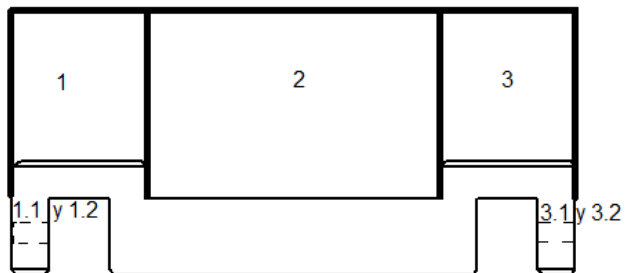
Tabla 22 Datos de metrología.

Descripción	Valor Teórico (mm)	Valor Real (mm)	% Error
Longitud 1	60	59,8	0.33%
Radio 1.1	10	10	-
Radio 1.2	10	10	-
Agujero 1.1	5	4,9	2%

Agujero 1.2	5	4,9	2%
Agujero 1.3	5	4,9	2%
Agujero 1.4	5	4,9	2%
Longitud 2	60	59,6	0.66%
Agujero 2.1	7	6,8	2.85%
Agujero 2.2	5	4,9	2%
Agujero 2.3	26	25,8	0.76%
Agujero 2.4	5	4,9	2%
Agujero 2.5	7	6,8	2.85%
Agujero 2.6	5	4,9	2%
Agujero 2.7	7	6,9	1.42%
Agujero 2.8	5	4,9	2%
Longitud 3	60	59,8	0.33%
Agujero 3.1	5	4,9	2%
Agujero 3.2	5	4,9	2%
Agujero 3.3	5	4,9	2%
Agujero 3.4	5	4,9	2%
Radio 3.1	10	10	-
Radio 3.2	10	10	-

Fuente: Autor

Figura 67. Placa vista lateral



Fuente: Autor

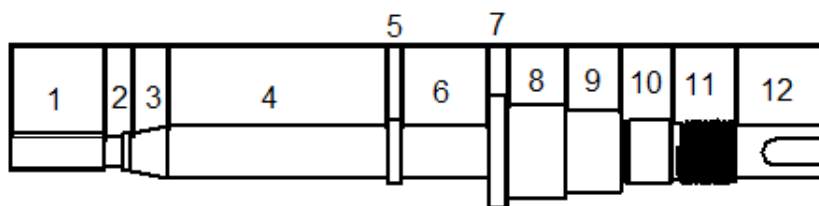
Tabla 23 Metrología de placa vista lateral.

Descripción	Valor Teórico (mm)	Valor Real (mm)	% Error
Longitud 1	29	28,5	1.72%
Alto 1	24	24	-
Agujero 1.1	5	4,9	2%
Agujero 1.2	5	4,9	2%
Longitud 2	29	28,5	1.72%
Alto 2	19	18	5.26%
Ancho 2	63	63	-
Alto 3	24	23,8	0.83%
Ancho 3	29	28,5	
Agujero 3.1	5	4,9	2%
Agujero 3.2	5	4,9	2%

Fuente: Autor

Para iniciar con la medición del eje este se dividió en 12 secciones para hacer fácil la toma de medidas, en este se utilizó dispositivos como el calibrador Pie de Rey y una galga de roscas.

Figura 68 Metrología de eje



Fuente: Autor

Tabla 24 Metrología del eje

Descripción	Valor Teórico (mm)	Valor Real (mm)	% Error
Longitud 1	15	14,8	1.33%
Rosca 1	M6	6	-
Longitud 2	10	9,8	2%

Diámetro 2	7	6,8	2.85%
Longitud 3	60	60	-
Ángulo	9	9	-
Longitud 4	35	35	-
Diámetro 4	8	7,6	5%
Longitud 5	2	2	-
Diámetro 5	10	9,8	2%
Longitud 6	14	14	-
Diámetro 6	8	7,9	1.25%
Longitud 7	3.5	3,6	1.77%
Diámetro 7	18	18	-
Longitud 8	9	9	-
Diámetro 8	15	14,8	1.33%
Longitud 9	8.5	8,5	-
Diámetro 9	13	13	-
Longitud 10	8.5	8,5	-
Diámetro 10	10	9,8	2%
Longitud 11	9	9	-
Diámetro 11	M10	10	-
Longitud 12	15	15	-
Diámetro 12	8	8	-
Longitud Cuñero	10	10	-
Ancho Cuñero	4	3,8	-

Fuente: Autor

7. PRUEBAS DE LABORATORIO.

7.1. TEOREMA DE SEMEJANZA Y SIMILITUD

Es un teorema que se aplica para modelos a escala en aerodinámica e hidrodinámica, con el objetivo de que el prototipo se comporte similar en una situación real. Para analizar mediante un modelo a escala los fenómenos que podrían ocurrir en el objeto real es necesario que entre ambos (modelo y objeto real) exista semejanza geométrica, cinemática y dinámica. Para esto son necesarios las semejanzas de Reynolds, número de Froude y Coeficiente de potencia[35].

7.1.1. Semejanza de Reynolds

Para que las semejanzas de Reynolds se cumplan es necesario establecer la ecuación que podría relacionar las fuerzas aerodinámicas e hidrodinámicas en dos fenómenos semejantes. Dicho lo anterior $Re_p = Re_m$ deben ser iguales.

Ecuación 39. Semejanza de Reynolds.

$$Re_{Prototipo} \frac{V_0 * C}{V} = Re_{Modelo} \frac{V_0 * C}{V}$$

Fuente: [35]

7.1.2. Semejanza en TSR

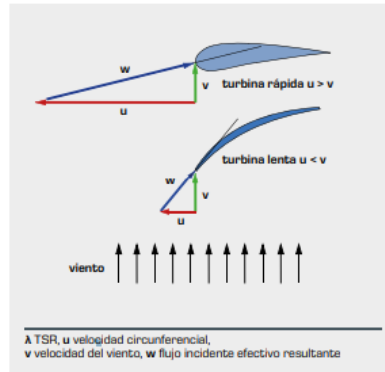
Las turbinas eólicas se caracterizan por la forma y el número de palas del rotor. La forma y el diseño de las palas del rotor son decisivas para la TSR de la turbina. La TSR λ es la relación entre la velocidad circunferencial U y la velocidad del viento V en dirección axial, dada por la siguiente formula.

Ecuación 40. Top Speed Ratio. (TSR).

$$\frac{U}{V} = \lambda$$

Fuente:[36]

Figura 69 TSR en un álabe



Fuente:[36]

Donde U es la distancia de la fuente del flujo incidente y V la altura a la que se encuentra la fuente del fluido. Observar imagen anterior.

7.1.3. Coeficiente de potencia.

El coeficiente de potencia está dado por la relación entre la potencia aprovechada y la disponible.

Ecuación 41. Coeficiente de potencia.

$$\frac{P_{aprovechada}}{P_{disponible}} = C_p$$

Fuente:[37]

7.1.4. Semejanza de Froude.

Es un número adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido, en canales abiertos nos informa del estado del flujo hidráulico, donde L_m y L_p son las longitudes del sistema, y V_p y V_m son las velocidades correspondientes a cada uno, al modelo y al prototipo.

Ecuación 42. Semejanza de Froude.

$$\frac{v_m}{\sqrt{l_m g_m}} = \frac{v_p}{\sqrt{l_p g_m}}$$

Fuente: [37]

7.2. PRUEBA DEL ROTOR CON AGUA EN LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS.

En el canal de la universidad Santo Tomás se realizaron las pruebas a la turbina como se muestra en la figura 69. La prueba consistió en hacer el montaje de la turbina en el canal para corroborar el funcionamiento de esta. Siguiendo a esto, se tomó datos de la velocidad y nivel de agua.

Para tomar la velocidad se hizo con una partícula “tracer”, donde esta avanzaba por el fluido y paralelo a una regla que tiene el canal, y con un cronometro se tomaba el tiempo que se demoraba en avanzar cada metro, juntando los dos datos indicaba una velocidad aproximada. El nivel de agua se media con un dispositivo pie de rey que ya se encuentra implementado, en el canal se encuentra dos modos de aumentar o disminuir el nivel, una de estas era mediante un tornillo sin fin y una tuerca con manivela que estrangulaba el flujo para aumentar o disminuir el nivel, y la última forma era con un dispositivo que hacía retrasar la circulación del fluido generando que la bomba impulsara mayor agua del tanque de reserva.

Figura 70. Montaje turbina en el canal de agua.



Fuente: Autor

Figura 71. Sistema de Canal de agua.



Fuente: Autor

Los datos adquiridos del sistema fueron los siguientes:

Tabla 25 Datos de experimento de laboratorio en canal de agua.

Nivel (mm)	Velocidad 1	Velocidad 2	Velocidad 3
125	0,28	0,31	0,26
120	0,35	0,4	0,38
110	0,42	0,45	0,45
100	0,5	0,52	0,49
80	0,55	0,58	0,6
75	0,7	0,68	0,65

Fuente: Autor

7.3. PRUEBA DEL ROTOR CON AIRE.

Para este experimento se utiliza el principio de similitud y semejanza, para encontrar una velocidad del aire que sea equivalente a la velocidad del agua. Lo cual, con el número de Reynolds, se despeja la velocidad como se muestra a continuación.

Ecuación 43. Equivalencia con número de Reynolds.

$$Re = \frac{V_c * L_c}{\nu}$$

Fuente: [35]

se toma el Reynolds hallado con el agua anteriormente

$$23446.73 = \frac{V_c * 0.0428m}{1.4348 \times 10^{-5} m^2/s}$$

$$V_c = 7,86m/s$$

La viscosidad cinemática del aire a la temperatura de 11°C del ambiente es de 1.4348×10^{-5} , tomado de las tablas de termodinámica de Cengel, el cual se interpola entre 10 y 15°C.

Tabla 26 Tablas de propiedades termodinámicas.

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidad $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico c_p $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268

Fuente:[38]

Con ese resultado es la semejanza que equivale la velocidad del aire con la del agua. La prueba de laboratorio consiste en variar la presión del compresor con el fin de variar las velocidades del aire y ver el comportamiento del rotor. Se requiere conocer las rpm en las que gira el rotor a la velocidad del aire para después ver el equivalente respecto a la del agua, a su vez se toma velocidades antes y después del rotor con el anemómetro para ver cuánto se aprovecha de la energía cinética del fluido 58.

Figura 72. Montaje turbina para aire



Fuente: Autor

Los instrumentos utilizados fueron los siguientes:

Para la medición se utilizó un tacómetro digital y anemómetro para la velocidad del aire.

Figura 73. Tacómetro digital y anemómetro.



Fuente: Autor

Para cada presión se tomaron tres velocidades del aire como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 27 Datos de velocidad de aire en prueba de aire.

VELOCIDAD AIRE (m/s)			
PRESIÓN (BAR)	MEDICIÓN 1	MEDICIÓN 2	MEDICIÓN 3
1	4,9	4,8	5,3
1.5	7,3	7,1	7,4
2	10,9	11,3	11
2.5	12,4	12	12,1
3	13,5	13,7	13,9
3.5	16,8	16,5	16,7
4	19	18,8	19,2

Fuente: Autor

Tabla 28 Datos obtenidos del prueba de aire.

RPM- ROTOR		
MEDICIÓN 1	MEDICIÓN 2	MEDICIÓN 3
NO ES SUFICIENTE	NO ES SUFICIENTE	NO ES SUFICIENTE
457	455	450
492	502	495
560	555	563
605	604	607
690	702	697
760	755	770

Fuente: Autor

Y en la siguiente tabla se muestra los resultados ya ponderados de la velocidad de aire antes y después del rotor, para comprobar el aprovechamiento de la energía cinética.

7.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.4.1. Canal de agua

Tomados los datos en varias ocasiones, se encuentra que la velocidad mínima requerida no cumple con el nivel mínimo requerido, a su vez cuando se cumple el nivel requerido la velocidad es inferior a la requerida.

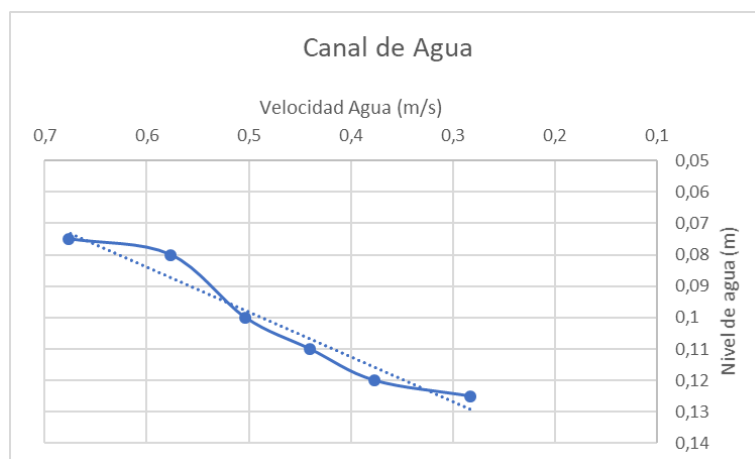
Se comprueba que para que la turbina funcione en el canal se necesita una velocidad de bloque mínima de 0.7m/s y un nivel de 10 cm como mínimo. Ya que está diseñada para una velocidad de 0.7m/s de agua y un nivel de 12 cm. Por lo cual se toma la decisión de hacer pruebas en aire.

Tabla 29 Velocidad Promedios de Prueba en canal de agua.

Nivel (mm)	Velocidad Promedio
0,125	0,3
0,12	0,4
0,11	0,44
0,1	0,5
0,08	0,6
0,075	0,7

Fuente: Autor

Figura 74 Gráfica de velocidad vs nivel del agua.



Fuente: Autor

7.4.2. Prueba Aire

Al realizar las pruebas se observa que al aumentar la presión del compresor, la velocidad del rotor aumentaba, por otra parte, se identifica la mínima presión de aire que necesita para vencer el torque de par de inicio que le ejercen los rodamientos y el sistema como tal. Se muestra a continuación una tabla y gráfico con los datos obtenidos promediados. La fila subrayada en color amarillo indica el dato mínimo que necesita el rotor para funcionar.

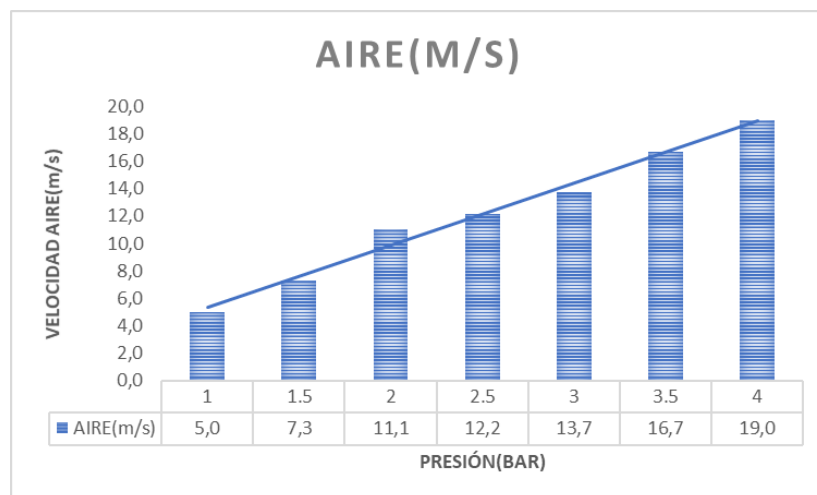
Tabla 30 Tabla de datos de prueba de aire.

PRESIÓN (BAR)	AIRE(m/s)	RPM
1	5,0	0
1.5	7,3	454
2	11,1	496
2.5	12,2	559
3	13,7	605
3.5	16,7	696
4	19,0	762

Fuente: Autor

A continuación en el gráfico, se hace visible el aumento de la velocidad respecto a la velocidad de aire.

Figura 75 Gráfica de datos de prueba de aire.



Fuente: Autor

En esta tabla podemos apreciar la cantidad de energía cinética que aprovecha el rotor del fluido.

7.4.3. Análisis por semejanzas

Para relacionar y poder concluir la razón de hacer las dos pruebas sobre el rotor, se realiza un análisis de semejanzas y similitudes en el Reynolds, número de Mach y coeficiente de potencia, con los datos obtenidos anteriormente. A continuación, se muestra los resultados.

Tabla 31 Tabla de relación de datos de fluidos en pruebas.

AIRE(m/s)	AGUA (m/s)	RPM-AGUA	RPM-AIRE
5,0	0,44532339	0,0	0
7,3	0,634603401	39,5	454
11,1	0,964944898	43,1	496
12,2	1,057672336	48,6	559
13,7	1,190968027	52,6	605
16,7	1,448866213	60,5	696
19,0	1,651707483	66,2	762

Fuente: Autor

Tabla 32 Tabla de Reynolds de los fluidos.

RE AIRE	RE AGUA	Porcentaje de Error
14914,97073	14914,97073	0%
21254,42177	21254,42177	0%
32318,36735	32318,36735	0%
35424,03628	35424,03628	0%
39888,43537	39888,43537	0%
48526,0771	48526,0771	0%
55319,72789	55319,72789	0%

Fuente: Autor

En la siguiente tabla se ve como la relación de semejanza en el número de Mach, tiene un porcentaje de error menor al 1%, aunque el agua es un líquido incompresible y está bajo el número de Mach aproximadamente en 0.3.

Ecuación 44. Semejanza Match.

$$\frac{\rho_1 V_1^2}{p_1} = \frac{\rho_2 V_2^2}{p_2}$$

Fuente: Autor

Tabla 33 Tabla de número de Mach.

NUMERO DE MACH		
Aire	Agua	Porcentaje de error
30,625	30,625	0,00%
43,12362963	43,52016667	0,91%
75,01355556	75,466125	0,60%
72,53361111	72,53361111	0,00%
76,64008333	76,64008333	0,00%
97,22222222	97,22222222	0,00%
110,55625	110,55625	0,00%

Con el número de Froude se puede corroborar el comportamiento del rotor en los dos tipos de fluidos, con una aproximación cercana de la prueba de aire en su área de barrido, respecto al canal de agua.

Tabla 34 Tabla de número de Froude.

NÚMERO DE FROUDE		
Aire	Agua	Porcentaje de error
14,57286285	14,68540401	0,77%
21,27637976	21,34086274	0,30%
32,35175553	32,57557943	0,69%
35,46063293	35,63703501	0,49%
39,92964421	40,05066022	0,30%
48,5762095	48,98782163	0,84%
55,37687883	55,54471125	0,30%

Fuente: Autor

Por otra parte, se logra aproximar el TSR de la turbina en los dos casos de pruebas realizadas.

Tabla 35 Tabla de TSR.

TSR		
Aire	Agua	Porcentaje de error
2,7	2,8	3,85%

Fuente: Autor

Y por último para el coeficiente de potencia, se utilizan datos anteriores para calcularlo, lo primero es calcular la potencia disponible (del fluido) y después la potencia aprovechada

Para la potencia disponible es con la siguiente ecuación.

Ecuación 45. Potencia de disponible del fluido.

$$P_{fluido} = \frac{1}{2} * \rho * v^3 * r^2 * \pi$$

Tabla 36 Relacionamiento de energía cinética en fluidos.

Aprovechamiento de energía cinética del fluido (Agua)			Aprovechamiento de energía cinética del fluido (Aire)		
Velocidad antes	Velocidad despues	Disminucion	Velocidad antes	Velocidad despues	Disminucion
0,57	0,45	28,00%	6,8	5,0	35,00%
0,81	0,63	28,00%	9,9	7,3	35,00%
1,24	1,0	28,00%	15,0	11,1	35,00%
1,35	1,1	28,00%	16,4	12,2	35,00%
1,52	1,2	28,00%	18,5	13,7	35,00%
1,85	1,4	28,00%	22,5	16,7	35,00%

En la siguiente ecuación fue utilizada en el capítulo de diseño, obteniendo datos de potencia del rotor.

Ecuación 46. Pontencia disponible del rotor.

$$P_{Apro} = \frac{1}{2} (\rho A V_0^3)$$

Fuente:[38]

Por último, se ve una potencia útil para el funcionamiento correcto del sistema, lo cual completaría correctamente el límite de Betz.

Ecuación 47. Betz

$$P_{Util}: \frac{1}{2} \rho A (v_1^2 - v_2^2)$$

Fuente:[39]

Para la siguiente tabla de los resultados de esta ecuación nos demuestra de qué fluido se puede aprovechar más la energía cinética.

Tabla 37 Limite de Betz.

Limite de Betz		
Agua	Aire	Diferencia
3,79	3,63	4,31%
7,70	7,41	3,74%
17,80	16,76	5,83%
21,38	20,81	2,69%
27,11	26,78	1,23%
40,12	39,46	1,65%

Fuente: Autor

8. COSTOS

Los valores que se muestran a continuación son los costos reales de la construcción de las piezas que componen la turbina hidro-cinética: Eje principal, placa de adaptación al canal, rotor, tornillería y rodamientos entre otras. En el precio total se incluyeron la mano de obra y los recursos prestados por la Universidad Santo Tomás.

Tabla 38 Costos Turbina.

COSTOS DE TURBINA.	
PARTE	COSTOS (\$ COP)
Placa de adaptación al canal.	114.500
Eje principal.	25.000
Rodamientos.	50.000
Tornillería y anillo retenedor	8.500
Carcasa eje principal.	35.000
Rotores	108.545
Mano de obra	3.624.650
Servicio de CNC	2'480.000
TOTAL	\$4'401.195

FUENTE: AUTOR

El costo total del proyecto corresponde a \$4'401.195 resaltando que el precio de alquiler de máquinas y de la materia prima para el eje y los álabes fueron otorgados por parte de la Universidad Santo Tomás. También hay que tener en cuenta que la mano de obra para los mecanizados es de los autores de este trabajo. Por esta razón los valores de estos recursos son aproximados con respecto a cotizaciones realizadas en empresas que venden estas materias primas y prestan este tipo de servicios [40].

RECOMENDACIONES

- Se debe modificar el canal para regular la velocidad superficial a 1 m/s ligada a un nivel mínimo de 12 cm, para obtener una velocidad de bloque de 0.7m/s que es la de diseño del proyecto.
- Con respecto al rotor se debe buscar otra forma de manufactura para mejorar el acabado superficial, y poder aumentar la eficiencia de la turbina.
- Crear un sistema para la sujeción en canales de aire que tienen los laboratorios de la universidad Santo Tomás.

CONCLUSIONES

- El diseño de la turbina hidro-cinética se ajusta adecuadamente para ser instalada en el canal de ensayos de la Universidad Santo Tomás. Su diseño es apropiado, pero exige que se modifique el vehículo de ensayos, que es el que ejerce el desplazamiento dentro del mismo.
- Los álabes están diseñados para evitar el efecto de borde o bloqueo de pared, ya que se mantienen a una distancia amplia entre el borde del canal y la punta del álabe, evitando modificaciones del flujo alrededor del prototipo. Por este motivo el proyecto es adecuado para realizar análisis de generación de potencia y de torque entre otros.
- El álabe diseñado de perfil NACA 0021 debe tener un ángulo de ataque de 20° ya que, de acuerdo con el análisis realizado en este proyecto, es el que presentó la mejor relación de sustentación – arrastre, lo que indica un buen rendimiento en su funcionamiento.
- Se corroboraron los datos de la etapa de diseño en las pruebas realizadas, el margen de dispersión de los datos no supera al 20% (que se presenta por factores externos que no se tienen en cuenta y que modifican ciertas propiedades).
- La estructura presentada para el diseño de la turbina hidro-cinética permite que sea retirada por los usuarios de una manera rápida y segura, esto es posible gracias a que el sistema hidro-cinético está soportado por una placa de dura-aluminio sujeta a la estructura del canal donde tres tornillos resisten el rotor, el sistema hidro-cinético al estar distribuido en varios componentes se puede desmontar haciendo más sencillo transportar la turbina por secciones, al igual que instalar otros tipos de rotores que se quieran probar en el canal.
- Las características de la fabricación por extrusión de material son poco difundidas o conocidas en los distintos ámbitos de enseñanza y empresas privadas. Son más conocidos sus problemas o errores más habituales,

pero no siempre se sabe qué es lo que los causa y cómo actuar desde el diseño para evitarlos o minimizarlos.

- La utilización de programación paramétrica o programación con macros junto al buen uso de centros de mecanizado CNC flexibiliza procesos, es decir, en el momento que se desee realizar una operación común como en el caso de lo planeado o algo más especial como en el caso del roscado, ya no se necesitaría calcular las coordenadas a las cuales debe ir la herramienta de corte, basta con saber las dimensiones de la materia prima y algunos parámetros para que se puede lograr cualquier tipo de operación.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] M. Kassim, *investigation of the perfomance of submerged turbine un euphrates river*, 3.^a ed. 2016.
- [2] M. Ezequiel, C. Labriola, y H. Moyana, «Dinámicos de energía renovable para la patagonia Argentina», Universidad de Buenos aires, 2016.
- [3] R. Crowson y G. Taylor & Francis, *Assembly Processses*, Second. New York: Taylor & Francis, Group CRC, 2006.
- [4] R. E. Romero Garcia, «Producción de energía eléctrica a partir de los mares», 2010.
- [5] A. A. Gorlov, «Helical Turbine and Fish safety», 2010.
- [6] J. Khan, G. Bhuyang, y J. Quaicoe, «Hydrikinetic energy conversion systems and assesment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal aplications», *Applied energy*, pp. 26-28, 2009.
- [7] M. Shiono, K. Kamada, y S. Kiho, «Output characteristic of Darrieus Water Turbine With Helical Blade for Tidal Current Generations», Tokyo, Japón.
- [8] J. V. Campos Miranda, «Sistemas de generación de energía con turbinas», Escuela Politecnica Nacional, 2009.
- [9] E. F. Abril Romero, «Diseño de una turbina par aun pico central hidroeléctrica para la condiciones del rio vaupes en mitú», Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, 2016.
- [10] R. Busset, «Design and development of a micro power, water current generator», 2014.
- [11] G. J. Marturet, «Simulación fluidodinámica de un modelo de turbina hidrocinetica tipo Gorlov», Tecnica del estado de venezuela, 2012.
- [12] W. Ryan, C. Ryan, y M. Hansen, «Optimization of helical turbine», 2011.

- [13] E. D. R. ORTIZ, «DISEÑO DE UNA TURBINA HIDROCINÉTICA DE EJE HORIZONTAL PARA MICROGENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA», 2017.
- [14] J. P. Murcia y A. Pinilla, «Análisis computacional de perfiles alares», *DOAJ*, vol. 33, n.º Ingeniería, p. 24, 2011.
- [15] J. L. L. AGUDELA, «ESTUDIOS EXPERIMENTALES EN LA CAPA TURBULENTO EN UNATUBERIA DE ACRILICO A DIFERENTES NUMEROS DE REYNOLDS.», 2008.
- [16] GOMEZ, LAURA ALEMANY y E. C. MARCOS, «SIG Y VISOR WEB DE ENERGIA SOLAR Y EOLICA. APLICACION PRACTICA EN EL PAIS VASCO.», 2013.
- [17] L. R. N. López Amable, Somolinos Jose Andres, «MODELO ENERGETICO DE CONVERTIDORES PRIMARIOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGIA DE LAS ENERGIAS RENOVABLES MARINAS», vol. 11, 2014.
- [18] J. Escalera, «ESTUDIO AERODINAMICO DE UN AEROGENERADOR MEDIANTE LA TEORIA BEM(BLADE ELEMENT MOMENTUM)», 2014.
- [19] G. Boothroyd, P. Dewhurst, y W. Knight, *Product Design for Manufacture and Assembly*, Third. New York: Taylor & Francis, Group CRC, 2011.
- [20] J. M. Calvario Herrero, «Mecanizado de un componente de trasmision», Universidad de cádiz, 2007.
- [21] PFERD, «Variables de corte», *PFERD Cut. TOOLS*, p. 4, 2019.
- [22] G. Organization, «TIEMPOS DE MECANIZADO», Buenos Aires, Argentina, 2014.
- [23] A. Roppa, «Estudio y caracterización de las variables que afectan a la impresión 3D en la generación de objetos manipulables», Universidad de la republica de Uruguay, 2016.

- [24] G. A. C. ORTIZ, «DISEÑO DE UN ROTOR HIDROKINÉTICO TIPO GORLOV PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA A UNA VIVIENDA UBICADA EN UNA ZONA NO INTERCONECTADA DEL DEPARTAMENTO DE CASANARE», 2018.
- [25] Qblade, «Software Q-Blade». 2018.
- [26] C. Siemens, «Solid Edge Version Academica 10». 2018.
- [27] P. el T. P, «En Bogotá, el metro cúbico de agua potable es el más caro del país», *El tiempo*, 2014.
- [28] J. E. Shigley, «Diseño en ingeniería mecánica 8va edición», vol. 8, 2006.
- [29] K. A. Linares, «DISEÑO DE UNA TURBINA HIDROKINETICA PARA PRUEBAS EN EL CANAL DE ENSAYOS HIDRODINAMICOS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL», Universidad Santo Tomas, 2018.
- [30] I. A. F, Vera Álvarez;C, y V. Díaz Iopéz, «Aerodinámica de los automóviles», Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
- [31] S. Navarra, «Selección de rodamientos y anillos», *Univ. Navarra*, vol. 5, n.º 25, p. 12, 2015.
- [32] B. SKF, «The SKF model for calculating the frictional moment», *SKF*, vol. 1, n.º 1, p. 22, 2018.
- [33] B. SKF, «Fricción del rodamiento, pérdida de potencia y par de arranque», 2019.
- [34] S. Axxecol, «Aceros de alto desempeño», *Axxecol*, p. 5, 2015.
- [35] F. B. COLMAN, J.; J. MARAÑÓN DI LEO, J. S. DELNERO, M. MARTÍNEZ, U. BOLDES, «ift and drag coefficients behavior at low Reynolds number in an airfoil with miniflap Gurney submitted to a turbulent flow», Universidad de Buenos Aires.

- [36] N. Cook, «Determination of the Model Scale Factor in Wind-Tunnel Simulations of the Adiabatic Atmospheric», IMT, 2015.
- [37] J. . BENDAT y A. . PIERSOL, «Random Data-Analysis and Measurements Procedures.», New York Science, 1986.
- [38] S. A. Jose, «Análisis dimensional y Semejanza», *Mecánica de Fluidos*. Termodinámica, p. 145, 2011.
- [39] J. Meriam Lathrop y L. G. Kraige, *Mecánica para ingenieros Dinámica*, 3ra ed. Bogota, Colombia: John Wiley and Sons Inc, 2000.
- [40] E. L. D. E. P. Rápido, «TECNOLOGÍAS ADITIVAS , UN CONCEPTO MAS AMPLIO QUE Resumen», pp. 6-8, 2011.

Anexos

Anexos A. CÁLCULO DE FUERZAS GENERADAS EN LOS ÁLABES

Fuerza de sustentación

$$F_L = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_l$$

$$F_l = \frac{1}{2} * \frac{998Kg}{m^3} * \left(\frac{0.7m}{s}\right)^2 * 0.016 * 0.58$$

$$F_l = 3.2415 N$$

Fuerza de Arrastre

$$F_d = \frac{F_l}{\varepsilon} \text{ Ó } F_d = C_D * \frac{\rho}{2} * A * V^2$$

$$F_d = 0.25 * \frac{\left(\frac{998kg}{m^3}\right)}{2} * 0.016 * (0.7m/s)^2$$

$$F_d = 1.3972 N$$

Momento de Cabeceo

$$M = C_m \frac{\rho}{2} C^2 v^2$$

$$M = 0.034 * \frac{\left(998 \frac{kg}{m^3}\right)}{2} * (0.019m)^2 * (0.7m/s)^2$$

$$M = 0.1302 Nm$$

Ecuaciones de DCL del Eje

Sumatoria de fuerzas en X

$$\sum F_x = +R_{x_1} - Fd = 0$$

$$R_{x_1} = Fd$$

$$R_{x_1} = 1.125N$$

Sumatorio de fuerzas en Y

$$\sum F_y = -R_{y_1} + R_{y_2} - Fl = 0$$

$$R_{y_1} = R_{y_2} - Fl$$

$$R_{y_1} = -59.42N - 3.24N$$

$$R_{y_1} = -62.73N$$

Sumatoria de fuerzas en Z

$$\sum F_z = +R_{z_1} - R_{z_2} - Wh = 0$$

$$R_{z_1} = R_{z_2} + Wh$$

$$R_{z_1} = 0.90N + 0.677N$$

$$R_{z_1} = 0.61N$$

Sumatoria de momentos plano X-Y punto de referencia Rodamiento 1 (R1Z)

$$\sum M_z = -R_{y_2}(d2) + Fl(d3) + T(d4) + Fd(d5) = 0$$

$$R_{y_2} = \frac{-Fl * d3 - T - Fd * d5}{d2}$$

$$R_{y_2} = \frac{-(3.2415 N * 0.1015m) - (0.6Nm) - (1.3972N * 0.1015)}{0.018m}$$

$$R_{y_2} = -59.49 \text{ N}$$

Sumatoria de momentos planos Z-Y punto de referencia Rodamiento 1 (R1Z)

$$\sum M_x = Wh(D2) + R_{z_2}(D3) = 0$$

$$R_{z_2} = -\frac{Wh * D2}{D3}$$

$$R_{z_2} = -\frac{0.677\text{N} * 0.024\text{m}}{0.018\text{m}}$$

$$R_{z_2} = 0.90\text{N}$$

Anexo para calculo momentos

$$MTr = \sqrt{(20.27^2 + 0.6^2)}$$

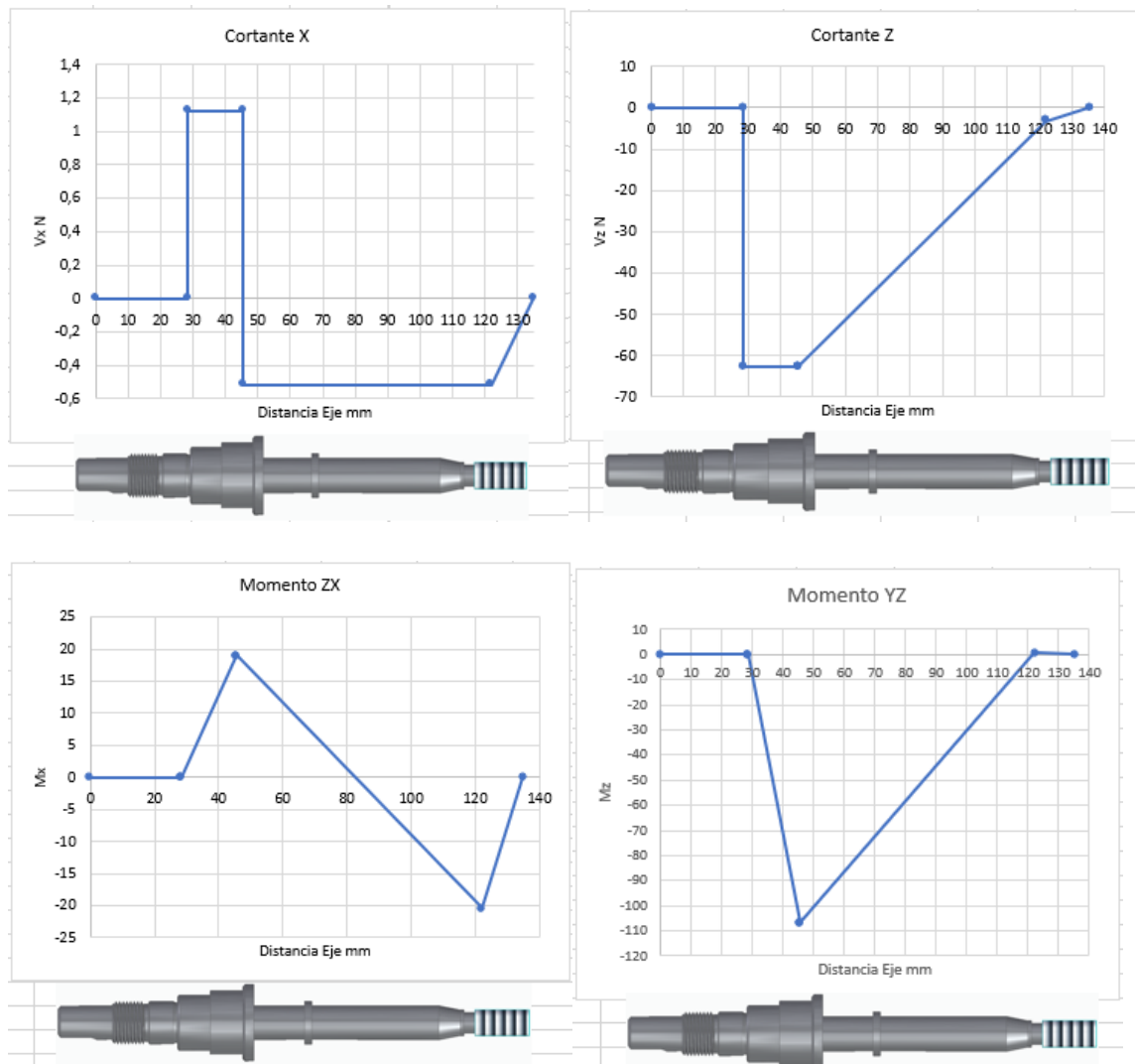
$$MTr = 20.27\text{Nm}$$

$$MBr = \sqrt{(19.12^2 + 106.41^2)}$$

$$MBr = 108.11\text{Nm}$$

$$MAr = \sqrt{(1.125^2 + 0^2)}$$

$$MTr = 1.125\text{Nm}$$



ANEXOS C. CÁLCULO DE FACTORES DE SEGURIDAD.

Ecuación del esfuerzo alternante prima

$$\sigma' a = \sqrt{\left(Kf \left(\frac{32Ma}{\pi d^3}\right)^2\right) + 3\left(Kfs \left(\frac{16Ta}{\pi d^3}\right)^2\right)}$$

$$\sigma' a = \sqrt{\left(1 \times \left(\frac{32 \times 108.11}{\pi 0.010^3}\right)^2\right) + 3(0^2)}$$

$$\sigma' a = 0.9 Mpa$$

Ecuación del esfuerzo medio prima

$$\sigma' a = \sqrt{\left(Kf \left(\frac{32Ma}{\pi d^3}\right)^2\right) + 3 \left(Kfs \left(\frac{16Ta}{\pi d^3}\right)^2\right)}$$

$$\sigma' m = \sqrt{(0^2) + 3 \left(\left(\frac{16 * 0.6}{\pi 0.010^3}\right)^2\right)}$$

$$\sigma' m = 0.5 Mpa$$

Se selecciona el valor de S'_e que corresponde a 690 MPa de acuerdo con la figura siguiente ya que el $S_{ut} = 1520$

$$S'_e = \begin{cases} 0.5 S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1 400 MPa)} \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1 400 \text{ MPa} \end{cases}$$

Resultados de ensayos a la tensión de algunos metales* Fuente: J. Datsko, "Solid Materials", capítulo Brown, Jr. (editores en jefe). *Standard Handbook of Machine Design*, 3a. ed., McGrawHill, Nueva York, 2004, p.

Número	Material	Condición	Resistencia (a la tensión)		
			Fluencia S_y MPa (kpsi)	Última S_u MPa (kpsi)	A la fractura, σ_f MPa (kpsi)
1018	Acero	Recocido	220 (32.0)	341 (49.5)	628 (91.1) [†]
1144	Acero	Recocido	358 (52.0)	646 (93.7)	898 (130) [†]
1212	Acero	HR	193 (28.0)	424 (61.5)	729 (106) [†]
1045	Acero	TyR 600°F	1 520 (220)	1 580 (230)	2 380 (345)
4142	Acero	TyR 600°F	1 720 (250)	1 930 (210)	2 340 (340)
303	Acero Inoxidable	Recocido	241 (35.0)	601 (87.3)	1 520 (221) [†]
304	Acero Inoxidable	Recocido	276 (40.0)	568 (82.4)	1 600 (233) [†]
2011	Aleación de aluminio	T6	169 (24.5)	324 (47.0)	325 (47.2) [†]
2024	Aleación de aluminio	T4	296 (43.0)	446 (64.8)	533 (77.3) [†]
7075	Aleación de aluminio	T6	542 (78.6)	593 (86.0)	706 (102) [†]

Cálculo de factores para hallar S_e

La selección del factor de superficie está dada por la siguiente ecuación

Ecuación Factor de superficie

$$K_a = a S_{ut}^b$$

Los valores de a y b se seleccionaron a partir de figura a continuación, esto a partir del acabado superficial.

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S_{ut} kpsi	S_{ut} MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Se reemplaza los valores en la ecuación (factor superficie)

$$K_a = 4.51 (1580^{-0.265})$$

$$K_a = 0.64$$

Cálculo del factor de tamaño K_b , este valor se toma a partir de la figura (siguiente) el cual se selecciona con el valor del diámetro.

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

$$K_b = 1.24(10^{-0.107})$$

$$K_b = 0.97$$

Luego se selecciona el factor de temperatura K_c . Se toma para carga de flexión que

corresponde a 1 de acuerdo con la figura siguiente.

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsión}^{17} \end{cases}$$

$$Kc = 1$$

Se selecciona el Factor de temperatura K_d por operación del elemento, se tomó de la figura mostrada a continuación.

Temperatura, °C	S_T/S_{RT}	Temperatura, °F	S_T/S_{RT}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

Se toma este valor debido a que el dispositivo estará en un entorno de máximo 21°C, y en un fluido de temperatura media 12°C.

$$Kd = 1$$

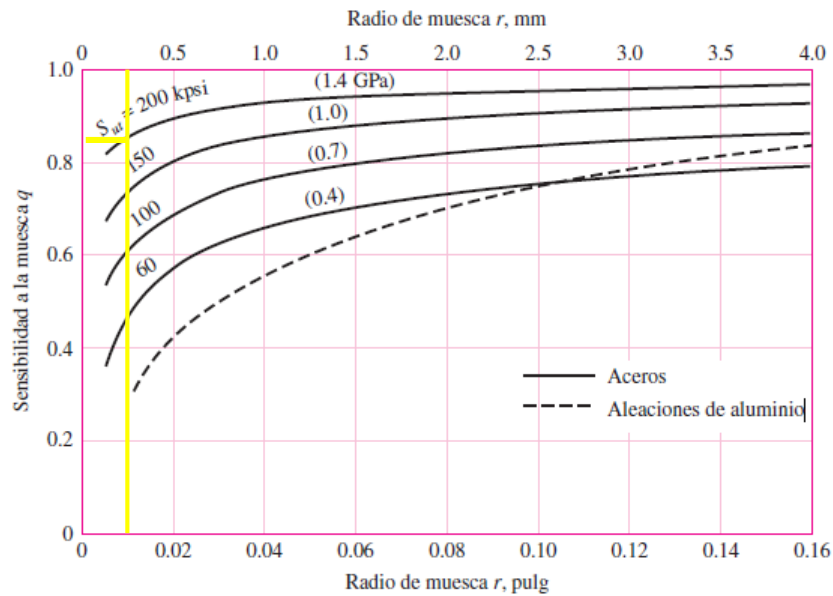
Selección del factor de confiabilidad, valor tomado de la figura seguida.

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_u	Factor de confiabilidad k_u
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

$$Ke = 0.814$$

Factor de efectos varios, el valor de este factor será dado por la figura ya que el eje presenta cambio de sección y muesca de 0.5mm el punto A el cual es el más crítico.

$$Kf = 1 + \left(\frac{kt - 1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}} \right)$$



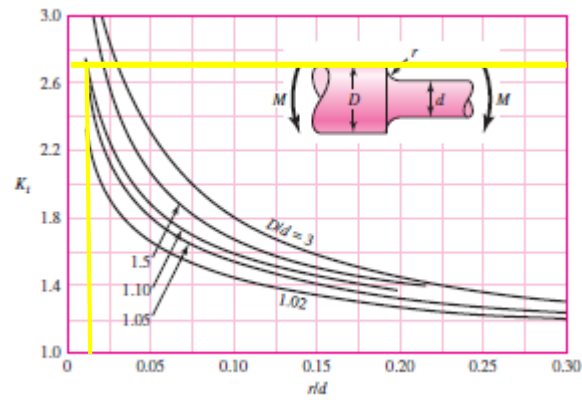
Por la figura anterior el $q = 0.84$ aproximadamente

Ecuación de constante de Neuber

$$\sqrt{a} = 0.245799 - 0.307794(10^{-2})S_{ut} + 0.150874(10^{-4})S_{ut}^2 - 0.266978(10^{-7})S_{ut}^3$$

$$\sqrt{a} = 311.69$$

Se busca en la siguiente figura el K_t



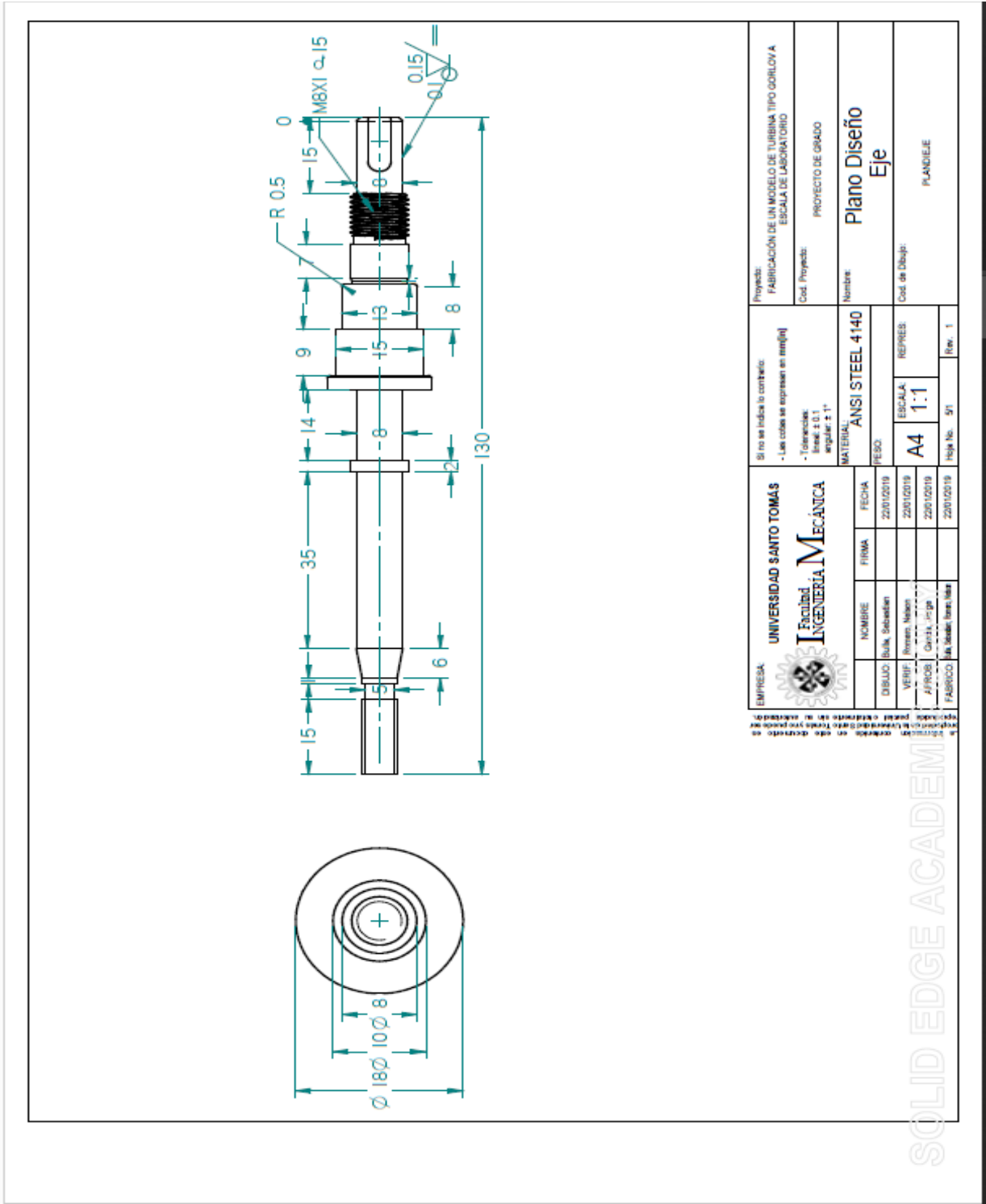
Se obtiene un valor de 2.7. reemplazando en la ecuación de (K_f)

$$K_f = 1 + \left(\frac{2.7 - 1}{1 + \frac{\sqrt{311.69}}{\sqrt{0.5}}} \right)$$

$$K_f = 1.06$$

ANEXOS D. EJE PLANOS, HOJA DE PROCESO, Y CÓDIGO G

Plano Eje Diseño



Plano Eje Manufactura



Código G de eje	G28V0	G01Z10.50F50
%	T0404	G00X15
N10(REFRENTADODESBASTESECCION1)	G41	G00Z-5
G54G40G99G50S1=2000	G00Y0	G00X6
G43.1	G96M3S1=200	G01Z10.50F50
G28U0	G00X20Z-1	G1X10
G28V0	G00X7	G0Z-5
T0303	G01Z0F0.03	G0X4.8
G0Y0	G01X7.990Z0.5	G1Z10.50F50
G96M3S1=120	G01Z16	G1X20
M8	G01X20	G0X50
G00X20Z-1	G40	M105
G01Z0F0.2	G0X50	M92
G01X-0.5	M05	N40(DESBASTESECCION2)
G01Z-1	N30(CHAVETERO)	G54G18G40G99G50S1=2000
G00X20	G54G19G98G50S3=2000	G43.1
G71U1.5R0.5F0.2	G43.1	G28U0
G71P31Q33U0.5W0.1	M92	G28V0
N31G00X8	G28U0	T0303
N32G01Z16	G28V0	G0Y0
N33G01X20	M5	G96M3S1=120
G00X50	M90	G0X20Z15
N20(ACABADOSECCION1)	T0707	G71U1.5R0.5F0.2
G54G40G99G50S1=4000	G0Y0	G71P41Q44U0.4W0.1
G43.1	G97M103S3=2000	N41G01X10
G28U0	G0C0	N43G01Z34
	G0X7Z-5	N44G01X20

G0X50
N50(ACABADOSECCION2)
G54G40G99G50S1=4000
G43.1
G28U0
G28V0
T0404
G41
G96M3S1=200
G0Y0
G0X20Z15
G0X9
G1Z16F0.03
G01X9.85Z16.5
G01Z24.5
G01X9.97
G01Z32.98
G01Z33.50X9.80
G01Z34
G01X20
G40
G0X50
N60(RANURADO)
G54G40G99G50S12000
G43.1
G28U0
G28V0

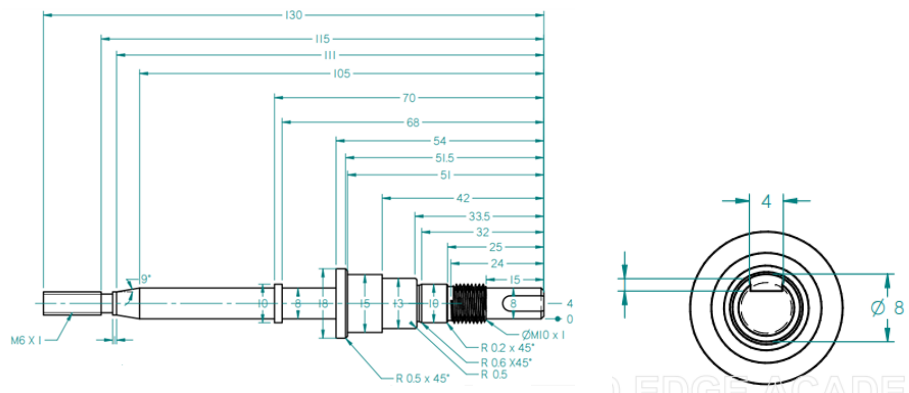
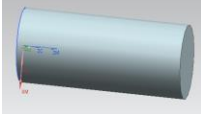
T0202
G0Y0
G96M3S1=50
G0X12Z25.50
G75R0.2F0.03
G75X8.9P0.2
G0X50

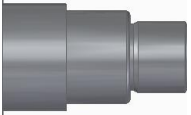
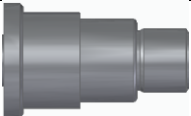
N65(RANURAPIN)
N67G54G19G98G50S3=2000
G43.1
M92
G28U0
G28V0
M5
M90
T0707
G0Y0
G97M103S3=2000
G0C0
G0X8.5Z10
G01Z23.7F50
G01X15
G0Z10
G01X7F50
G01Z23.7
G01X15

G00X50
M105
M92
N70(ROSCADO)
G54G18G40G99G50S1=500
G43.1
G28U0
G28V0
T0505
G0Y0
G97M3S1=500
G0X11Z15
G76P020560Q0.04R0.03
G76X8.964Z24.8P0.518Q0.1F0.75
G0X50
N80(DESBASTESECCION3)
G54G40G99G50S1=2000
G43.1
G28U0
G28V0
T0303
G0Y0
G96M3S1=120
G0X20Z33
G71U1.5R0.5F0.2
G71P82Q84U0.3W0.1
N82G01X10F0.1

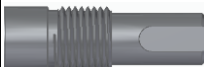
N83G01Z43.50	G71U1.5R0.5F0.2	G0X50
N84G01X20	G71P91Q95U0.3W0.1	N120(PPP)
G0X50	N91G00X15	G54G40G99G50S1=1500
N90(ACABADOSECCION3)	N92G01Z52.5	G43.1
G54G40G99G50S1=4000	N93G01X18.5	G28U0
G43.1	N94G01Z56.50	G28V0
G28U0	N95G01X20	T0101
G28V0	G0X50	G00Y0
T0404	N110(ACABADOSECCION4)	G96M3S1=50
G41	G54G40G99G50S1=4000	G00X20Z57
G0Y0	G43.1	G75R0.5F0.05
G96M3S1=200	G28U0	G75X7.9P0.5
G0X12Z33.5	G28V0	G00X20Z59.5
G01X9.8F0.03	T0404	G75R0.5F0.05
G01Z43.50	G41	G75X7.9P0.5
G01X20	G0Y0	G00X20Z62
G40	G96M3S1=200	G75R0.5F0.05
G0X50	G0X14Z42.5	G75X7.9P0.5
N100(DESBASTESECCION4)	G01Z43.50F0.03	G00X20Z64.5
G54G40G99G50S1=2000	G01Z44.00X15	G75R0.5F0.05
G43.1	G01Z51	G75X7.9P0.5
G28U0	G01X14.40Z51.52	G00X20Z67
G28V0	G01Z52.5	G75R0.5F0.05
T0303	G01X18.50	G75X7.9P0.5
G0Y0	G01Z56.50	G00X20Z68
G96M3S1=120	G01X20	G75R0.5F0.05
G0X20Z42.5	G40	G75X7.9P0.5

G00X20Z70.5	G01Z133	G97S1=500M8
G75R0.5F0.05	G01X20	G0Z113.5
G75X10.5P0.5	G00X50	X7
G00X20Z73	N140(RANURADOROSCA)	G76P020560Q0.05R0.01
G75R0.5F0.05	G54G40G99G50S1=600	G76X4.584Z131.5P0.708Q0.18F1
G75X7.9P0.5	G43.1	G0X50
G00X20Z75.5	G28U0	N160(TRONZADOFPNAD)
G75R0.5F0.05	G28V0	G54G40G99G50S1=1000
G75X7.9P0.5	T0101	G43.1
G00X20Z78	G00Y0	G28U0
G75R0.5F0.05	G96M3S1=50	G28V0
G75X7.9P0.5	G00X10Z115	T0101
G00X50	G75R0.5F0.05	G00Y0
	G75X4.4P0.5	G96M3S1=60
N130(CILINDRADO)	G00X20	G0Z133
G54G40G99G50S1=1000	G00Z133	X20
G43.1	G75R0.5F0.05	G75R0.5F0.05
G28U0	G75X4.4P0.5	G75X2.5P0.5
G28V0	G00X50	G0X50
T0303	N150(ROSCADOFINAL)	M5
G0Y0	G54G99G50S1=500	M9
G96M3S1=60	G43.1	M30
G00X20Z77	G28U0	%
G01X7.9F0.04	G28V0	
G01Z105	T0505	
G01X5.85Z111	G0Y0	
Hoja de proceso		

Fecha: 2019				Universidad Santo Tomas Facultad de Ingeniería Mecánica					
HOJA DE PROCESO					Maquina: Polygim 20CSB				
Denominación: Pieza prueba				Material: Dura-aluminio		N° de Pieza: 1 -1			
									
Material : 45 mm				Aplicación: Prueba					
Sub-fase	N° de Operación	Operación	Herramienta	Sujeción de Pieza	Datos de Corte				
					Vc [m/min]	ap[mm]	s[rpm]	F[mm/min]	Tiempo (segundos)
1	1.1	Material en bruto	-		Material en bruto a 1 mm de voladizo (Cero de pieza)				
2	2.1	Refrentado-Desbaste 1	T3		60	3	2000	0,2	7.5
3	3.1	Desbaste 2	T4		60	4	4000	0,03	6.25
4	4.1	Chavetero	T7		60	1	2000	0,1	4.3

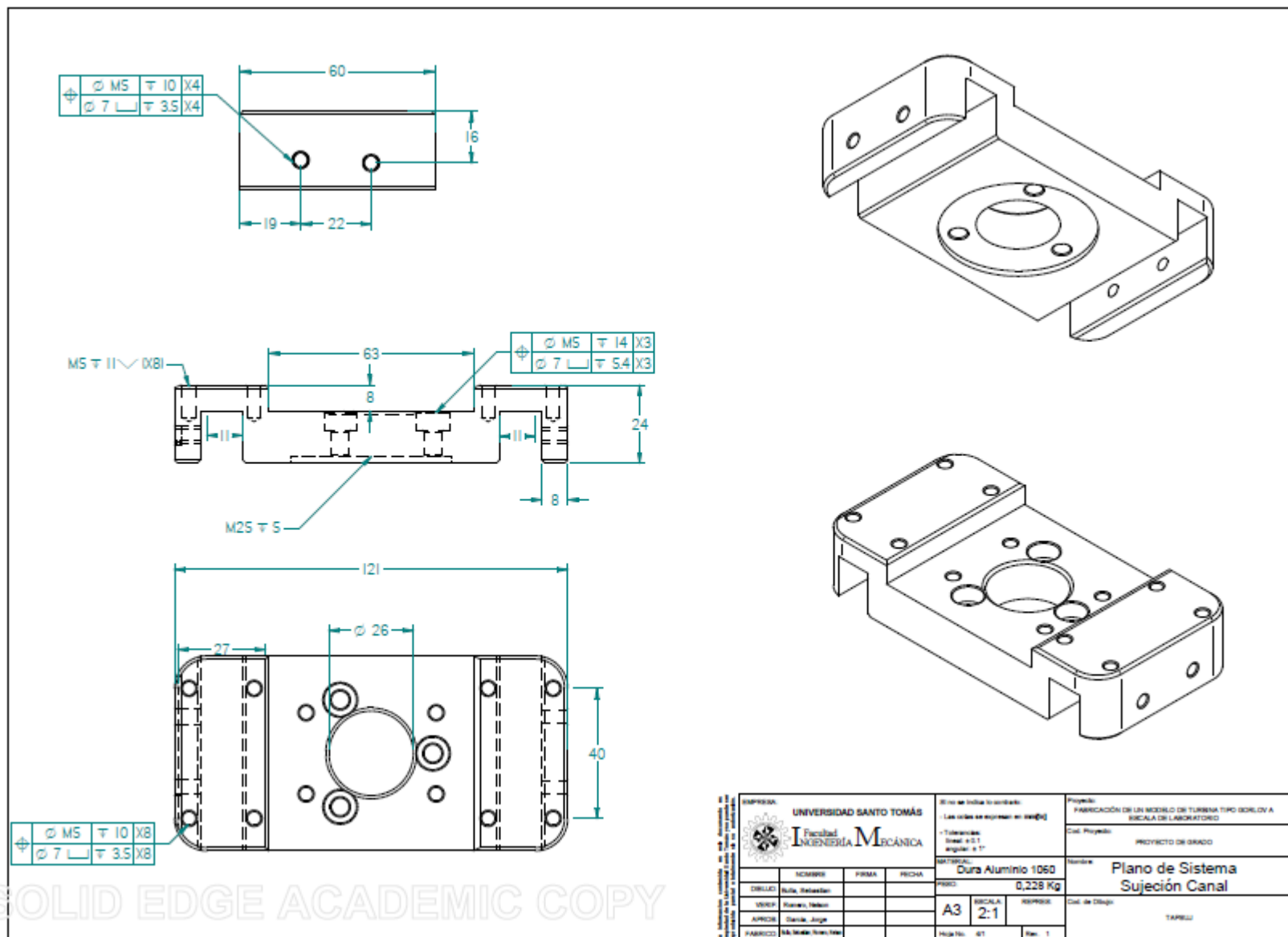
	4.2	Desbaste 3	T3		60	1	2000	0,1	9.85
5	5.1	Ranurado 1	T2		50	0,50	2000	1	7.25

Hoja de proceso pieza eje

Fecha: 2019			Universidad Santo Tomas Facultad de Ingeniería Mecánica						
HOJA DE PROCESO						Maquina: Polygim 20CSB			
Denominación: Pieza prueba			Material: Dura-aluminio			N° de Pieza: 1 -1			
Subfase	N°deOperación	Operación	Herramienta	Sujeción de Pieza	Datos de Corte				
					Vc [m/min]	ap[mm]	s[rpm]	F(mm/min)	Tiempo (segundos)
6	6.1	Roscado 1	T5		60	0.5	500	0,1	14,2
7	7.1	Desbaste 3	T3		60	1	2000	0,5	4,2
8	8.1	Acabado 1	T4		60	1	4000	1	5,3
9	9.1	Desbaste 4	T3		60	0.5	2000	0.2	8,5
10	10.1	Acabado 2	T4		80	0.03	4000	0.03	5,4

11	11.1	Tronzado	T1		30	2.5	1500	0.05	24,4	
12	12.1	Cilindrado	T3		60	1.5	1000	0.04	116,4	
13	13.1	Ranurado	T1		50	1.5	600	0.05	3,8	
14	14.1	Roscado Final	T5		60	0.7	500	0.01	53,6	
15	15.1	Tronzado Final			60	2.5	1000	0.5	10,9	
TABLA DE HERRAMIENTAS										Total
T1: Insertos Kyocera KGMR1212H-3										(minutos)
T3: Insertos Kyocera ADJCR1212JX-11FF										4.69
T4: Insertos Kyocera AVJBR1212M-11F										
T5: Insertos Kyocera KTTXR1212M-16F										
T13: Broca de centro 2mm										
T15: Broca punta 6mm										

Plano Diseño Placa



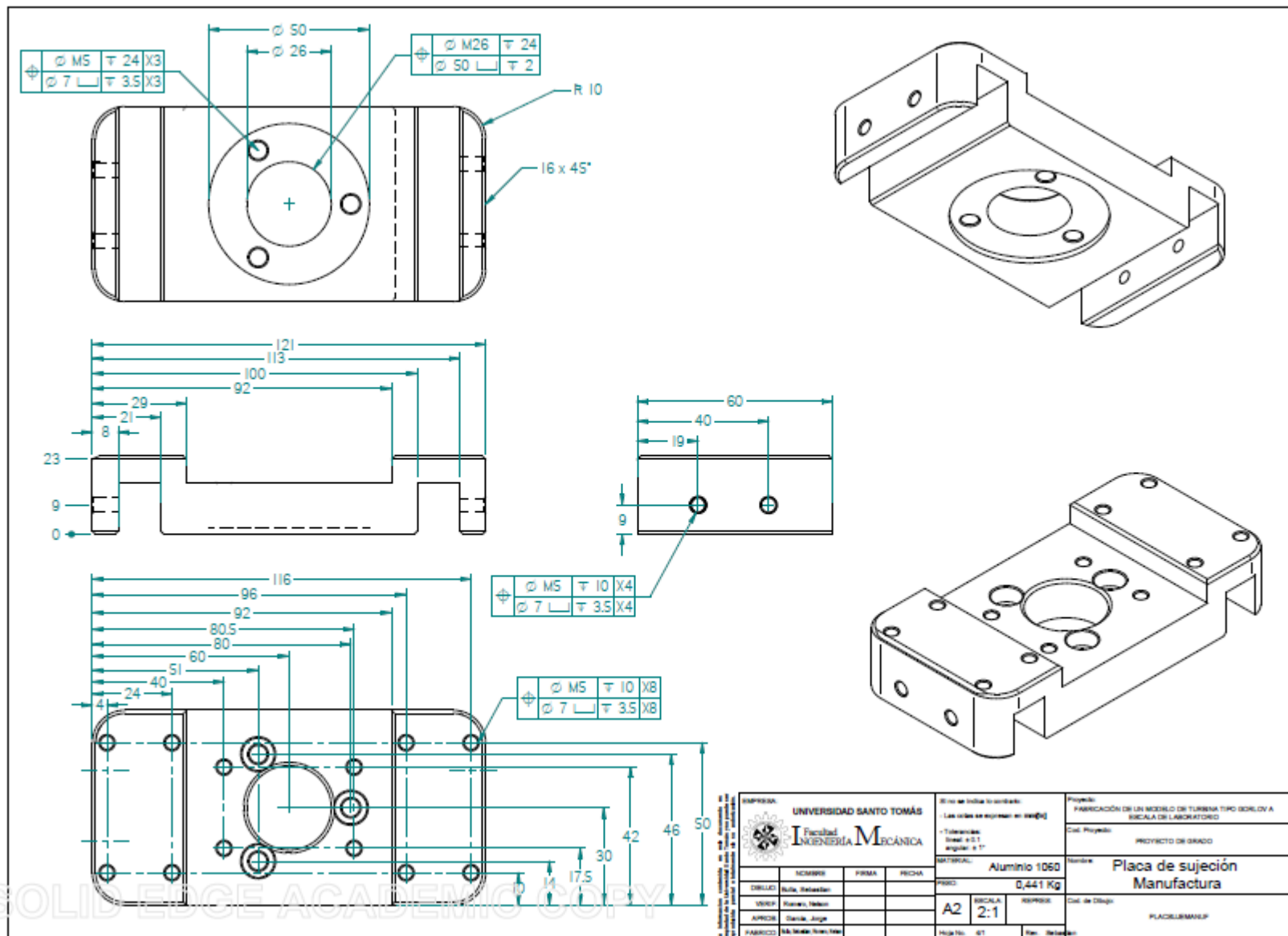
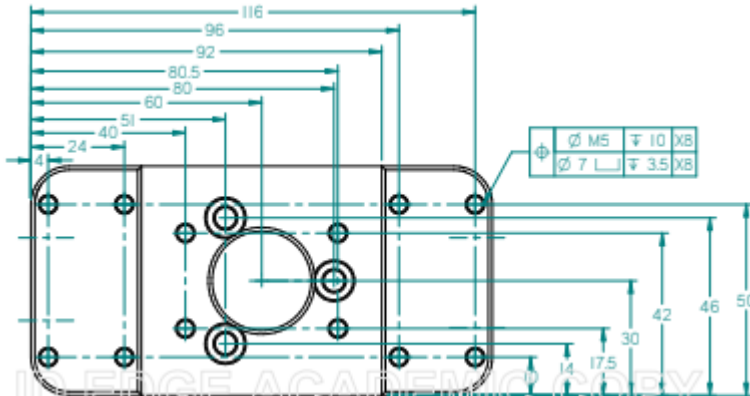
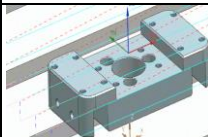
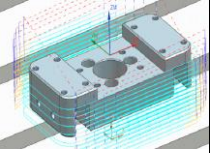
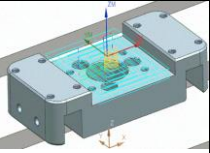
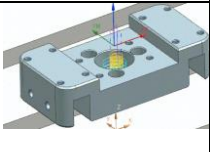
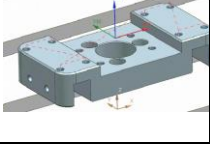
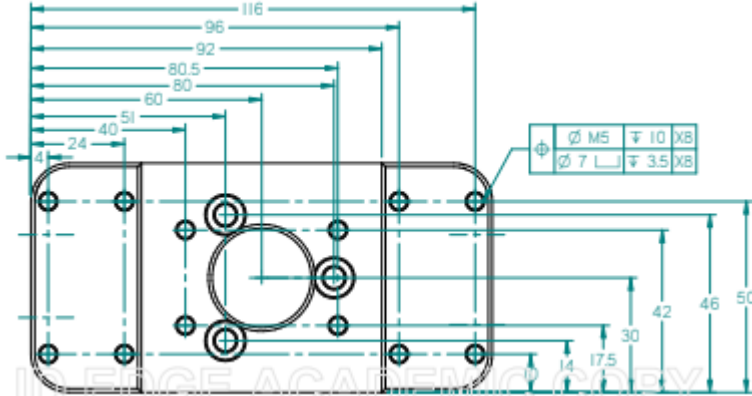
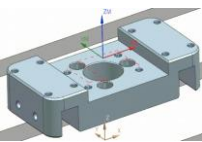
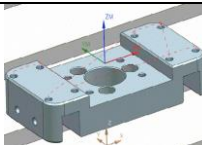
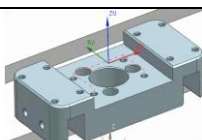
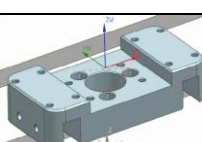
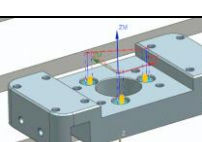
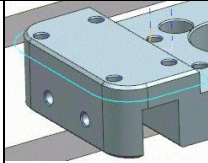
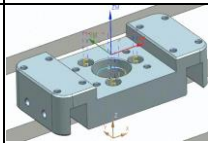
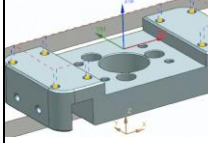
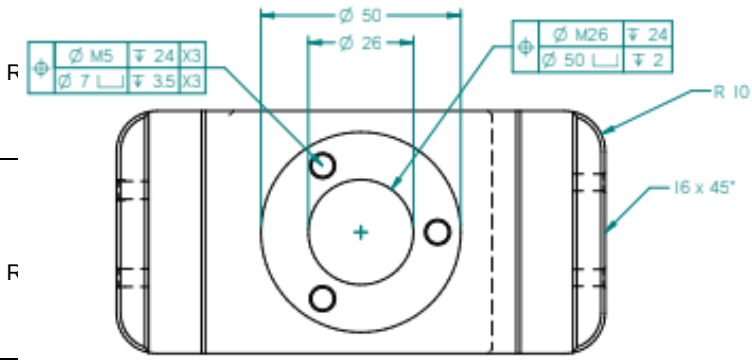


Figura. Hoja de proceso Cara superior.

Fecha: 2019				Universidad Santo Tomás Facultad de Ingeniería Mecánica					
HOJA DE PROCESO					Maquina: Polygim 20CSB				
Denominación: Pieza prueba			Material: Dura-aluminio		N° de Pieza: 2.1				
									
				Aplicación: Prueba					
Sub-fase	N° de Operación	Operación	Herramienta	Sujeción de Pieza	Datos de Corte				
					Vc [m/min]	ap[mm]	s[rpm]	F[mm/min]	Tiempo (segundos)
1	1.1	Material en bruto	-		Material en bruto a 70,2 mm de material a trabajar (Cero de pieza)				
2	2.1	Refrentado	T3		180	1,5	1146	5	203,4

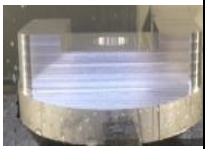
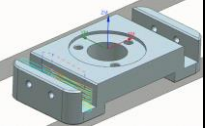
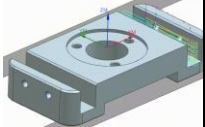
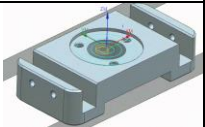
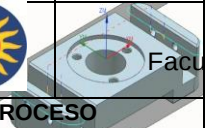
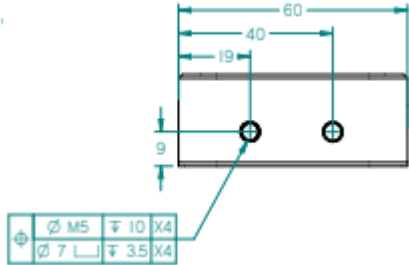
3	3.1	Fresado 1	T15		60	2	2565	5	946,2
3	3.2	Fresado 2	T15		60	1	1850	2.5	241,8
3	3.3	Fresado 3	T11		80	1,5	2000	1.5	139,8
4	4.1	Broca de centro 1	T18		---	--	4000	---	34,8

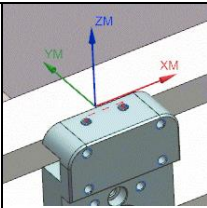
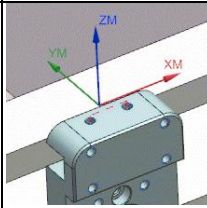
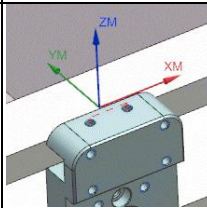
Fecha: 2019				Universidad Santo Tomas Facultad de Ingeniería Mecánica					
HOJA DE PROCESO				Maquina: Polygim 20CSB					
Denominación: Pieza prueba			Material:		N° de Pieza: 2.1				
									
				Aplicación: Prueba					
Sub-fase	N° de Operación	Operación	Herramienta	Sujeción de Pieza	Datos de Corte				
					Vc [m/min]	ap[mm]	s[rpm]	F(mm/min)	Tiempo (segundos)
4	4.2	Broca de centro 2	T1		---	--	4000	---	30
5	5.1	Taladrado 1	T16		1.5	1.5	2000	15	59,4
5	5.2	Taladrado 2	T16		1.5	2	2000	15	23,4
5	5.3	Taladrado 3	T16		1.5	4	2000	15	40,2
5	5.4	Fresado 4	T16		2.5	1.5	2000	2.5	517,2

6	6.1	Chafilán	T19		1	0.5	4000	150	20,4
7	7.1	Mandrilado 1	T19		5	2.5	2000	112	31,2
7	7.2	Mandrilado 2	T19		5	1.5	2000	100	78
Fecha: 2019.7.3			T18		5		2000	100	
HOJA DE PROCESO					Maquina: Polygim 20CSB				
Denominación: Pieza prueba			Material:			N° de Pieza: 2.1			
8	8.1	F	F		2			1.5	19,8
8	8.2							1.5	7,8
Total									(minutos)
Sub-fase	N° de Operación	Operación	Herramienta	T3: Face Mill 60 mm T5: Tap M5 x 0.8 T11: Carbide End Mill #6 Pieza T6: Twist Drill 4.2 mm T18: Twist Drill 5.9 mm T15: End mill 10 mm T19:	Vc [m/min]	ap[mm]	s[rpm]	F[mm/min]	Tiempo (segundos)
									40,8

Fuente :
[Autor]

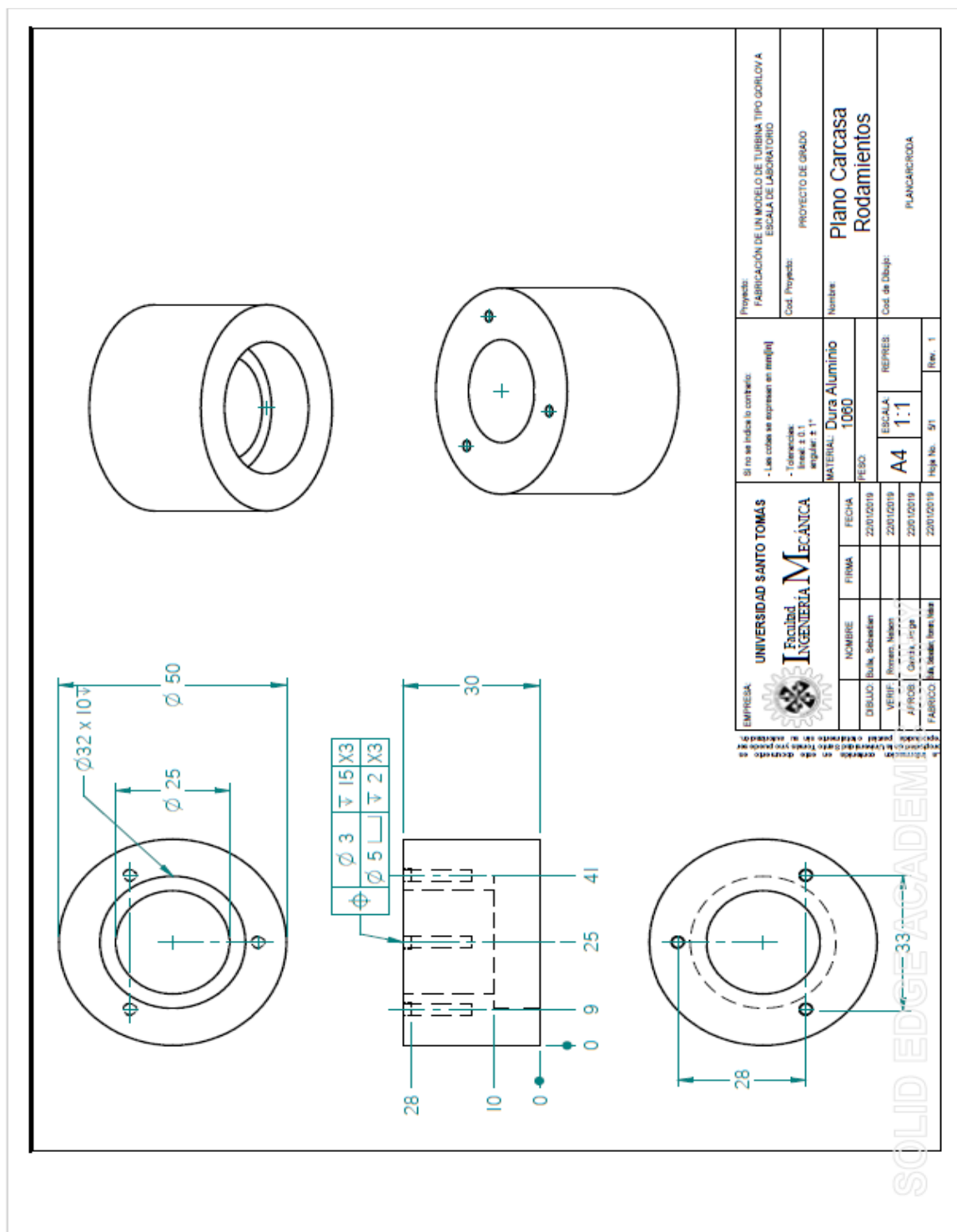
HOJA DE PROCESO (Continuación). Hoja de proceso o pieza placa (cara inferior)

1	1.1	Material Bruto	-		Se deja Cara Superior, con Materia prima sobrante 30 mm				
2	2.1	Fresado 1	T15		1	2.5	2000	100	89,8
2	2.2	Fresado 2	T15		1	2.5	2000	100	89,8
2	5.2	Fresado 3	T15		0.5	1	2000	50	35,4
3	3.1	Mandrilado 1	T15		2500	100			
Fecha: 2019 Universidad Santo Tomás Facultad de Ingeniería Mecánica					Maquina: 2 14,2 20CSB				
HOJA DE PROCESO Denominación:					Material: N° de Pieza: 2.1				
3	3.2	Mandrilado 2	T15					100	46,8
TABLA DE					Total				
Sub-fase	N° de Operación	Operación	Herramienta	Sujeción de Pieza	Vc [m/min]	ap[mm]	s[rpm]	F(mm/min)	Tiempo (segundos)
1	1.1	Material Bruto	-		Se coloca pieza de forma vertical, con sobrante de 10 mm				

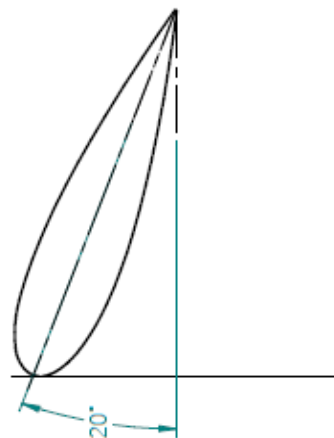
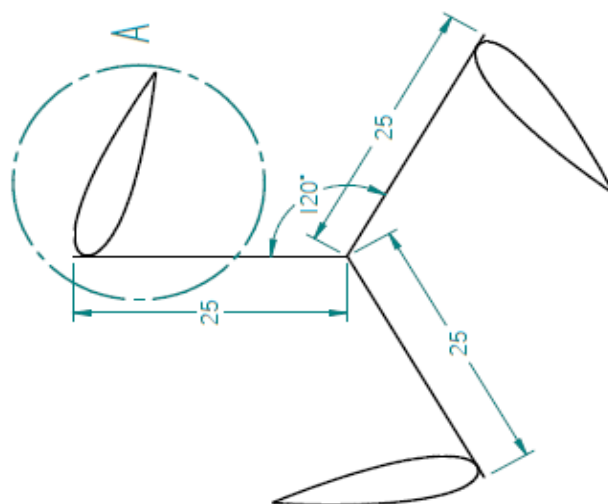
2	2.1	Broca de Centro 1	T18		----	-----	4000	----	7,2
3	3.1	Taladrado1	T16		1	10	2000	250	15,1
4	4.2	Roscado 1	T5		0.5	1	500	150	6
TABLA DE HERRAMIENTAS									Total (minutos) 0,88(x2)
T19:									
T15: End mill 10 mm									
T18:									
T5:									

ANEXOS F. PLANO CARCASA

Plano



Anexos G. PLANO ROTOR Y HOJA DE PROCESO



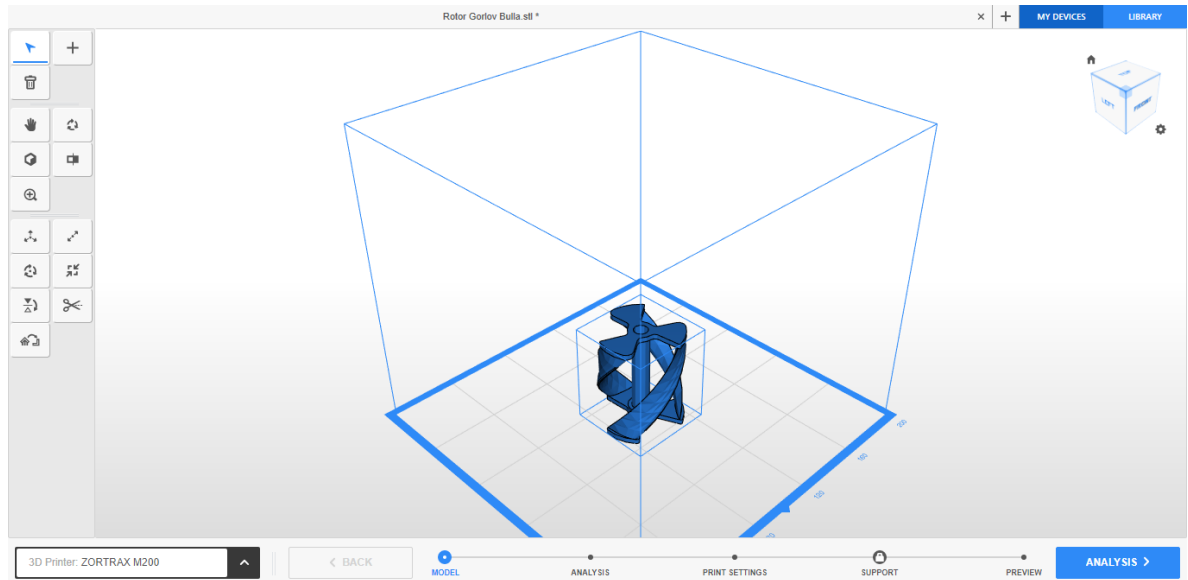
DETAIL A

EMPRESA:		UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS		Proyecto:		FABRICACIÓN DE UN MODELO DE TURBINA TIPO GORLOV A	
DIBUJO:		Bella, Sebastian		Cod. Proyecto:		PROYECTO DE GRADO	
VERIFICAR:		Rosales, Nelson		Nombre:		Plano Alabes Rotor Gorlov	
APROBAR:		García, Jorge		Cod. de Diseño:		Paralela	
FABRICAR:		Bella, Sebastian		MATERIAL:			
FECHA:		22/01/2019		PESO:			
VERIFICAR:		22/01/2019		ESCALA:		A3 1:1	
APROBAR:		22/01/2019		Hoja No.:		51	
FABRICAR:		22/01/2019		Rev.:		1	

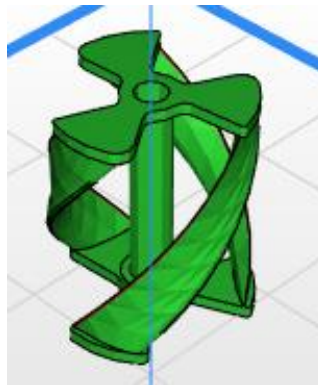
SOLID EDGE ACADEMY

Hoja de proceso

Se exporta el CAD al software de la impresora (Z-Suite)



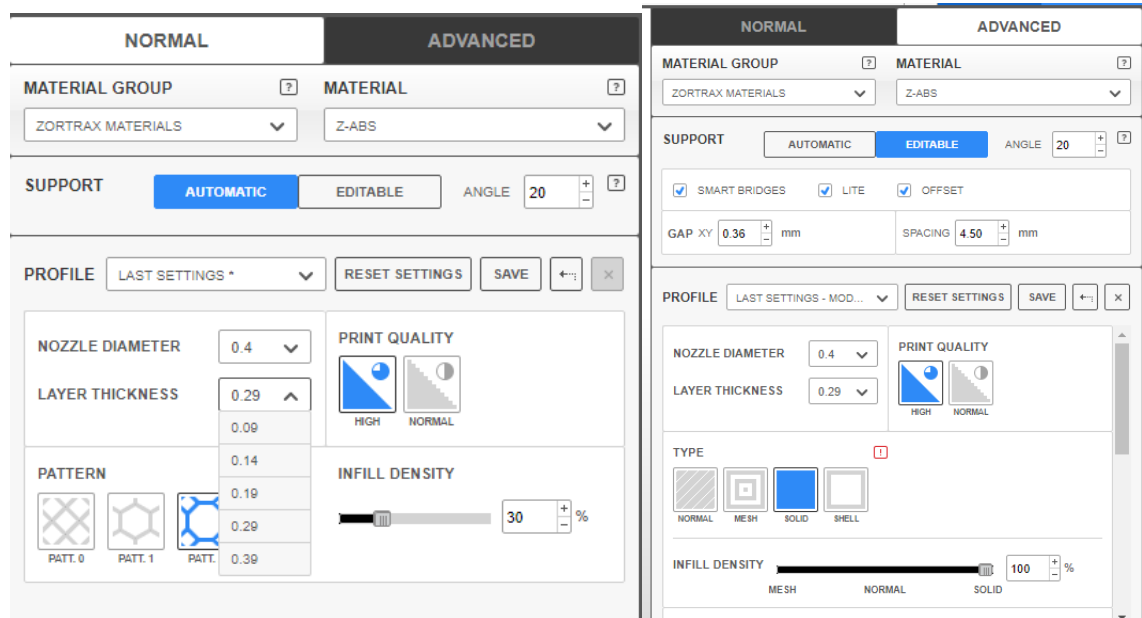
Se le da clic en hacer análisis, para que el software, analice las secciones de impresión, las que se encuentran en verde, son imprimibles y las rojas son muy delgadas. Y la impresora no alcanza a ese grosor, lo cual corresponde a la cola del alabe.



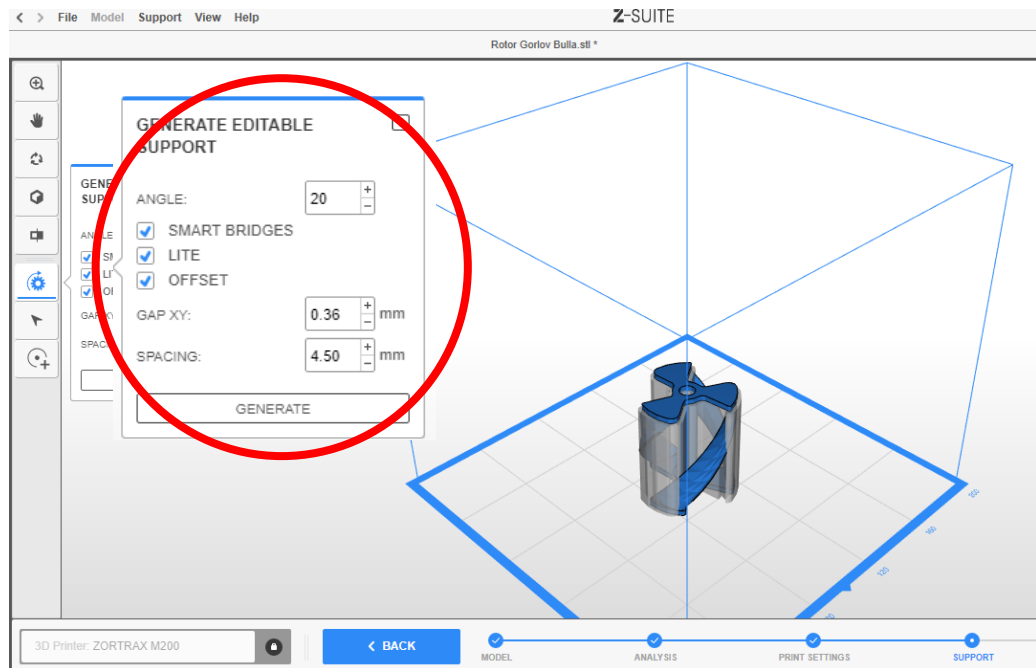
Luego se selecciona, la configuración de la impresión, de los parámetros hablados en la pagina 24, lo cual en la siguiente tabla se muestra un resumen de los parámetros.

Parámetro	Valor
Temperatura	215°C
Velocidad	0.15hilos/in

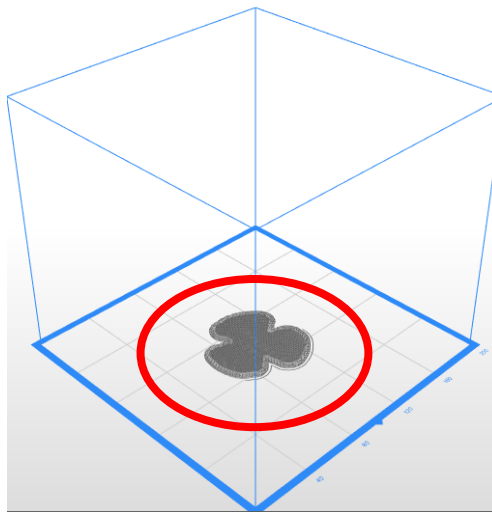
Camas de adhesión	4 capas
Soportes auxiliares	3 torres de estructura hexagonal
Cascara	0.4
Relleno o Infil	100%
Material	Z-ABS, Z-PLA



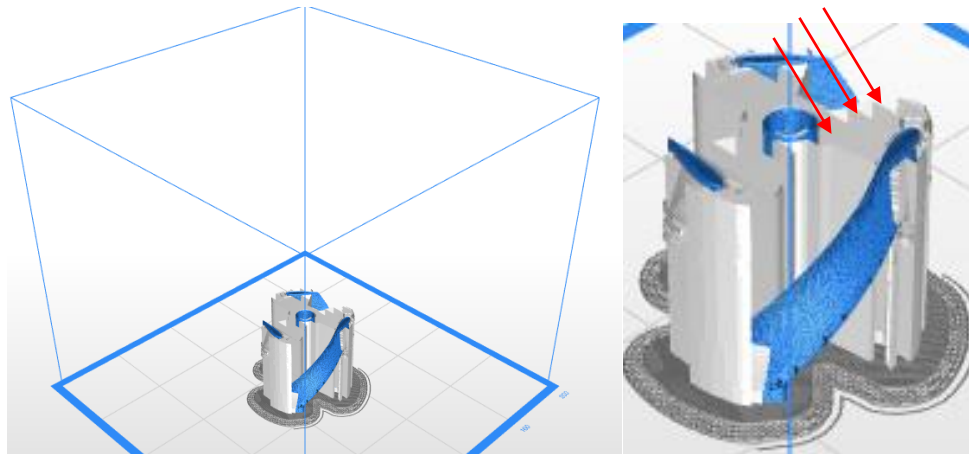
Ya definiendo los parámetros, se genera una estructura que soportar las piezas del modelo que se encuentran en voladizo, como los alabes, en este nos indica las propiedades de los apoyos auxiliares.



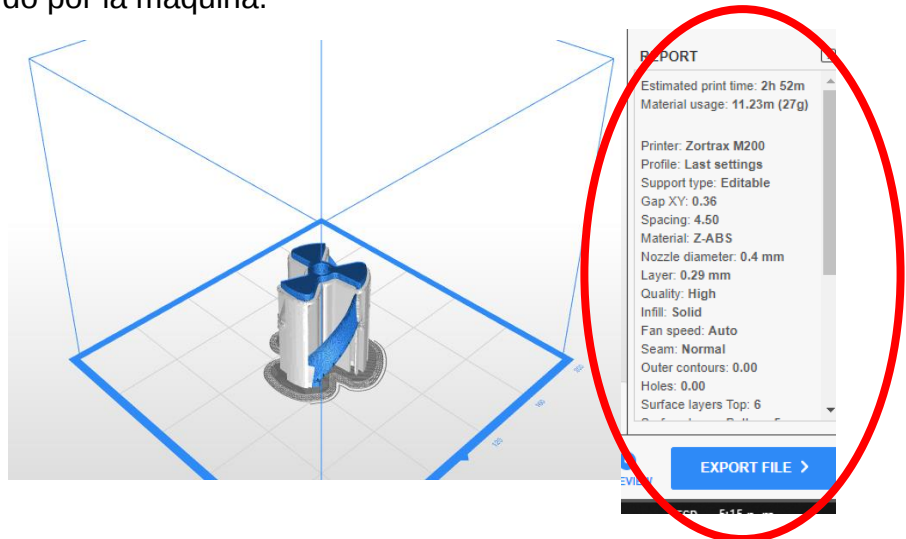
En la siguiente imagen muestra la generación de las capas de la cama de adhesión.

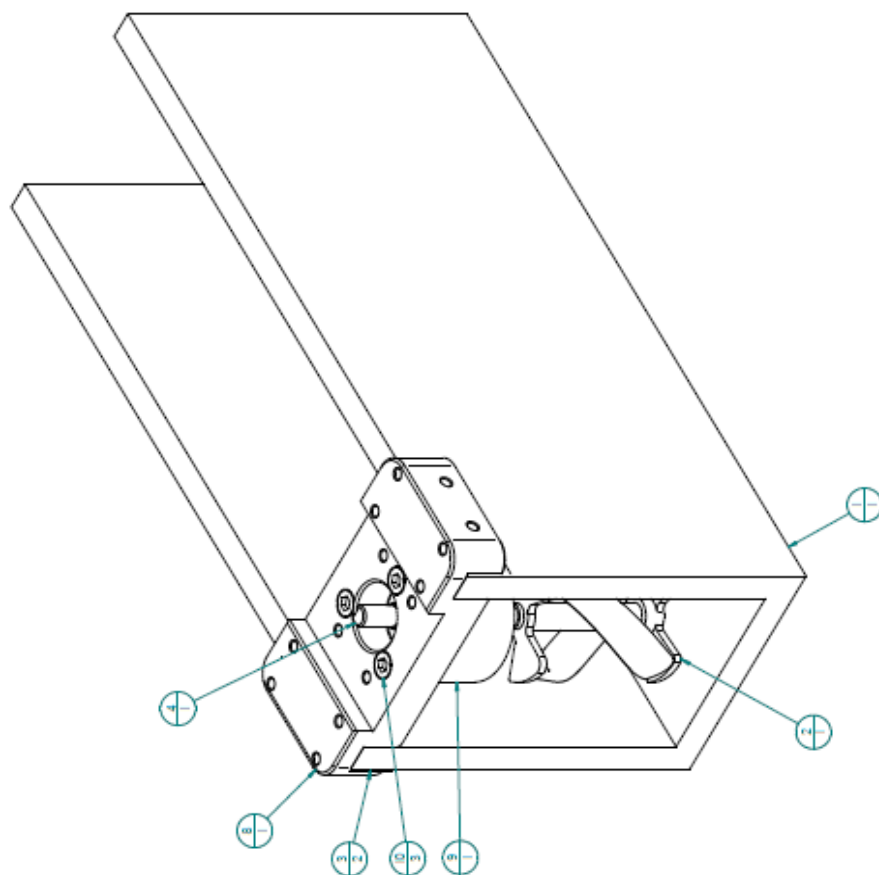


En la siguiente imagen se muestra lo que se refiere de las “cascaras”, son las laminas de ayuda de sujeción y fijación del modelo a imprimir.



Y finalmente muestra todo el proceso completo de impresión, para así exportar el código que será leído por la máquina.





Número de elemento	Nombre activo (sin abreviaturas)	Autor	Cantidad
1	Corte	Sección Avanzada	1
2	Rotor Borlor	Sección Avanzada	1
3	Protección para operación	Sección Avanzada	2
4	Eje para turbinas	Sección Avanzada	1
5	Reducción interna 2	Sección Avanzada	1
6	Reducción interna	Sección Avanzada	1
7	Tuerca de protección de eje	Sección Avanzada	1
8	Soporte Cond.	Sección Avanzada	1
9	Reducción	Sección Avanzada	1
10	Tornillo Placa fijación reducción	Sección Avanzada	3

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CALABAZA DE LA VIEJA INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CALABAZA DE LA VIEJA		CARRERA DE INGENIERÍA EN MECÁNICA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN MECÁNICA	
TÍTULO: Plano Turbina Borlor		ESCALA: 1:1	
AUTORES: 10		FECHA: 10/11/2023	
REVISOR: 10		FECHA: 10/11/2023	
APROBADO: 10		FECHA: 10/11/2023	
CARRERA: INGENIERÍA EN MECÁNICA		GRUPO: 10	
PROFESOR: 10		FECHA: 10/11/2023	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY