

DISEÑO, ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE UNA TURBINA HIDRO
CINÉTICA, PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A BAJA
ESCALA

BRAYAN ALEXANDER JIMENEZ RODRIGUEZ
SEBASTIAN GUILLERMO PEREZ GONZALEZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS
TUNJA
2021

DISEÑO, ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE UNA TURBINA HIDRO
CINÉTICA, PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A BAJA
ESCALA

BRAYAN ALEXANDER JIMENEZ RODRIGUEZ
SEBASTIAN GUILLERMO PEREZ GONZALEZ

TRABAJO DE GRADO

PH. D. YINA FAIZULLY QUINTERO GAMBOA
MAG. CARLOS ANDRES AGUIRRE RODRIGUEZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS
TUNJA
2021

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Tunja 25 de enero del 2022.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios, a cada uno de nuestros familiares y allegados que de manera altruista nos han motivado durante nuestra etapa de estudio, para la culminación de nuestros estudios y el desarrollo de nuestros proyectos.

Gracias a los ingenieros Carlos Andrés Aguirre y a la Ingeniera Yina Faizully Quintero por su orientación académica, la resolución de problemas que surgieron durante el desarrollo del trabajo, la dedicación de su tiempo para brindarnos observaciones y la aclaración de las dudas presentadas.

De igual manera agradecemos al ingeniero Fabián Higuera por su asesoría durante todo el desarrollo del trabajo y por las sugerencias que en su momento fueron de gran ayuda.

Por último, queremos expresar nuestro más grande y sincero agradecimiento a la Universidad Santo Tomas seccional Tunja, a cada uno de los docentes y laboratoristas que nos han brindaron sus conocimientos, enseñanzas, consejos y motivación. Facilitando nuestra formación en el largo trayecto como ingenieros y personas.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
1. OBJETIVOS	14
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	14
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
2. ANTECEDENTES.....	15
3. MARCO REFERENCIAL	18
3.1. MARCO HISTORICO	18
3.2. MARCO TEORICO	18
3.2.1. Dinámica de fluidos computacional, modelo matemático.....	18
3.2.2. ANSYS	22
4. DESARROLLO DEL PROYECTO	28
4.1. ETAPA 1: SELECCIÓN	28
4.2. ETAPA 2: ANÁLISIS.....	32
4.2.1. Definición de dimensiones de la turbina	32
4.2.2. Modelar la turbina.....	37
4.2.3. Mallar la turbina.....	52
4.2.4. Discretizar el ambiente	63
4.2.5. Resolver	68
4.3. ETAPA 3: FABRICACIÓN.....	78
4.3.1. Rotor	80
4.3.2. Fricción.....	87
4.3.3. Motor	88
4.3.4. Sistema de sujeción	91
4.4. ETAPA 4: EVALUACION EXPERIMENTAL.....	97
CONCLUSIONES	101
RECOMENDACIONES.....	103
BIBLIOGRAFÍA.....	104

ANEXO A 1.....	108
ANEXO A 2.....	110
ANEXO A 3.....	111
ANEXO A 4.....	113
ANEXO A 5.....	116

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diferencias entre turbinas de flujo axial y flujo cruzado	30
Tabla 2. Dimensiones principales	32
Tabla 3. Dimensiones, nuevo diámetro cubo	40
Tabla 4. Resultados de rendimiento en aire a 5m/s	74
Tabla 5. Resumen de datos para aire a 5m/s	74
Tabla 6. Diferentes resultados	77
Tabla 7. Características de la impresión.	92
Tabla 8. Velocidades en la salida del banco de pruebas.....	98
Tabla 9. Velocidades en la entrada del banco de pruebas.....	99
Tabla 10. Pruebas de ensayo en el canal hidráulico.	100
Tabla 11. Flujo masico.....	110
Tabla 12. Ángulo beta.....	111
Tabla 13. Velocidad angular	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ley de la pared	21
Figura 2. Ambiente de Workbench.....	23
Figura 3. Opciones de diseño en BladeGen.....	24
Figura 4. Estadísticas de malla	25
Figura 5. Clasificación de las turbinas hidro cinéticas	29
Figura 6. Turbina WaterLily.....	31
Figura 7. Vista frontal.....	33
Figura 8. Diámetro cubo y cubierta	33
Figura 9. Espacio para los álabes.....	34
Figura 10. Puntos del borde de ataque	34
Figura 11. Puntos del borde de fuga.....	35
Figura 12. Curvas de la cubierta y cubo.....	35
Figura 13. Contorno aproximado del álabe	36
Figura 14. Medidas	36
Figura 15. Abrir Workbench	37
Figura 16. BladeGen.....	38
Figura 17. Nuevo modelo en BladeGen	39
Figura 18. Geometría del rotor.....	41
Figura 19. Espesor, ángulo y # de álabes.....	41
Figura 20. Geometría generada.....	42
Figura 21. Vista 3D del rotor	42
Figura 22. Ojiva del rotor	44
Figura 23. Activación de las capas	46
Figura 24. Configuración espesor para la capa 0%.....	46
Figura 25. Configuración espesor para la capa 25%.....	47
Figura 26. Configuración espesor para la capa 50%.....	47
Figura 27. Configuración espesor para la capa 75%.....	48
Figura 28. Configuración espesor para la capa 100%.....	48
Figura 29. Bordes del álabe.....	49
Figura 30. Bordes corregidos.....	50
Figura 31. Propiedades del modelo	51
Figura 32. Modelación terminada.....	51
Figura 33. Abrir TurboGrid	53
Figura 34. Tipo de máquina	54
Figura 35. Topología y malla	55
Figura 36. Primera malla.....	56
Figura 37. Primer análisis de malla.....	56
Figura 38. Función Y+	58
Figura 39. Segundo análisis de malla	59

Figura 40. Mallado del álabe del rotor.....	60
Figura 41. Mallado del pasaje cerca al borde de ataque.....	60
Figura 42. Mallado del pasaje cerca al borde de fuga.....	61
Figura 43. Configuración del pasaje.....	62
Figura 44. Comparación de mallas.....	62
Figura 45. Mallado alabe refinado.....	63
Figura 46. Apertura de CFX-Pre.....	64
Figura 47. Modo Turbo.....	67
Figura 48. Numero de iteraciones.....	68
Figura 49. Solucionador.....	69
Figura 50. Caso sin convergencia.....	70
Figura 51. Solución terminada.....	70
Figura 52. Caso con convergencia.....	71
Figura 53. Abrir los resultados.....	71
Figura 54. CFX-Post.....	72
Figura 55. Herramientas de CFX.....	72
Figura 56. Datos de entrada.....	73
Figura 57. Pt al 50%.....	75
Figura 58. Ps al 50%.....	75
Figura 59. Vectores de velocidad.....	76
Figura 60. Carga del alabe al 50%.....	77
Figura 61. Carcasa.....	79
Figura 62. Tapa de la carcasa.....	80
Figura 63. Archivo exportado al software CAD Inventor®.....	81
Figura 64. Exportar la geometría.....	82
Figura 65. Alabe solido.....	83
Figura 66. Patrón circular.....	84
Figura 67. Parámetros del diseño.....	85
Figura 68. Cubo solido.....	85
Figura 69. Anillo exterior.....	86
Figura 70. Rotor completo.....	86
Figura 71. Límites para la carcasa.....	87
Figura 72. Espacio carcasa - rotor.....	88
Figura 73. Acople.....	89
Figura 74. Factor de tamaño del motor.....	90
Figura 75. Dimensiones del motor.....	90
Figura 76. Vista media del motor dentro de la carcasa.....	91
Figura 77. Agujero para cuerda, cable.....	91
Figura 78. Componentes.....	92
Figura 79. Análisis previos a la impresión.....	93
Figura 80. Cama para el motor sin ajuste.....	94
Figura 81. Prueba de ajuste del acople.....	94

Figura 82. Rotor en proceso	95
Figura 83. Tapa	95
Figura 84. Carcasa	96
Figura 85. Turbina ensamblada	96
Figura 86. Medición de la velocidad del viento.....	97
Figura 87. Montaje en succión	98
Figura 88. Pruebas en canal de agua.	100
Figura 89. Ecuación del número de Reynolds.....	108
Figura 90. Flujo masico.....	110
Figura 91. Canal hidráulico GUNT modular 309x450mm de pendiente variable.	113
Figura 92. Banco didáctico de turbina de eje vertical.	114
Figura 93. Anemómetro, luxómetro digital LM-8000A.	114
Figura 94. Tacómetro Minipa MDT-2238A.	115

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A 1.....	108
ANEXO A 2.....	110
ANEXO A 3.....	111
ANEXO A 4.....	113
ANEXO A 5.....	116

RESUMEN

El enfoque de estudio es el análisis de una turbina hidro cinética, con la capacidad de aprovechar corrientes de aire o agua para generar energía eléctrica, para ello se realizará un estudio numérico y una experimentación para definir el rendimiento de dicha turbina.

El diseño de la turbina hidro cinética que se muestra en este documento se obtiene intentando replicar un diseño ya existente. A través de un tubo de viento y el software de simulación Ansys, Inc., respectivamente, es posible evaluar el comportamiento de una turbina, simulando las condiciones reales a las cuales se verá sometida, de acuerdo con los resultados obtenidos serán validados con el estudio numérico. Las variables geométricas de la turbina de este trabajo, así como el desempeño y la capacidad de aprovechamiento del recurso serán estudiados minuciosamente.

Esta es una solución alternativa para la generación de electricidad, con una capacidad de manufactura accesible y económicamente aceptable en términos de fabricación y montaje. Se evalúa un diseño que permita el aprovechamiento de los recursos hídricos y eólicos, un tiempo de operación prolongado especialmente en el entorno en el que se utilizan y además se piensa en el aspecto de mantenimiento, preferiblemente bajo o nulo. El uso de estos equipos hidro cinéticos brinda una fuente energética a diferentes tipos de poblaciones, tanto para las que no tengan acceso a electricidad por su ubicación geográfica y para aplicaciones más específicas, por ejemplo, como para el suministro eléctrico de equipos electrónicos en lugares remotos.

Palabras clave: Turbina, dinámica de fluidos, diseño, energías alternativas, simulación, mallado, álabes, discretización.

INTRODUCCIÓN

La dependencia de las fuentes energéticas tradicionales actualmente, entra en conflicto con los recursos naturales disponibles, debido a los daños (en ocasiones irreparables) causados hacia el medio ambiente a causa de la constante explotación, por ejemplo, para la extracción y producción de combustibles.

Las fuentes de energías alternativas se han ido introduciendo en gran cantidad en el mundo como un reemplazo de las fuentes de energía convencionales, aprovechando otro tipo de recursos disponibles sin causar daños de impacto hacia el medio donde se implementen. Esto es un estímulo para la investigación, estudio, análisis y producción de diferentes tecnologías que aprovechen este tipo de recursos.

La finalidad de este trabajo es analizar una turbina y ver como es el comportamiento de su desempeño, para esto se emplea una turbina hidro cinética llevando a cabo el siguiente proceso: seleccionar el tipo de turbina, generar el diseño computarizado del rotor, analizar el rendimiento y comportamiento utilizando herramientas de dinámica computacional, fabricar la turbina mediante impresión 3D y luego experimentar con la turbina usando los bancos de pruebas disponibles en la facultad. Se entrega el análisis numérico de la turbina y la información obtenida en la experimentación, sin embargo, no es posible la producción de una significativa cantidad de electricidad debido a la disponibilidad de materiales en el sector.

Al analizar el comportamiento y desempeño de la turbina se plantea que la información recolectada (geometrías, planos, datos, simulaciones, entre otros), impulse la investigación e interés en este sector para que se plateen trabajos posteriores usando la información de este trabajo para mejorar el rendimiento de dicha turbina desde nuevos diseños u optimizaciones.

Llevar a cabo diseños, cálculos o análisis de manera experimental o manual representa el uso de gran cantidad de recursos como el tiempo, dinero, construcción, materiales entre otros; al usar herramientas de simulación computacional se genera un gran beneficio pues evita el uso de recursos como los anteriormente nombrados, y permite obtener resultados de una manera más sencilla y de gran apoyo al momento de validar los resultados con pruebas experimentales.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar el análisis numérico y experimental del desempeño de una turbina hidro cinética.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar la turbina hidro cinética para realizar el análisis.
- Modelar la geometría de rotor hidro cinético.
- Realizar el estudio numérico del rotor de la turbina, utilizando herramientas de Dinámica de Fluidos computacional.
- Validar los resultados utilizando un análisis experimental.

2. ANTECEDENTES

Para este trabajo se realizó una búsqueda de información en diferentes tipos de documentos, pero todos con el mismo tema de interés; las corrientes eólicas e hidráulicas como fuente de energía sostenible. A continuación, se presentan algunos de estos documentos:

Los autores Yangyozov, Dimitrova y Panayotov en su artículo *Modeling and performance calculation of a horizontal axis wind and hydrokinetic turbine: Numerical study*, plantean que la energía eólica y las corrientes de agua como fuente de energía han generado un aumento en el uso de sin fin de dispositivos hidro cinéticos. En este artículo se presentan numerosas ventajas para estos dispositivos como: la fabricación a partir de impresión 3D, el diseño de dispositivos portátiles y pequeños y además la adaptación de algunas turbinas hidro cinéticas para funcionar en agua y aire. En este estudio se encargan de exponer el análisis de la pala de una turbina de eje horizontal funcional en agua y aire utilizando el modelado CFD con el programa Ansys CFX. En el documento se presenta un caso de estudio anterior sobre una turbina “WaterLily” funcionando con agua y aire y los datos y características obtenidos sobre dicho análisis.¹

El artículo *Design and state of art of innovative wind turbine systems* expone como el uso de la energía eólica se ha vuelto más habitual de lo normal en los últimos años, esto ha llevado a ver que el diseño de la turbina eólica debe ser mejorado con el fin de aumentar su eficiencia; esto se debe hacer teniendo en cuenta los factores que más afectan el funcionamiento de la energía eólica. La finalidad de este artículo es exponer cómo mediante una metodología organizada se puede llegar a desarrollar ideas innovadoras y vencer los principales problemas de diseño.²

Gharib propone a las ciudades inteligentes como avance hacia la sostenibilidad y el ahorro energético, esto con el fin de convertir las energías renovables en términos cada vez más comunes. Teniendo en cuenta esto, se plantea que las turbinas hidro cinéticas pequeñas tienen gran impacto al generar energía ambientalmente buena

¹ YANGYOZOV, Anastas Todorov; DIMITROVA, Damjanka Stojanova y PANAYOTOV, Lazar Georgiev. Modeling and performance calculation of a horizontal axis wind and hydrokinetic turbine: Numerical study [en línea]. Annual journal of technical university of varna, Bulgaria, 2018. vol. 2, no 2, p. 70-79. Disponible en <https://aj-tuv.org/index.php/ajtuv/article/view/95>

² NIKOLIC, Vlastimir; SAJJADI, Shahim y PETCOVIC, Dalibor. Design and state of art of innovative wind turbine systems [en línea]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020. 61, 258-265. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116300041>

para específicos puntos de consumo dentro de una ciudad. Con el fin de analizar este tipo de turbinas se generaron una serie de experimentos en túneles de viento y canales de agua; con los que se obtuvieron resultados como curvas de potencia u otras características para las condiciones de la prueba.³

Performance analysis of a modified Savonius hydrokinetic turbine blade for rural application, centra su atención en la problemática ubicada en la región rural de Sarawak (Estado de Malasia). El problema básicamente es la distancia entre las fuentes de energía y los aparatos o consumidores; un difícil acceso a un servicio energético. Visto esto se plantea la búsqueda de una alternativa sostenible de producción de energía para satisfacer las necesidades diarias de muchas personas, es aquí donde se propone usar turbinas hidro cinéticas en las zonas rurales ricas en arroyos fluviales. En años anteriores algunos experimentos habían beneficiado términos de diseño y eficiencia, pero en aguas de bajas velocidades y llenas de escombros el uso de estas turbinas se volvía limitado. Teniendo en cuenta esto se implementó una simulación para la hoja de cierta turbina en un medio fluido de agua a través del software CFD StarCCM+ esto para buscar la mejor opción para ser desplegada en las situaciones anteriormente mencionadas.⁴

El trabajo *Design and hydrodynamic analysis of horizontal-axis hydrokinetic turbines with three different hydrofoils by CFD* muestra como la problemática medioambiental en torno a la producción de energía ha sido la mayor impulsora en la búsqueda e investigación de nuevas fuentes de energía y como esto logro que a lo largo de la historia se encontraran soluciones como el viento, el agua, el sol, entre otras. La energía obtenida de recursos hídrico es la más barata y grande en el mundo sin embargo la producción de energía acosta de la creación de grandes lagos artificiales, grandes hidroeléctricas y grandes infraestructuras son muy criticadas debido a los daños que genera en el medio ambiente; es por esto que las hidroeléctricas pequeñas y en zonas rurales se han convertido en las mejores opciones. El documento plantea a las turbinas hidro cinéticas como una solución al problema energético debido a su bajo costo de fabricación y su bajo impacto ambiental. También se aclara que aún se necesita mucha más investigación para la comprensión de estas, sin embargo, el uso de modelos y algoritmos matemáticos ha facilitado el diseño y el rendimiento de estas turbinas. Así mismo muestra estudios centrados en la mejora de la eficiencia y el funcionamiento a partir de:

³ GHARIB, Ahmed, *et al.* Wind–water experimental analysis of small sc-darrieus turbine: an approach for energy production in urban systems [en línea]. Sustainability, 2021. 13(9), 5256. Disponible en <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/9/5256>

⁴ ANTHONY, Armand & ROY, Sukanta. Performance analysis of a modified Savonius hydrokinetic turbine blade for rural application [en línea]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. Vol. 943. No. 1. Disponible en <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/943/1/012034/meta>

cambios de curvatura, diferentes perfiles aerodinámicos, espesores, ángulos, entre otros. Pero como principal objetivo para este artículo se ve la comparación entre tres diferentes rotores por CFD cada rotor diseñado bajo un perfil y características diferentes con el fin de analizar la velocidad y presión del fluido y comportamiento de la turbina.⁵

⁵ BETANCUR, Juan, MARIN, Juan, & ARRIETA, Edwin. Design and hydrodynamic analysis of horizontal-axis hydrokinetic turbines with three different hydrofoils by CFD [en línea]. Journal of Applied Engineering Science, 2020. vol. 18, no 4, p. 529-536. Disponible en <https://aseestant.ceon.rs/index.php/jaes/article/view/25273>

3. MARCO REFERENCIAL

3.1. MARCO HISTORICO

La energía eólica en la historia de la humanidad aparece hace 5000 años aproximadamente, en la región mediterránea; donde culturas como la egipcia empleo la energía del viento para mover sus navíos, usando velas para capturar dicha energía; no muy lejos de este lugar, muchas culturas implementaron el mismo sistema como los vikingos o los romanos. Durante un tiempo el movimiento de grandes navíos por medio de vela comandaría en la navegación hasta que apareciera la máquina de vapor y luego el motor de combustión interna, el surgimiento de estos dejo obsoleta esta fuente de energía por un tiempo. Después de un largo tiempo la energía eólica hace de nuevo aparición en la región de medio oriente aproximadamente en el siglo VI, donde se usa como energía para mecanismos de molienda de granos y bombeo de agua, estos mecanismos eran de eje vertical. Durante el siglo XI medio oriente contaba con gran cantidad de estos artefactos, pero por medio de las cruzadas fueron introducidos a Europa para que luego en la edad media los señores feudales usaran excesivamente de estos. Más adelante en el siglo XIV, se impulsó el avance y mejoramiento de esta tecnología pues se construyen maquinas capaces de drenar zonas pantanosas o que eran capaces de producir entre 50 y 90 HP.

Sin embargo, en las últimas décadas se ha implementado y apoyado la investigación de la energía eólica como fuente de energía eléctrica, debido a los altos precios de los combustibles fósiles, la alta contaminación producida por estos y el creciente problema con respecto al calentamiento global por emisiones de carbono.⁶

3.2. MARCO TEORICO

3.2.1. Dinámica de fluidos computacional, modelo matemático.

Esta es una herramienta que permite realizar la simulación numérica del comportamiento de fluidos, reacciones químicas, transferencia de calor, procesos de combustión, aerodinámica, acústica etc. Las ecuaciones que modelan el

⁶ MORAGUES, Jaime., & RAPALLINI, Alfredo. Energía eólica [en línea]. Instituto Argentino de la Energía "General Mosconi, 2003. vol. 22. Disponible en <http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/534/541/2962.pdf>

comportamiento de un fluido se fundamentan en la mecánica de los fluidos y suelen ser resueltas por medio de diferentes métodos numéricos.

Se presentan a continuación los modelos matemáticos del caso de estudio con las ecuaciones de conservación, Las consideraciones que se deben tener en cuenta para las técnicas de análisis de dinámica de fluidos computacional CFD, como la discretización del elemento, sistemas de referencia, los tipos de mallas, el comportamiento del modelo de turbulencia, en las paredes de capa límite que presenten no deslizamiento, así como ecuaciones del flujo turbulento y el modelo de turbulencia utilizado.⁷

3.2.1.1. Ecuación de la conservación de la masa.

También llamada ecuación de continuidad general (ecuación 1), presentada de forma vectorial con una notación compacta de la divergencia, donde el primer término proviene de la acumulación del balance de la masa y el segundo término proviene del movimiento del fluido o advección. Sin embargo, la acumulación se desprecia ya que el fluido se considera incompresible.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

3.2.1.2. Ecuación de Navier-Stokes (Fluidos Incompresibles).

Estas ecuaciones permiten entender y cuantificar las fuerzas que interactúan con un fluido mediante la segunda ley de Newton, especialmente para el análisis computacional permite encontrar soluciones numéricas donde se involucren fluidos Newtonianos incompresibles, véase la ecuación 2, 3 y 4. Los términos en la parte izquierda de la ecuación 2 están asociados a la aceleración, es decir que los cambios de la velocidad de la componente U asociada a x, genera una aceleración, para la derecha de la igualdad se asocia a las fuerzas y esfuerzos.⁸

El primer término es el temporal, el segundo término que indica la sumatoria de los componentes del vector velocidad $\bar{U}(u,v,z)$ y su respectivo operador, es

⁷ ESPINOSA SARMIENTO, Angie Lizeth. Desenvolvimento de uma metodologia para o projeto aerodinâmico de rotores axiais reversíveis de ventiladores de jato de túneis rodoviários [en línea]. Tesis Doctoral. M. Sc. thesis, Universidade Federal de Itajubá, 2013. Disponible en: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/934?locale-attribute=es>

⁸ GRESHO, Philip M. y SANI, Robert L. On pressure boundary conditions for the incompressible Navier-Stokes equations [en línea]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1987. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/flid.1650071008>

denominado convectivo, El tercer término después de la igualdad indica el gradiente de presión para un fluido incompresible lo que quiere decir que la densidad no está variando, el cuarto es el término viscoso donde se experimenta la disipación de la velocidad y el quinto es el término fuente donde se involucran fuerzas externas, como se observa en las siguientes ecuaciones de momento en x,y,z respectivamente:

$$\frac{\partial(u)}{\partial t} + u \frac{\partial(u)}{\partial x} + v \frac{\partial(u)}{\partial y} + w \frac{\partial(u)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + S_{Mx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(v)}{\partial t} + u \frac{\partial(v)}{\partial x} + v \frac{\partial(v)}{\partial y} + w \frac{\partial(v)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + S_{My} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(w)}{\partial t} + u \frac{\partial(w)}{\partial x} + v \frac{\partial(w)}{\partial y} + w \frac{\partial(w)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + S_{Mz} \quad (4)$$

3.2.1.3. Ecuación general de transporte.

La ecuación 5, describe múltiples variables de interés en un fluido que está siendo transportado en función de ϕ , por ejemplo, la temperatura, concentración, contaminantes, etc. En la ecuación se presenta la variación de tiempo, el término convectivo, término difusivo y el término fuente.⁹

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + [\nabla \phi - \nabla^2 \phi] = \nabla(\nabla \cdot \phi) + \rho B \quad (5)$$

3.2.1.4. Modelo (SST) de turbulencia.

La turbulencia se modela utilizando un modelo de transporte de esfuerzo cortante $k-\omega/k-\epsilon$, en el que la energía cinética turbulenta k y la tasa de disipación específica ω , que se describen con el modelo de turbulencia SST en la ecuación 6 y 7.¹⁰

⁹ DMS. [en línea]. Guts of CFD. Wyoming. Disponible en: <https://dmsonline.us/guts-of-cfd-transport-equation/>

¹⁰ YANGYOZOV, Anastas Todorov; DIMITROVA, Damjanka Stojanova y PANAYOTOV, Lazar Georgiev. Modeling and performance calculation of a horizontal axis wind and hydrokinetic turbine: Numerical study [en línea]. Annual journal of technical university of varna, Bulgaria, 2018. vol. 2, no 2, p. 70-79. Disponible en <https://aj-tuv.org/index.php/ajtuv/article/view/95>

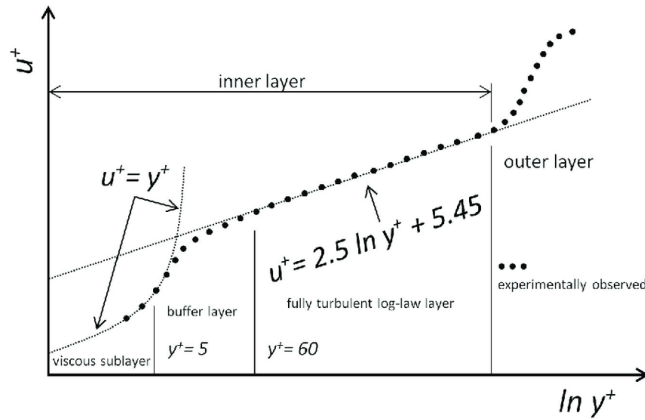
$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = P_k - \beta \rho \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \omega)}{\partial x_j} = \alpha_3 \frac{\omega}{k} p_k - \beta_3 \rho k \omega^2 + (1 - F_1) \frac{2\rho}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

3.2.1.5. Condiciones de contorno y ley de pared.

En dinámica computacional, la capa límite adyacente a una superficie lisa sólida se divide principalmente en 4 zonas: La capa en la que son dominantes los efectos viscosos, denominada subcapa viscosa, la capa en la que los esfuerzos turbulentos y viscosos tienen una magnitud del mismo orden, denominada zona de solapamiento o buffer, la capa interna o log law y la región la región externa que es en la que los efectos inerciales controlan el flujo, véase la figura 1.

Figura 1. Ley de la pared



Fuente: A Wall Boundary Condition for the Simulation of a Turbulent Non-Newtonian Domestic Slurry in Pipes.¹¹

El uso de la ley de pared permite empíricamente estimar cómo se comporta el flujo en estas capas, mediante perfiles parametrizados donde se establecen valores de esfuerzos cortantes medios, que son aplicados como condiciones de contorno en el

¹¹ MEHTA, Dhruv., THOTA RADHAKRISHNAN, Adithya K., LIER, Jules V., & CLEMENS, Francois. A Wall Boundary Condition for the Simulation of a Turbulent Non-Newtonian Domestic Slurry in Pipes [en línea]. Water, 2018. vol. 10, no 2, p. 124. Disponible en <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/2/124>

dominio computacional, en términos generales la ley puede expresarse como la ecuación 8.

$$U \sqrt{\frac{\rho}{\tau_0}} = F \left(\frac{y \sqrt{\rho \tau_p}}{\mu} \right) \rightarrow u^+ = F(y)^+ \quad (8)$$

A partir del vínculo entre el flujo medio, la densidad, la distancia a la pared, los esfuerzos en la pared y la viscosidad del fluido, es posible explicitar la función F, que relaciona el esfuerzo de la capa interna con respecto a la viscosidad, que al emplear la condición de no deslizamiento e integrando se obtiene la anterior expresión.

R. Torres y J. Graw. Transferencia de calor con Comsol multiphysics. colección multifásica. Addlink. 120 p. ISBN 9788461173181.

3.2.2. ANSYS

Fundada en 1970, Ansys, Inc. es de los proveedores de simulación más grandes y mejores a nivel mundial. Se trata de un programa que brinda a los ingenieros la capacidad de reconocer y predecir cómo será el comportamiento de ciertos productos en el mundo real. El programa cuenta con infinitud de espacios y ambientes para desarrollar diferentes labores; en este se pueden trabajar casos térmicos, estructurales, dinámica de fluidos, entre otros.¹²

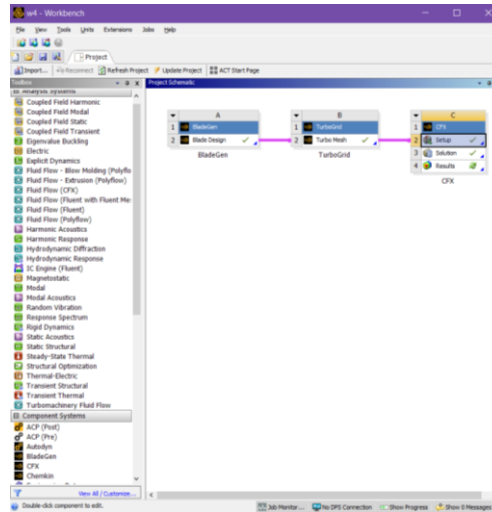
3.2.2.1. Workbench

Ansys Workbench es una de las herramientas más importantes dentro de Ansys, Inc. pues es una plataforma de flujo de trabajo que combina todas las herramientas de simulación para obtener proyectos organizados y bien administrados. Esta administración se logra al crear los proyectos a base de bloques como se ve en la figura 2; que bloque tras bloque van generando sistemas. Luego estos sistemas se vuelven diagramas de flujo que representan el flujo de información a través del proyecto. Cada bloque se compone de celdas las cuales muestran los pasos secuenciales para cada tipo de análisis. Esta herramienta presenta una gran ventaja

¹² ANSYS, INC. Historia de la empresa [sitio web]. Estados Unidos; [Consultado: 15 de noviembre de 2021]. Disponible en <https://www.ansys.com/company-information/the-ansys-story>

pues cuenta con la habilidad de compartir o vincular información entre los sistemas.¹³

Figura 2. Ambiente de Workbench



Fuente: Plataforma Workbench

3.2.2.2. BladeGen

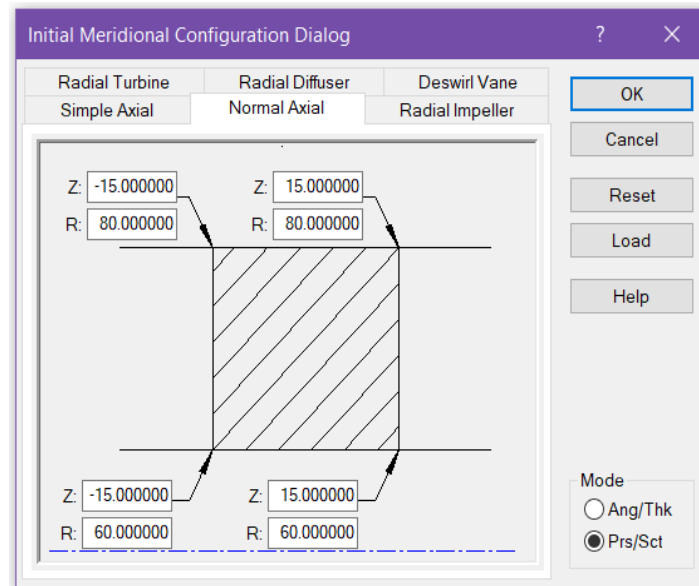
Es una de las tantas herramientas que componen el programa de Ansys, Inc.; esta herramienta está especializada y fácil de manejar para el diseño 3D de elementos rotativos. Se enlaza la alta experiencia en turbomáquinas de Ansys, Inc. con un entorno fácil de usar para así poder diseñar componentes de álabes axiales, flujo mixto y radiales en aplicaciones como bombas, compresores, sopladores, turbinas, inductores, ventiladores, entre otros. Su mayor ventaja es el vínculo entre el diseño y la simulación avanzada, como dinámica de fluidos computacional y análisis de tensión.¹⁴ A continuación en la figura 3 se puede ver la ventana principal al abrir Ansys BladeGen.

¹³ ANSYS, INC. Guía del usuario de Workbench [sitio web]. Estados Unidos; [Consultado: 15 de noviembre de 2021]. Disponible en

https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/wb2_help/wb2_help.html

¹⁴ ANSYS, INC. Chapter 9: BladeGen [sitio web]. Estados Unidos; [Consultado: 15 de noviembre de 2021]. Disponible en https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/wb_bm/bm_bladegen.html

Figura 3. Opciones de diseño en BladeGen



Fuente: BladeGen

3.2.2.3. TurboGrid

Ansys TurboGrid es uno de los muchos ambientes que componen a Ansys, Inc. Se trata de una herramienta de mallado especializado para analizar el CFD de palas de turbomáquinas. El programa permite a ingenieros, analistas y diseñadores de maquinaria rotativa generar estructuradas de alta calidad, preservando la geometría implícita.¹⁵

Al ser el mallado uno de los pasos más importantes en la simulación de cualquier tipo de simulación en la ingeniería (estructural, térmica, dinámica, fluidos, ...); la calidad de la malla es un factor de vital importancia para que así mismo los resultados obtenidos cuenten con el menor porcentaje de error. Con respecto a este mejoramiento de la malla Ansys TurboGrid cuenta con diferentes métodos; estos métodos tienen funciones diferentes como controlar la densidad de la malla, controlar el refinamiento de la capa limite, entre otros.¹⁶

¹⁵ ANSYS, INC. Chapter 11: TurboGrid [sitio web]. Estados Unidos; [Consultado: 15 de noviembre de 2021]. Disponible en https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/wb_bm/bm_turbogrid.html

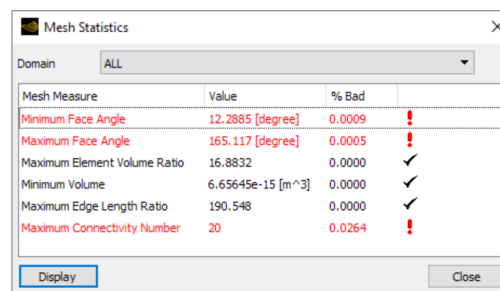
¹⁶ ANSYS, INC. Chapter 10: Ansys TurboGrid Workflow [sitio web]. Estados Unidos; [Consultado: 22 de noviembre de 2021]. Disponible en https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/tg_user/tgANSYMeshMesh.html

Análisis de malla:

La función de Análisis de Malla ofrece una variedad de herramientas para analizar la calidad de la malla. La malla puede ser analizada sólo después de haber sido creada. Si se realizan cambios en los objetos Geometría, Topología, Capas o Datos de malla, la malla no podrá ser analizada de nuevo hasta que se haya vuelto a crear, la licencia de Ansys Student está limitada a 512K celdas/nodos para un modelo CFD, Por lo que es importante no exceder este número de elementos y garantizar una buena calidad analítica, especialmente en los puntos más críticos de la pieza.

- Estadísticas de la malla: Las Estadísticas de la malla proporcionan los detalles sobre la calidad de la malla actual. Las estadísticas de la malla no pueden verse hasta que se cree la malla, una vez creada la malla estas estadísticas serán prestadas en un cuadro como se muestra en la figura 4.

Figura 4. Estadísticas de malla



Mesh Measure	Value	% Bad	
Minimum Face Angle	12.2885 [degree]	0.0009	!
Maximum Face Angle	165.117 [degree]	0.0005	!
Maximum Element Volume Ratio	16.8832	0.0000	✓
Minimum Volume	6.65645e-15 [m^3]	0.0000	✓
Maximum Edge Length Ratio	190.548	0.0000	✓
Maximum Connectivity Number	20	0.0264	!

Fuente: TurboGrid

Las estadísticas de malla no se abren en el editor como los demás objetos del selector de objetos, las estadísticas de malla se encuentran en una ventana propia, por lo que puede permanecer abierto mientras se editan otros objetos en el editor de objetos. Esto permite un control constante de las estadísticas. Las estadísticas de malla disponibles incluyen el ángulo de cara mínimo, el ángulo de cara máximo, la relación de volumen de elementos, la relación de longitud de aristas y el número de conectividad. Las estadísticas que se muestran en rojo están fuera de los límites definidos en el objeto análisis de malla.

- Límites de malla: El objeto Límites de la malla define los valores aceptables para las variables de análisis de la malla. Estas variables se

describen a continuación. Los límites por defecto son generalmente buenos y deberían resaltar cualquier área con problemas de la malla.¹⁷

- Ángulo máximo y mínimo de la cara: Este es el mayor ángulo de la cara para todas las caras que tocan el nodo. Para cada cara, se calcula el ángulo entre las dos aristas de la cara que tocan el nodo y el mínimo es el ángulo de cara más pequeño para todas las caras que tocan el nodo. El ángulo máximo de la cara puede considerarse una medida de la inclinación.
- Número de conectividad: El número de conectividad es el número de elementos que tocan un nodo. Esta variable es el número máximo de conectividad en cualquier elemento. Para un solucionador no estructurado, este valor no es importante. Sin embargo, un número de conectividad alto en gran parte de la malla puede tener un efecto contra restante en la velocidad de un solucionador.
- Relación del volumen del elemento y el volumen mínimo: La relación de volumen del elemento se define como la relación entre el volumen máximo de un elemento que toca un nodo, y el volumen mínimo de un elemento que toca un nodo. El valor devuelto puede utilizarse como una medida del factor de expansión local, El volumen mínimo se utiliza para garantizar que no se creen volúmenes negativos dentro del mallado.
- Relación de longitud de bordes: Se trata de una relación entre la arista más larga de una cara dividida por la arista más corta de la misma. Para cada cara, se calcula para las dos aristas de la cara que tocan el nodo. Se devuelve la mayor proporción. La relación de longitud de las aristas puede considerarse una medida de la relación de aspecto.
- Función Y+: “Es un método para controlar el tamaño de la malla en la capa límite, para esto se pide ingresar la altura y + y el número de Reynolds. Esta opción le permite especificar la altura máxima y + para la hoja, que luego es utilizado para calcular el factor de refinamiento del borde. El desplazamiento real del primer elemento no será coherente en la capa límite, aunque debe ser igual o menor que el máximo especificado. El refinamiento del borde el cálculo es solo una aproximación.”¹⁸

¹⁷ ANSYS, INC. 10.8.2. Mesh Limits [sitio web]. Estados Unidos; [Consultado: 22 de noviembre de 2021]. Disponible en https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/tg_user/i1034630.html

¹⁸ ANSYS, INC. 5.7. The Y+ Functionality [sitio web]. Estados Unidos; [Consultado: 22 de noviembre de 2021]. Disponible en https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/tg_tutr/TG_Axfan_ATM.html%23tg_y_func_tut11

3.2.2.4. CFX

Ansys CFX es el módulo en el que se lleva a cabo la solución del análisis pensado. Dentro de CFX se encuentran dos ambientes: CFX-Pre y CFD-Post.¹⁹

- Ansys CFX-Pre: Es un preprocesador para la definición de las variables físicas, las mallas se importan al CFX-pre y se seleccionan los modelos físicos que afectaran o que requiere el análisis de CFD.
- Modo Turbo: CFX-Pre cuenta con un modo especializado, el modo Turbo; este modo permite configurar simulaciones de turbomáquinas (turbinas o compresores) de manera sencilla, rápida y ordenada. Al existir diferentes tipos de componentes rotativos de turbomáquinas, existen diferentes maneras para definir su funcionamiento dependiendo de cada tipo de componente. El proceso es sencillo solo basta con seleccionar el archivo de origen, especificar algunos parámetros básicos como tipo de componente y sus condiciones de contorno; luego de esto las interfaces entre los componentes se generan automáticamente.
- Ansys CFD-Post: Es un post procesador de CFD, de fácil visualización y análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones CFD; es una herramienta flexible y de última generación.

¹⁹ ANSYS, INC. Chapter 12: CFX [sitio web]. Estados Unidos; [Consultado: 15 de noviembre de 2021]. Disponible en https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/wb_bm/i4574564654078565014526.html

4. DESARROLLO DEL PROYECTO

Para el desarrollo del proyecto y su objetivo general correspondiente a “desarrollar un análisis numérico y experimental del desempeño de una turbina hidro cinética para aplicaciones en pico-generación”; se decidió plantear una metodología ordenada de cuatro etapas. Estas etapas se enlazaron a cada uno de los objetivos específicos de la siguiente manera:

La etapa 1 correspondió a la búsqueda y selección del tipo de turbina para el análisis.

La etapa 2 correspondió a todo el procedimiento que se necesitó para analizar computacionalmente la turbina (buscar las dimensiones, modelar, mallar, ...).

La etapa 3 correspondió a la fabricación de la turbina por medio de impresión 3D, dentro de este también se incluye la fabricación del montaje para la turbina.

La etapa 4 correspondió a la validación de los datos obtenidos en el análisis computacional por medio de una experimentación en un túnel de viento y un canal hidráulico.

Para cada una de las etapas se mostrarán los detalles completos de sus procedimientos a continuación.

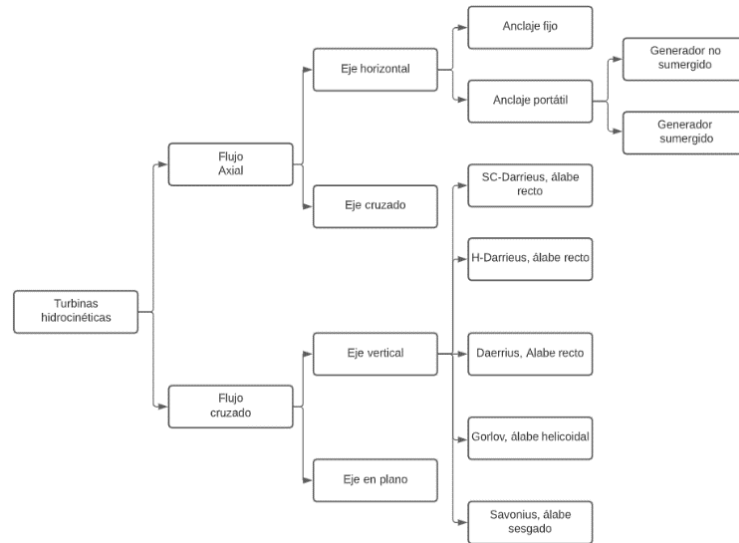
4.1. ETAPA 1: SELECCIÓN

La tecnología de conversión de energía amigable con el medio ambiente es un sector moderno y de rápido crecimiento en cuanto a la generación de energías renovables que además cuenta con gran atención hacia el sector eólico e hidráulico. Los sistemas hidro cinéticos tienen varias ventajas, en particular, con efectos secundarios nulos o insignificantes en los ecosistemas y explotan una pequeña área hidrológica. La forma de proporcionar energía sostenible y fiable a zonas remotas es un factor importante para escoger el tipo de turbina

Las corrientes de viento pueden utilizarse para proporcionar la electricidad mediante la conversión de la energía. La energía aportada por el viento o el agua se convierte mediante turbinas, la selección de estas turbinas hidro cinéticas es de gran importancia pues, depende principalmente del tipo de fluido, dirección del flujo, la

aplicación, practicidad y la capacidad de aprovechamiento de los recursos. Las turbinas hidro cinéticas se clasifican a grandes rasgos en dos categorías como: turbinas de flujo axial y turbinas de flujo cruzado. La clasificación de estas turbinas se hace con base en el eje de orientación del rotor con respecto a la dirección del flujo, para entender mejor esto se puede ver la figura 5.

Figura 5. Clasificación de las turbinas hidro cinéticas



Fuente: *A review on technology, configurations, and performance of cross-flow hydrokinetic turbines.*²⁰

Las turbinas hidro cinéticas de flujo axial tienen su eje de rotación horizontal/inclinado y paralelo a la dirección del flujo del agua. Estas turbinas son similares en diseño y funcionamiento a las hélices de los barcos y, por lo tanto, también se conocen como hélices. Para obtener un alto rendimiento, la alineación del rotor de la turbina debe ser precisa con la corriente de agua.

El requisito de flujo de la corriente para las turbinas de flujo axial las hace más adecuadas para aplicaciones como las oceánicas, en arroyos o en corrientes de aire. El rotor de estas turbinas puede tener dos, tres o varios álabes, en función de las necesidades de par y de las propiedades del flujo, este tipo de turbinas se caracteriza por tener componentes mucho más simples, por lo tanto, su mantenimiento y puesta en marcha son de gran practicidad; mientras que las

²⁰ SAINI, Gaurav y SAINI, Rajeshwer Prasad. A review on technology, configurations, and performance of cross-flow hydrokinetic turbines [en línea]. International Journal of Energy Research, 2019. vol. 43, no 13, p. 6639-6679. Disponible en <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.4625>

turbinas hidro cinéticas de flujo cruzado tienen su eje de rotación siempre perpendicular a la dirección del flujo de aire o agua entrante, lo que hace que acepte flujos en cualquier dirección pero la operación de la turbina de flujo cruzado generalmente, requiere de un mecanismo de transmisión de potencia debido a la dirección cruzada de la transferencia de eje, lo que requiere un montaje más complejo. La diferencia entre algunos parámetros de las turbinas hidro cinéticas de flujo axial y las turbinas hidro cinéticas de flujo cruzado se indican en la tabla 1.

Tabla 1. Diferencias entre turbinas de flujo axial y flujo cruzado

Atributos	Turbina hidro cinética de flujo axial	Turbina hidro cinética de flujo cruzado
Eje de rotación	Paralelo al flujo	Ortogonal al flujo
Número de cuchillas	Doble o multi hojas	Doble o multi hojas
Estructura	Abierto o canalizado	Mayormente abierto
Eficiencia	Máyor	Depende del rotor (Darrieus/Savonius)
Generador	Generador sellado al agua	Depende de la orientación
Capacidad de arranque automático	Sobre todo, autoinicio	Depende del tipo de rotor (Darrieus/Savonius)
Costo de manufactura	Alto	Depende del rotor (Darrieus/Savonius)
control de escombros	Muy afectado	Menos afectado
generación de par	Torque más estable	Depende del tipo de rotor (Darrieus/Savonius)
Requisito de profundidad	Alto	Bajo
Problemas con la instalación	Alto	Bajo
Requisito de perfil aerodinámico	sí	Depende del rotor (Darrieus o Savonius)
Forma del rotor	Tipos de discos	Tipo cilíndrico
Solicitud	Océano, marea	Río, canal, tuberías

Fuente: elaboración propia basada en *A review on technology, configurations, and performance of cross-flow hydrokinetic turbines*.

Las turbinas de flujo cruzado se clasifican a su vez en dos categorías, es decir, turbina hidro cinética de flujo transversal de eje horizontal y turbina hidro cinética de flujo cruzado de eje vertical.

Las turbinas de flujo horizontal o axial son una opción adecuada para aplicaciones de baja profundidad en el agua, mientras que las turbinas hidro cinéticas de flujo cruzado de eje vertical se acomodan en una gran profundidad de agua. Sin embargo, no hay una diferencia representativa en el rendimiento o generación de energía, al cambiar las orientaciones de la turbina.

De acuerdo con la información expuesta anteriormente entre turbinas de flujo axial y cruzado, se selecciona una turbina de flujo axial debido a los siguientes factores:

- Facilidad de mantenimiento con respecto a las turbinas de flujo cruzado
- Diseño más simple
- Montaje sencillo pues la turbina de flujo cruzado requiere de un mecanismo de transmisión de potencia complejo
- Diseño portátil para transportar pues las turbinas de flujo cruzado son un poco grandes.
- Generación similar; aunque la turbina axial no sea útil en aguas profundas como la turbina de flujo cruzado esto no representa una diferencia significativa.

Para el proyecto se seleccionó un artefacto producido por la empresa canadiense Seaformatics. Se trata de una turbina hidro cinética funcional en agua y viento llamada WaterLily.

Figura 6. Turbina WaterLily



Fuente: GETDATGADGET.²¹

²¹ GETDATGADGET. Waterlily turbine generates electricity using water and wind power. [sitio web]. Getdatgadget, 2019. Imagen. Disponible en <https://www.getdatgadget.com/waterlily-turbine-generates-electricity-using-water-and-wind-power/>

4.2. ETAPA 2: ANÁLISIS

Al concluir la etapa 1 en donde se seleccionó bajo diferentes aspectos el tipo y la turbina que se usaría en el proyecto, el siguiente paso es verificar las condiciones de uso y los datos de generación de la turbina seleccionada evaluando esto por medio de la dinámica de fluidos computacional (CFD), en otras palabras, la turbina se sometería a un análisis numérico. Antes de llevar la turbina al ambiente de análisis existieron pasos muy importantes; los cuales son: definir las dimensiones, modelar, mallar y discretizar.

4.2.1. Definición de dimensiones de la turbina

Para poder modelar se requiere conocer algunas medidas o dimensiones sobre la turbina, para esta situación nos encontramos con muy pocos datos con respecto a la turbina; la mayor información encontrada se obtuvo de: *Modeling and performance calculation of a horizontal axis wind and hydrokinetic turbine: Numerical study*; un trabajo en el que se expone un estudio a esta misma turbina. En este artículo se dio a conocer:

Tabla 2. Dimensiones principales

DIMENSIÓN	MAGNITUD	UNIDAD
Diámetro del cubo	20	mm
Diámetro de la cubierta	150	mm
Ancho del impulsor	30	mm
Número de álabes	3	-

Fuente: elaboración propia basado en *Modeling and performance calculation of a horizontal axis wind and hydrokinetic turbine: Numerical study*.

En este punto se logra conocer algunas de las dimensiones sin embargo existían algunos datos que se desconocían como los ángulos de los álabes; para esto se planteó un método comparativo para construir una geometría rápida y encontrar los datos faltantes. Cabe aclarar que con este método los datos obtenidos son aproximaciones al diseño original.

El primer paso realizado fue buscar una imagen en donde se expusiera la turbina desde su vista frontal, la figura 7 presenta la imagen usada.

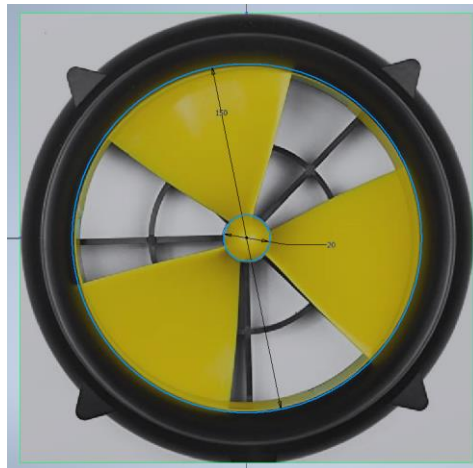
Figura 7. Vista frontal



Fuente: Bukalapak.²²

Esta imagen se exportó al software CAD Inventor® y se insertó en un boceto, en este boceto se generaron dos círculos; el primero con un diámetro de 20 mm y el segundo de 150 mm, estos círculos para hacer referencia al cubo y a la cubierta. Ahora solo se hizo coincidir los círculos con la vista de la turbina, véase la figura 8.

Figura 8. Diámetro cubo y cubierta

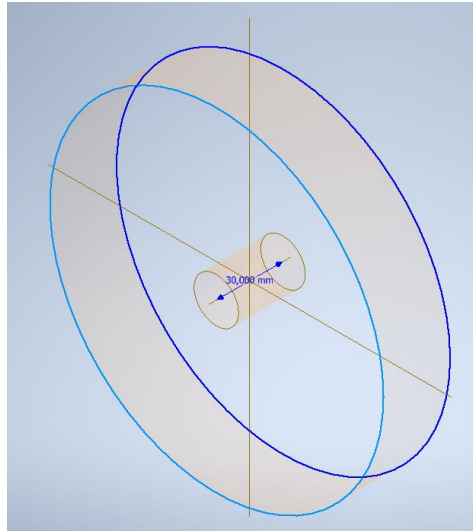


Fuente: Elaboración propia.

²² BUKALAKAP. Waterlily Usb Portable Power Turbine Charger Water Wind Outdoor Camper [sitio web]. Disponible en <https://www.bukalapak.com/p/komputer/desktop/269dhga-jual-waterlily-usb-portable-power-turbine-charger-water-wind-outdoor-camper>

Siguiente a esto se generaron dos superficies con respecto al boceto creado con un ancho de 30 mm, como se ve en la figura 9; correspondiente al ancho del impulsor (el espacio donde se encuentran los álabes).

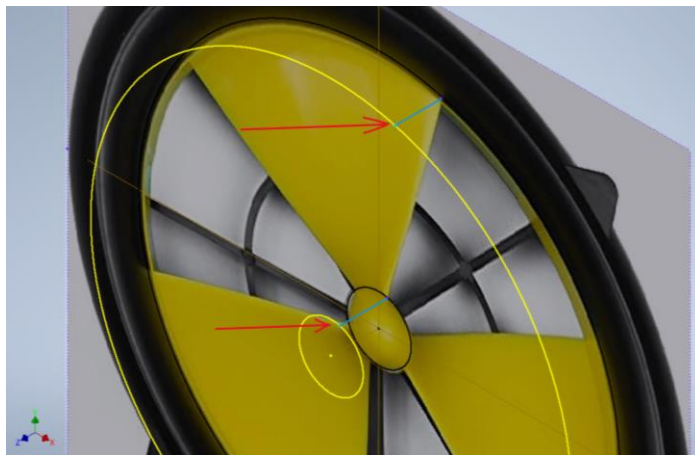
Figura 9. Espacio para los álabes



Fuente: Elaboración propia.

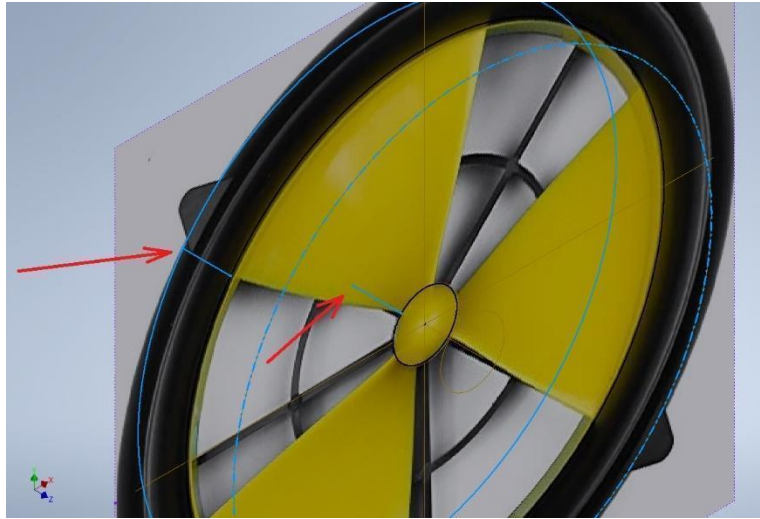
Sabiendo que el álabe inicia en la parte frontal de esta superficie y termina en la parte trasera de la superficie, se plantean dos puntos para el borde de ataque y dos para el borde de fuga teniendo en cuenta la vista frontal de la turbina, como se ve en la figura 10 y 11.

Figura 10. Puntos del borde de ataque



Fuente: Elaboración propia.

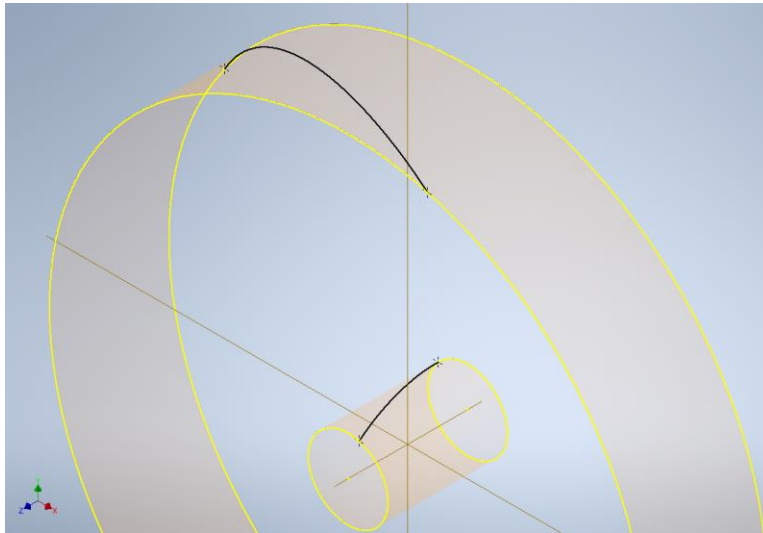
Figura 11. Puntos del borde de fuga



Fuente: Elaboración propia.

Siguiente a esto, se genera un boceto 3D con el fin de proyectar la recta entre los bordes de ataque y fuga con respecto a la superficie circular, el procedimiento se ve muestra en la figura 12.

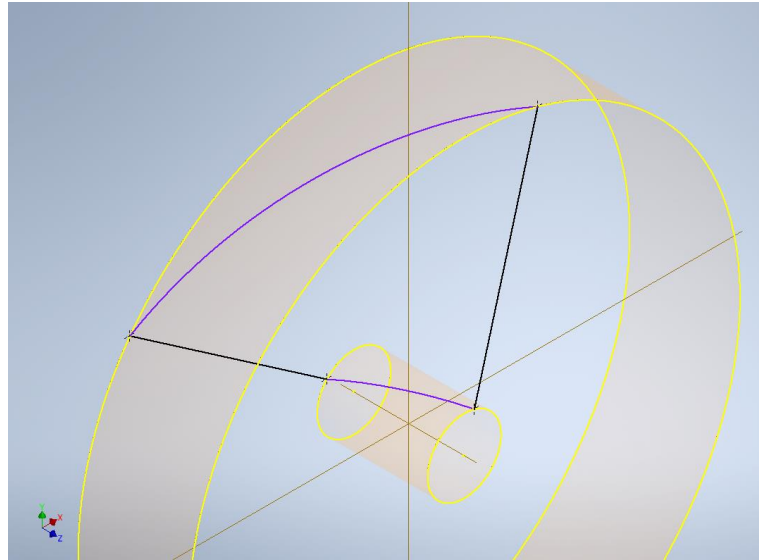
Figura 12. Curvas de la cubierta y cubo



Fuente: Elaboración propia.

Al haber obtenido las curvas que simulan la geometría de la cubierta y del cubo del álabe se unen con líneas rectas los puntos restantes, como se ve en la figura 13; con el fin de formar una aproximación para el contorno del álabe.

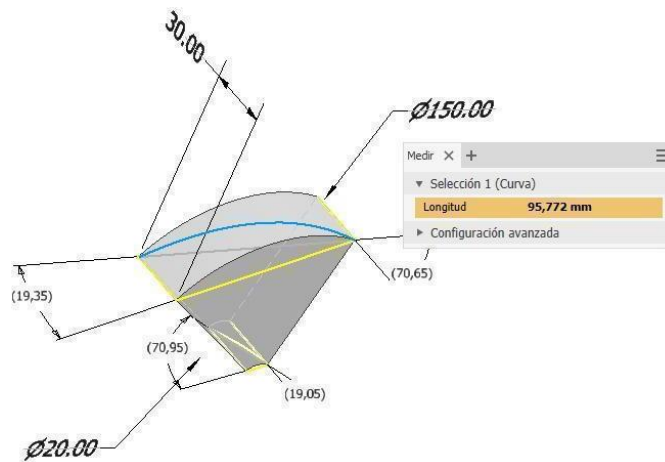
Figura 13. Contorno aproximado del álabe



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo el contorno aproximado para el álabe se usará la herramienta “medir” con el fin de conocer medidas desconocidas, un ejemplo de esto se muestra en la figura 14.

Figura 14. Medidas



Fuente: Elaboración propia.

Al contar con medidas claras sobre la turbina se procede a llevarla a un ambiente de modelación: Ansys BladeGen.

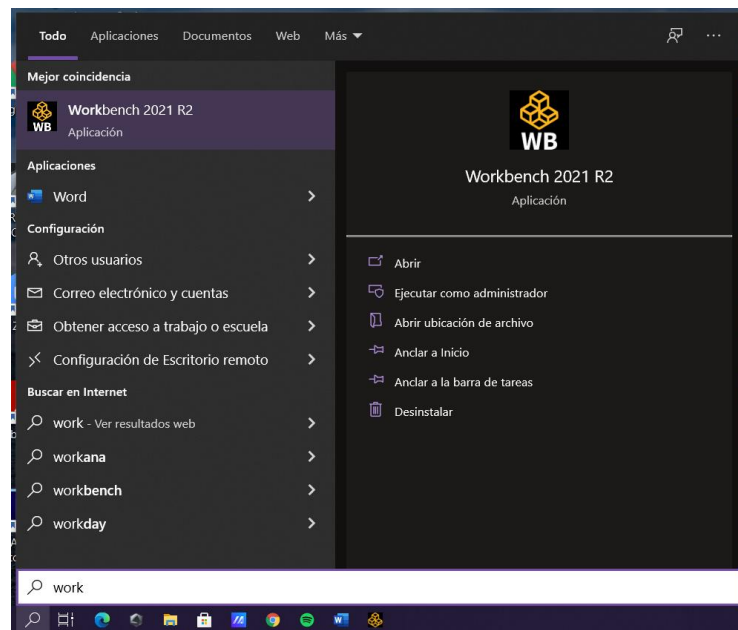
4.2.2. Modelar la turbina

Luego de obtener las dimensiones de la turbina, se puede avanzar a su modelamiento en 3D; para esto se hará uso del programa Ansys, Inc. el cual cuenta con diferentes herramientas para llevar a cabo la simulación de diferentes problemas de ingeniería.

Dentro del programa se usará la herramienta Ansys BladeGen. Esta herramienta (explicada anteriormente), brinda un entorno fácil de manejar para diseñar la turbina y sus álabes de la mejor manera posible. El procedimiento para llevar a cabo el modelamiento de la turbina se explicará paso a paso a continuación:

Primero que todo se va a abrir el espacio de trabajo buscando la plataforma Workbench, figura 15.

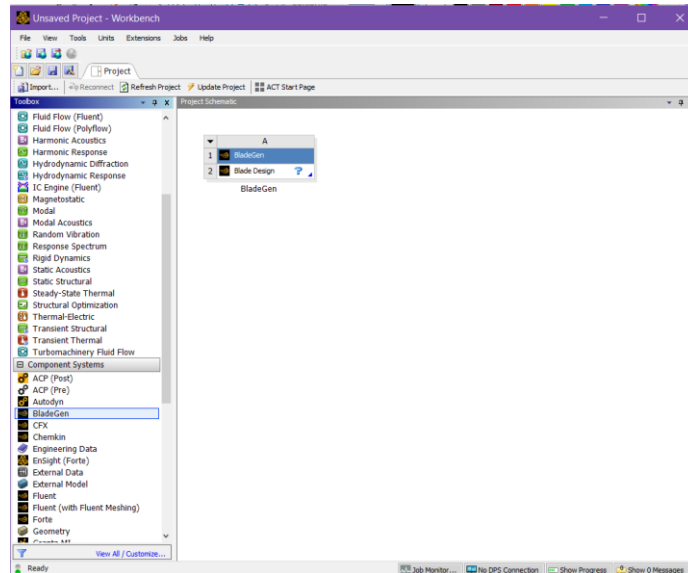
Figura 15. Abrir Workbench



Fuente: Elaboración propia.

Una vez en la plataforma Workbench se selecciona el software Ansys BladeGen, figura 16.

Figura 16. BladeGen

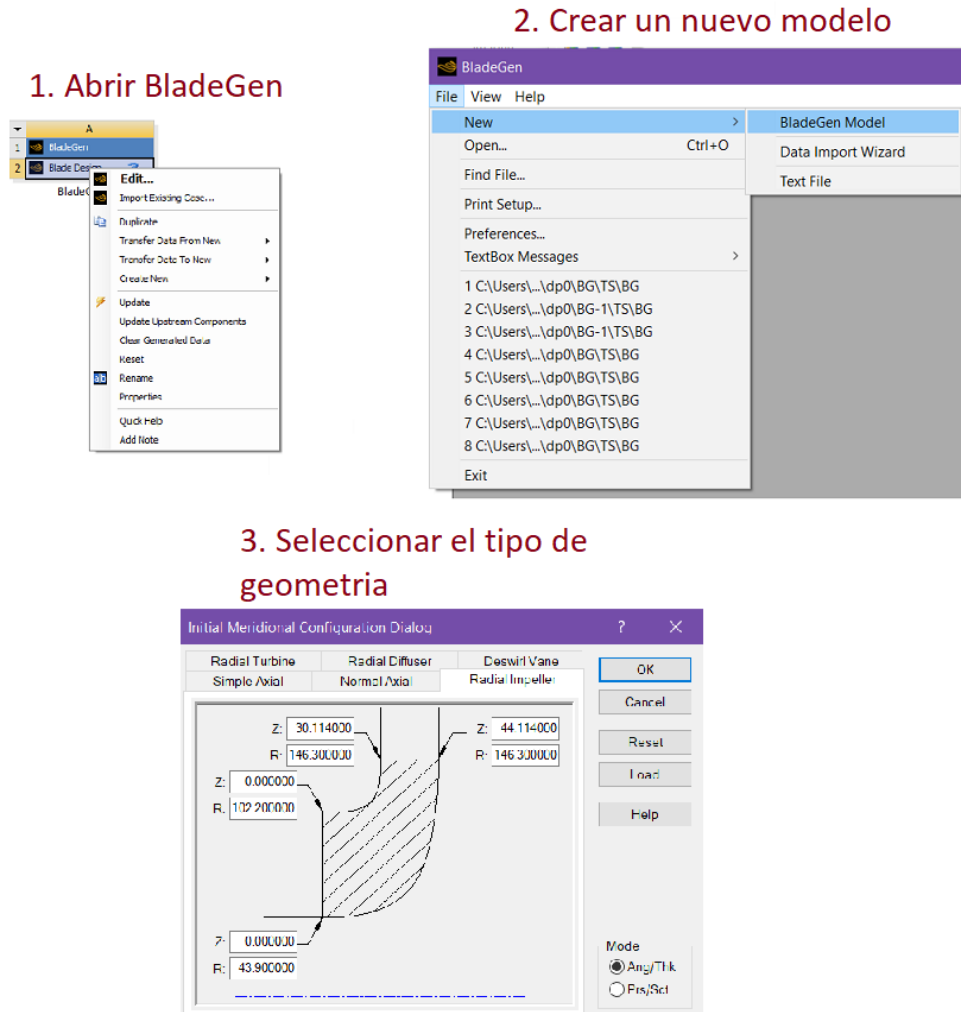


Fuente: Elaboración propia.

Teniendo el programa BladeGen en el diagrama de flujo del proyecto, se procede a abrirlo. Para esto se seguirán los siguientes pasos mostrados en la figura 17:

1. Primero se debe dar clic derecho sobre la celda **Blade Design**, y seleccionar la opción **Edit...**; luego de esto se abrirá la interfaz del programa.
2. Estando en la interfaz de BladeGen se irá a **File > New > BladeGen Model**. Esto abrirá una ventana emergente.
3. La ventana emergente será el primer proceso para la creación de la geometría; en la parte superior de la ventana aparecerán varios tipos de geometría como: Turbina axial simple, axial normal, turbina radial, difusor radial, impeller radial, entre otras.

Figura 17. Nuevo modelo en BladeGen



Fuente: Elaboración propia.

Luego de que se muestra la ventana para escoger la geometría, se debe escoger la geometría para ingresar sus dimensiones, estas dimensiones fueron presentadas anteriormente en la tabla 2, sin embargo, se debe hacer una aclaración.

Importante: la turbina originalmente contaba con un diámetro para el cubo de 20 milímetros, pero por factores de la fabricación este diámetro se debe cambiar aumentando 10 milímetros, los nuevos datos para las dimensiones de la turbina se pueden contemplar en la tabla 3.

Tabla 3. Dimensiones, nuevo diámetro cubo

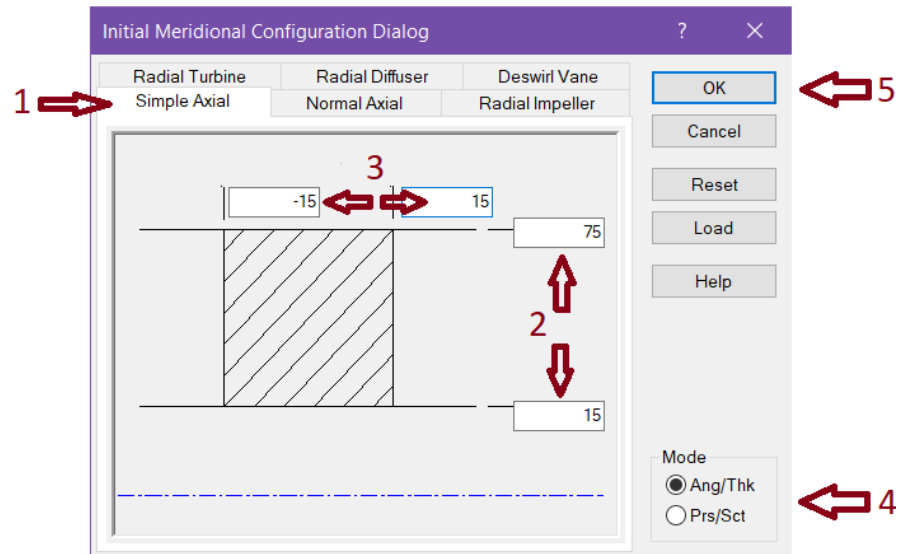
DIMENSIÓN	MAGNITUD	UNIDAD
Diámetro del cubo	30	mm
Diámetro de la cubierta	150	mm
Ancho del impulsor	30	mm
Número de álabes	3	-

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestran los pasos que se llevaron a cabo para el modelamiento del rotor, estos pasos se ilustran en las figuras 18 y 19:

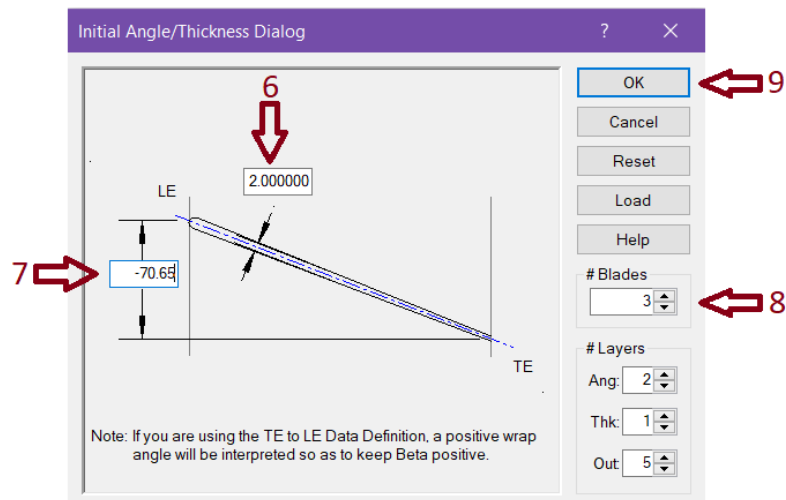
1. Seleccionar el tipo de componente como **Simple axial**.
2. Ingresar las medidas del radio de la punta (75 mm) y del cubo (15 mm) de la turbina.
3. Ingresar las coordenadas para el inicio y fin de los álabes; borde de ataque (-15) y borde de fuga (15).
4. En la casilla **Mode** seleccionar: **Ang/Thk**.
5. Clic en **Ok**.
6. Indicar un espesor estándar para la turbina (2), no es tan importante el valor pues en pasos posteriores se configurará más específicamente.
7. Dar el ángulo para el álabe (-70.65).
8. En la casilla # **Blades** seleccionar 3 álabes.
9. Clic en **Ok**.

Figura 18. Geometría del rotor



Fuente: Elaboración propia.

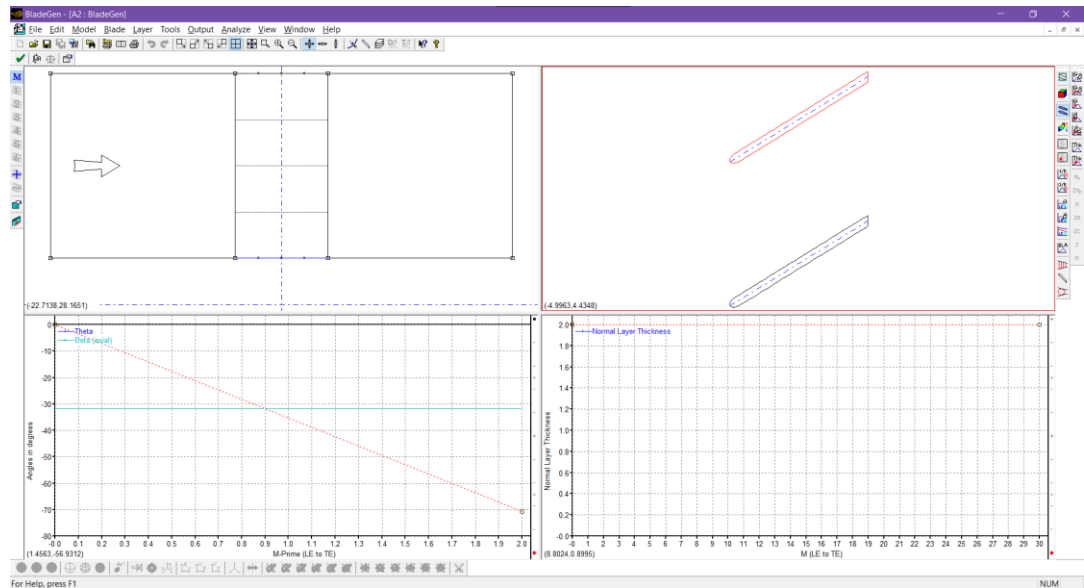
Figura 19. Espesor, ángulo y # de álabes



Fuente: Elaboración propia.

Luego de completar los pasos anteriores se genera la geometría, el programa mostrará: en la parte superior izquierda el perfil meridional del rotor, en la parte superior derecha se muestra la **Blade to Blade view**, en la parte inferior izquierda la gráfica de los ángulos del álabe y en la parte inferior derecha la gráfica del espesor del álabe, visualice esto en la figura 20.

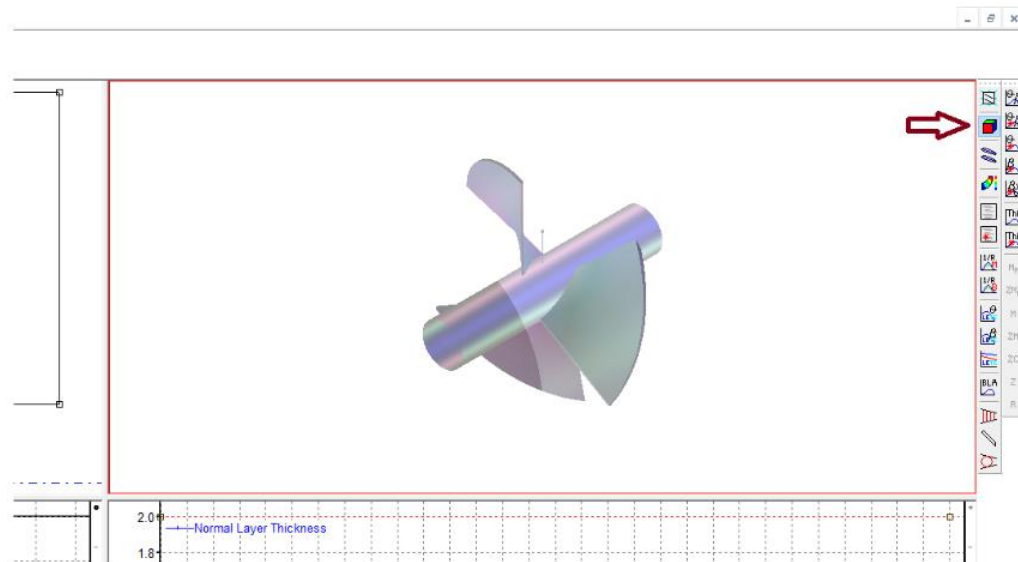
Figura 20. Geometría generada



Fuente: Elaboración propia.

En la parte superior derecha se seleccionará la opción de **3D view**, para cambiar la vista del perfil del alabe por una vista 3D del rotor, observe la figura 21.

Figura 21. Vista 3D del rotor

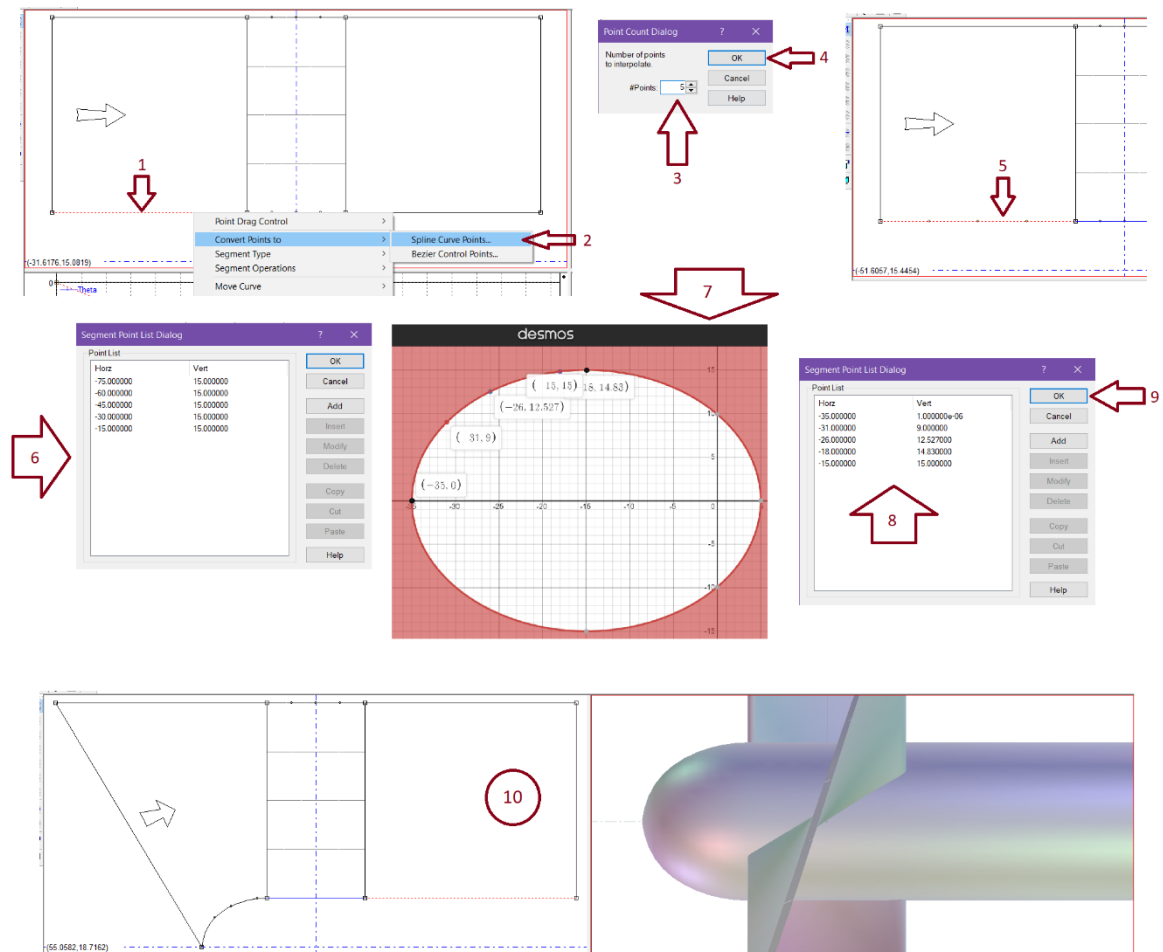


Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente de esto se debe terminar de configurar correctamente la geometría del rotor; el primer paso será darle la terminación a la ojiva de la turbina pues el programa genera una forma de cilindro y la ojiva de la turbina original tiene una forma cercana a una elipse. Esto se explica a continuación y se puede examinar en la figura 22:

1. En el plano del perfil meridional se selecciona la línea mostrada en la figura.
2. Clic derecho > **Convert Points to > Spline Curve Points...**
3. Se abre un cuadro de texto en el que preguntará la cantidad de puntos para la interpolación, se ingresará un valor de 5.
4. Clic **Ok**.
5. Doble Clic en la línea.
6. Se abre un cuadro donde muestra todos los puntos y sus coordenadas, estas coordenadas se cambiarán para que asemeje una ojiva con una forma elíptica.
7. Para saber las coordenadas necesarias para formar una elipse se hace uso de un graficador como **Desmos**.
8. Se ingresan las coordenadas del graficador en el cuadro de *BladeGen*.
9. Clic **Ok**.
10. Se obtiene la geometría para la ojiva.

Figura 22. Ojiva del rotor



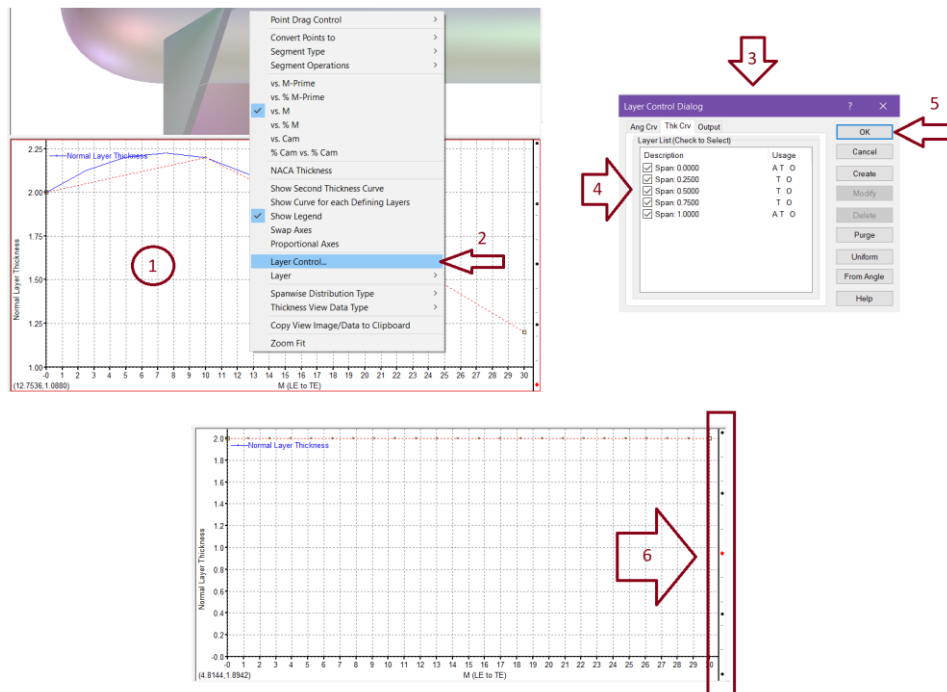
Fuente: Elaboración propia.

Ahora como paso fundamental se detalla el espesor para el álabe, pues el programa generó el modelo con el espesor impuesto anteriormente; cabe aclarar que este espesor fue tomado para toda la hoja, sin embargo, el modelo original tiene cambios en su espesor lo que hace que no tenga un espesor constante en toda la hoja. Los pasos para configurar el espesor del álabe del rotor se presenta a continuación:

1. Clic derecho en la gráfica del espesor (parte inferior derecha).
2. Clic en **Layer Control**.
3. Aparece el cuadro de diálogo para el control de capas del álabe.

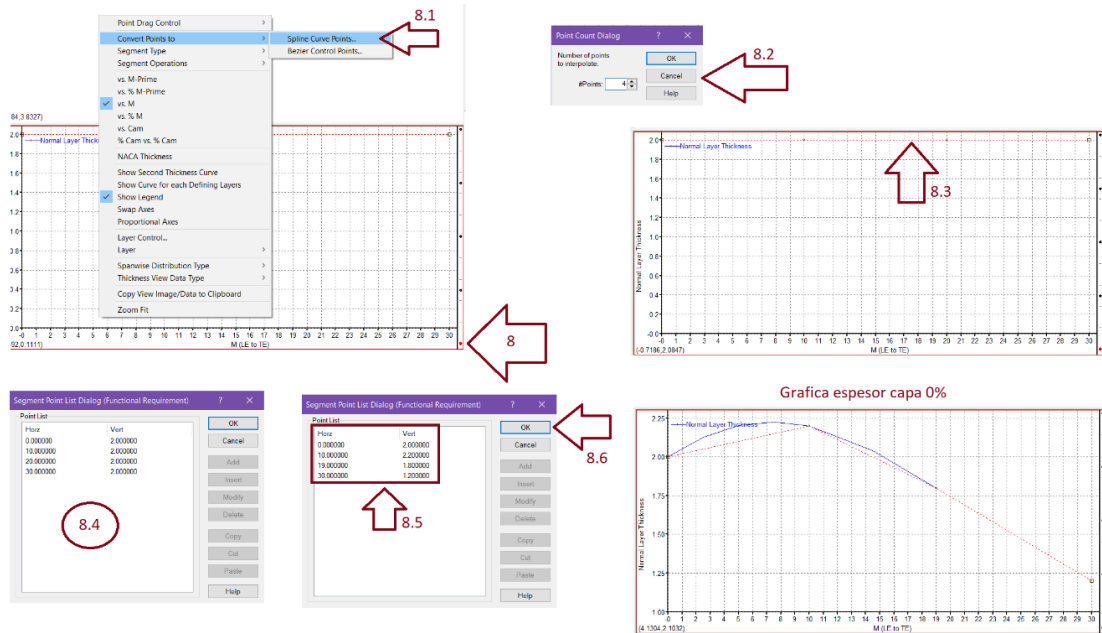
4. Se deben activar las capas: 0% (cubo), 25%, 50% (mitad), 75% y 100% (cubierta).
5. Clic **Ok**.
6. Una vez activados los controles de capa, en la parte derecha de la gráfica de espesor aparecerán 5 puntos negros; estos hacen referencia a las capas activadas, véase la figura 23.
7. Nota: El espesor para el álabe no es constante; va disminuyendo desde el cubo hasta la cubierta y desde el borde de ataque hacia el borde de fuga. Por esto cada capa lleva una configuración de espesor diferente, por esto los pasos siguientes son muy importantes.
8. Se selecciona la capa 0%, el cubo correspondiente al primer punto de abajo hacia arriba, el punto debe volverse rojo; luego de esto aparecerá la gráfica del espesor la cual será una línea recta ubicada en 2 milímetros, la siguiente secuencia de pasos se ilustra en la figura 24.
 - 8.1. Clic derecho sobre la línea > **Convert Points to > Spline Curve Points...**
 - 8.2. Se abre un cuadro de texto en el que preguntará la cantidad de puntos para la interpolación, se ingresará un valor de 4.
 - 8.3. Doble clic en la línea
 - 8.4. Se abre un cuadro donde se muestran las coordenadas para esa línea.
 - 8.5. Esas coordenadas van a ser cambiadas por las mostradas en la imagen.
 - 8.6. Clic **Ok**.
9. Se repiten los pasos 8, 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5 y 8.6 para la capa 25%; figura 25.
10. Se repiten los pasos 8, 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5 y 8.6 para la capa 50%; figura 26.
11. Se repiten los pasos 8, 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5 y 8.6 para la capa 75%; figura 27.
12. Se repiten los pasos 8, 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5 y 8.6 para la capa 100%; figura 28.

Figura 23. Activación de las capas



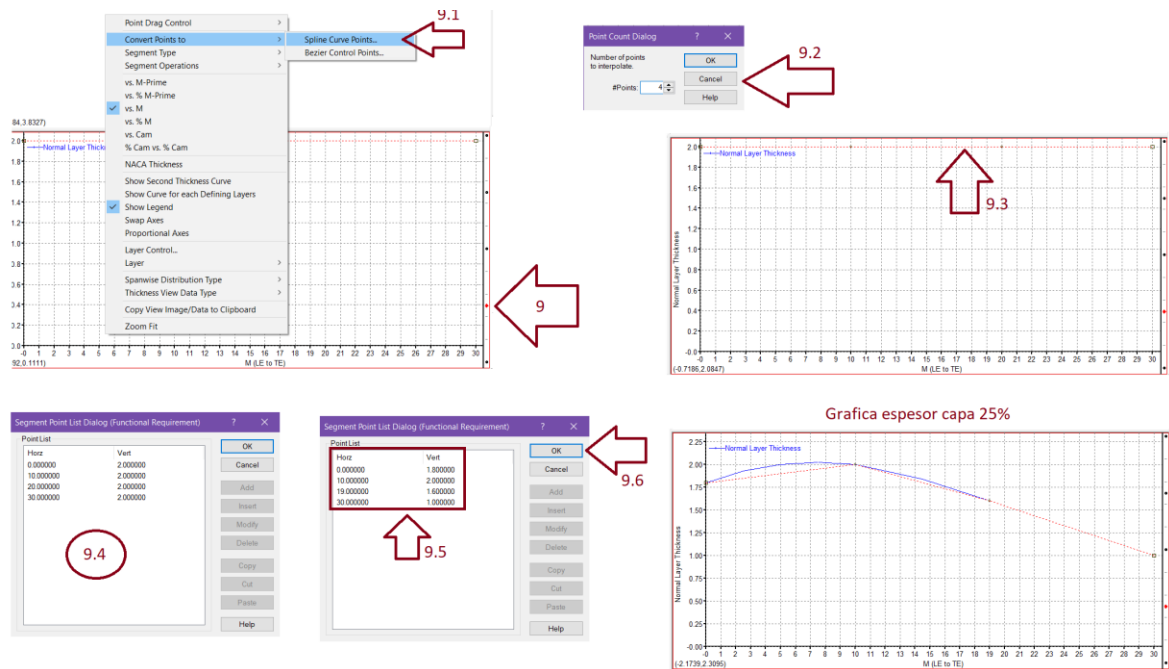
Fuente: Elaboración propia.

Figura 24. Configuración espesor para la capa 0%



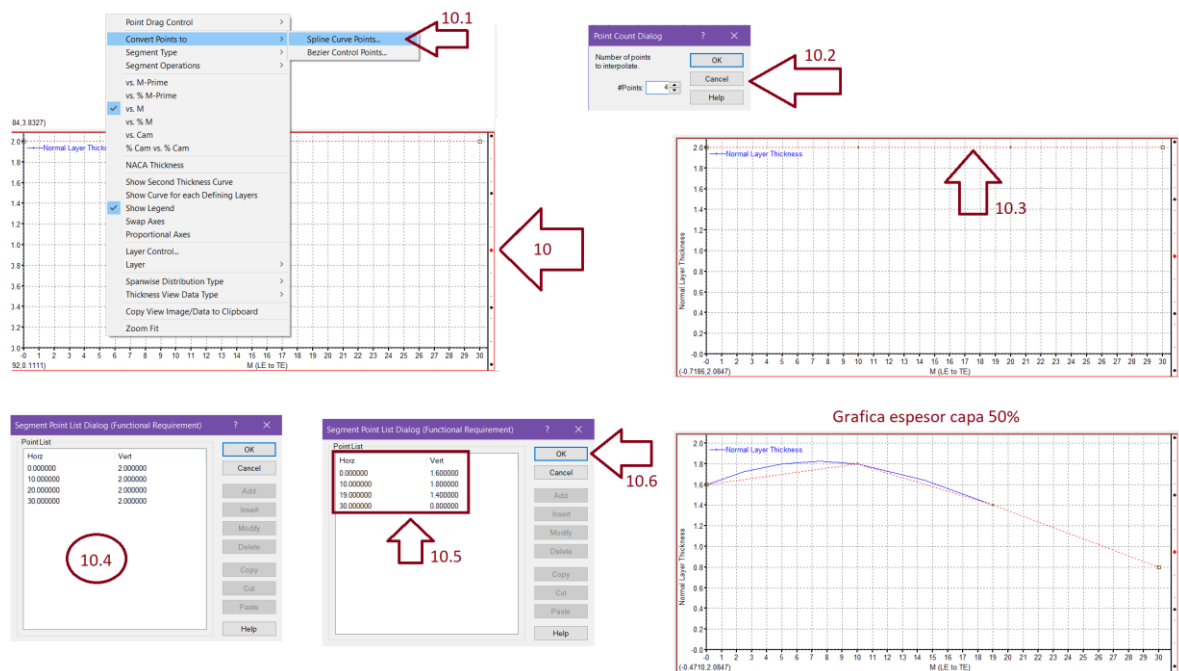
Fuente: Elaboración propia.

Figura 25. Configuración espesor para la capa 25%



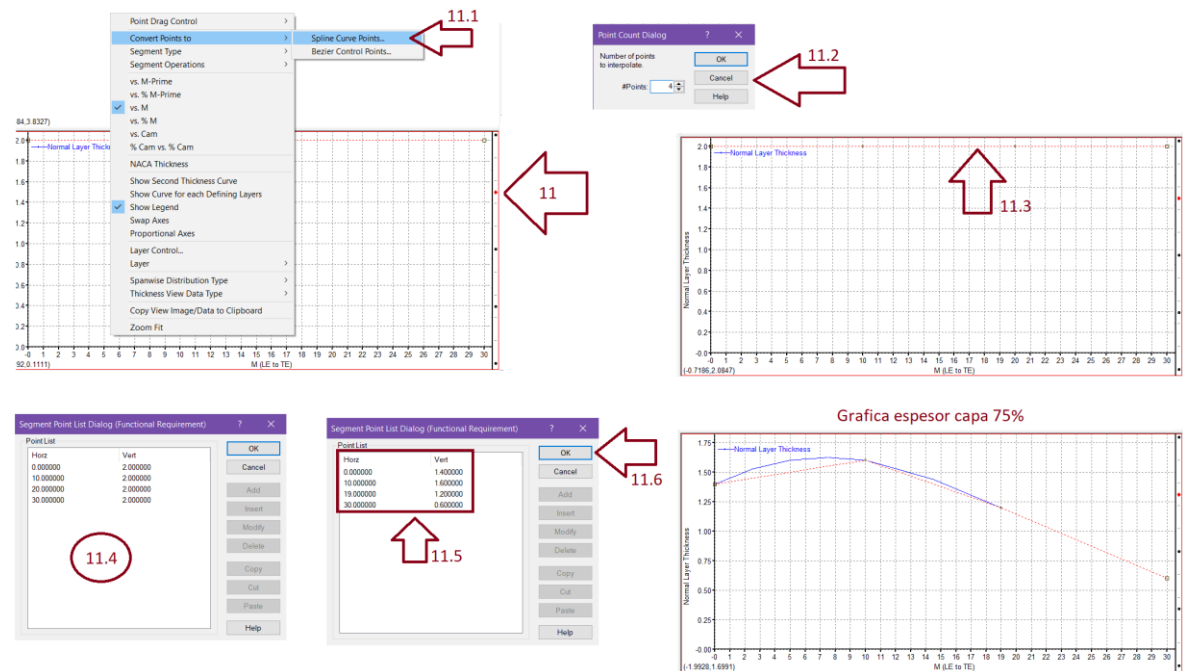
Fuente: Elaboración propia.

Figura 26. Configuración espesor para la capa 50%



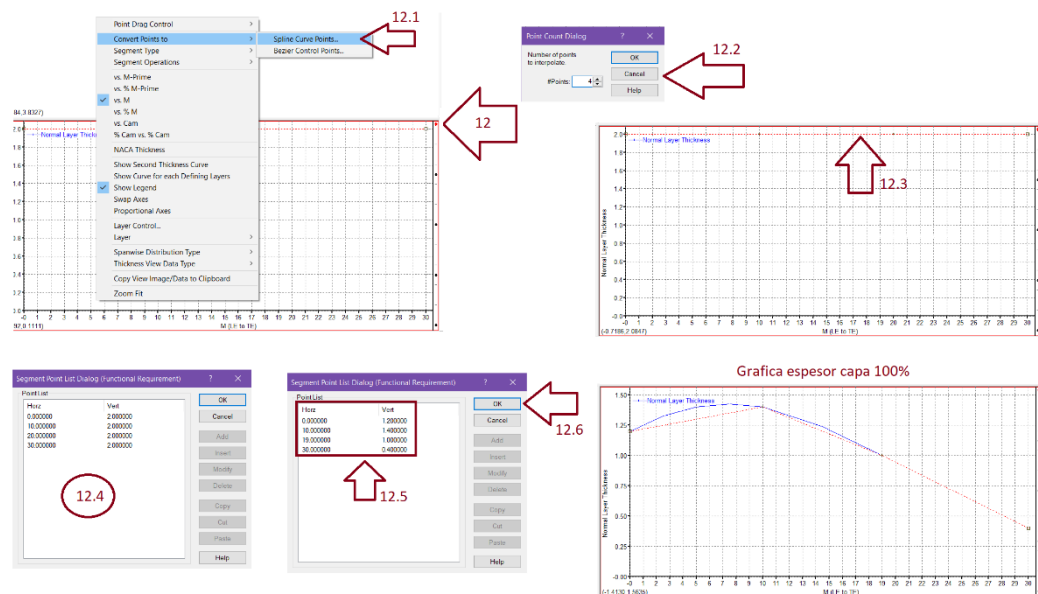
Fuente: Elaboración propia.

Figura 27. Configuración espesor para la capa 75%



Fuente: Elaboración propia.

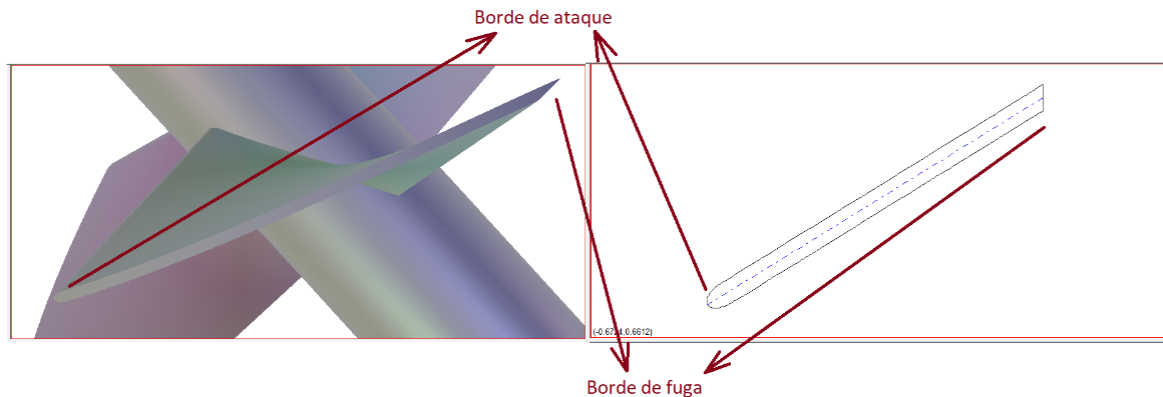
Figura 28. Configuración espesor para la capa 100%



Fuente: Elaboración propia.

Si el procedimiento anterior se realizó correctamente, los álabes de la turbina ya cuentan con el espesor correcto deseado. El paso siguiente corresponde a configurar los bordes de los álabes pues el programa genera bordes genéricos; el borde de ataque como una elipse y el borde de fuga se genera cortado, contemple la figura 29.

Figura 29. Bordes del álabe

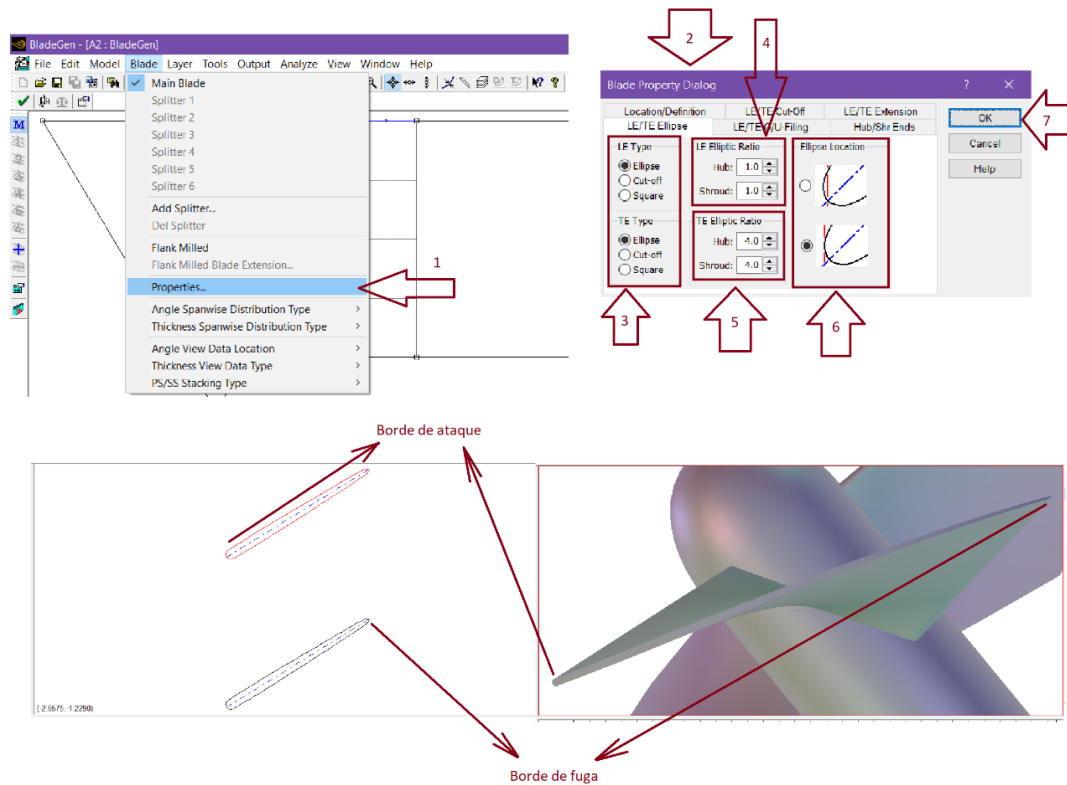


Fuente: Elaboración propia.

Para corregir este diseño en el álabe se llevará a cabo el siguiente método, ilustrado en la figura 30:

1. Clic en **Blade > Properties**.
2. Se abrirá el cuadro de propiedades del álabe.
3. Se configurará el **Type** como "Ellipse" para los dos casos.
4. A la elipse del borde de ataque se le dará valor de 1 a 1.
5. A la elipse del borde de fuga se le dará valor de 4 a 4.
6. Como último en **Ellipse Location** se escogerá el diseño inferior donde la punta del álabe (la elipse) queda tangente con respecto a la línea vertical que hace referencia al ancho máximo de los álabes; en otras palabras, la punta del álabe no se corta.
7. Clic **Ok**.

Figura 30. Bordos corregidos

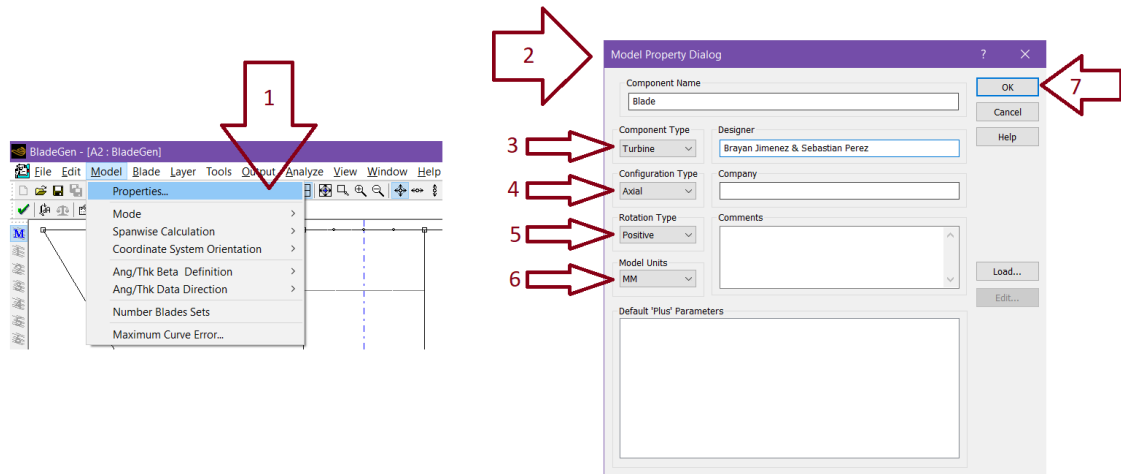


Fuente: Elaboración propia.

Como último se debe agregar datos para la caracterización del ejercicio, vea la figura 31; se debe de especificar ciertas características del modelo con el fin de que el programa reconozca propiedades del componente que se acaba de modelar; pues desde Ansys BladeGen (modelación) se inicia el proceso de la simulación.

1. Clic en **Model > Properties**.
2. Se abrirá el cuadro de propiedades del modelo.
3. **Component Type** se selecciona *Turbine*.
4. **Configuration Type** se selecciona *Axial*.
5. **Rotation Type** se selecciona *Positive*.
6. **Model Units** se selecciona *MM*.
7. Clic **Ok**.

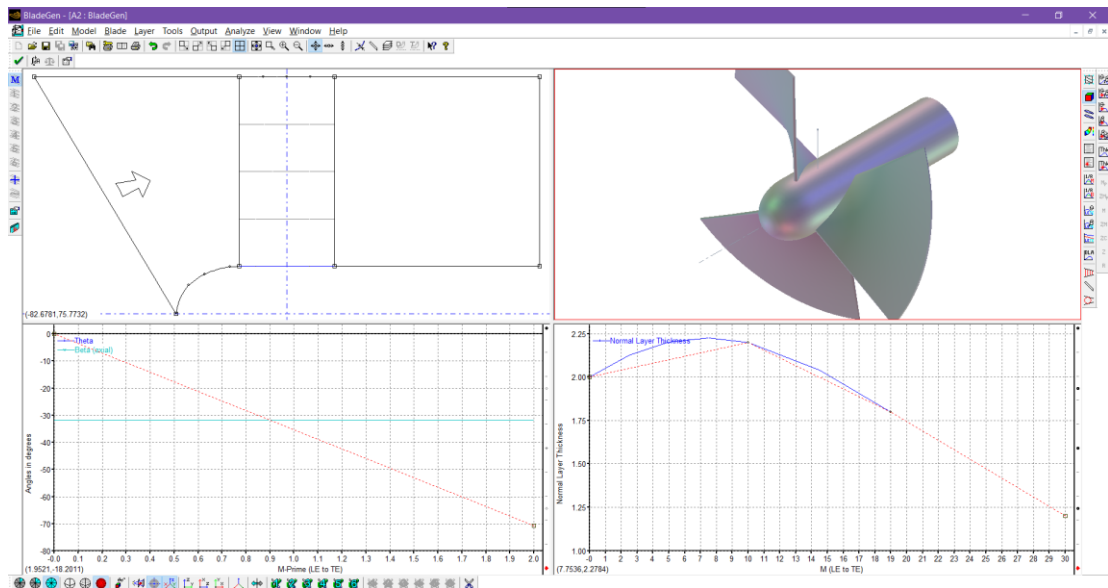
Figura 31. Propiedades del modelo



Fuente: Elaboración propia.

Con este paso se terminaría todo lo correspondiente a la modelación del rotor véase la figura 32. De aquí se puede llevar el caso al siguiente nivel que sería el mallado; para esto solo se necesita cerrar el programa actual Ansys BladeGen e ingresar al ambiente de mallado.

Figura 32. Modelación terminada



Fuente: Elaboración propia.

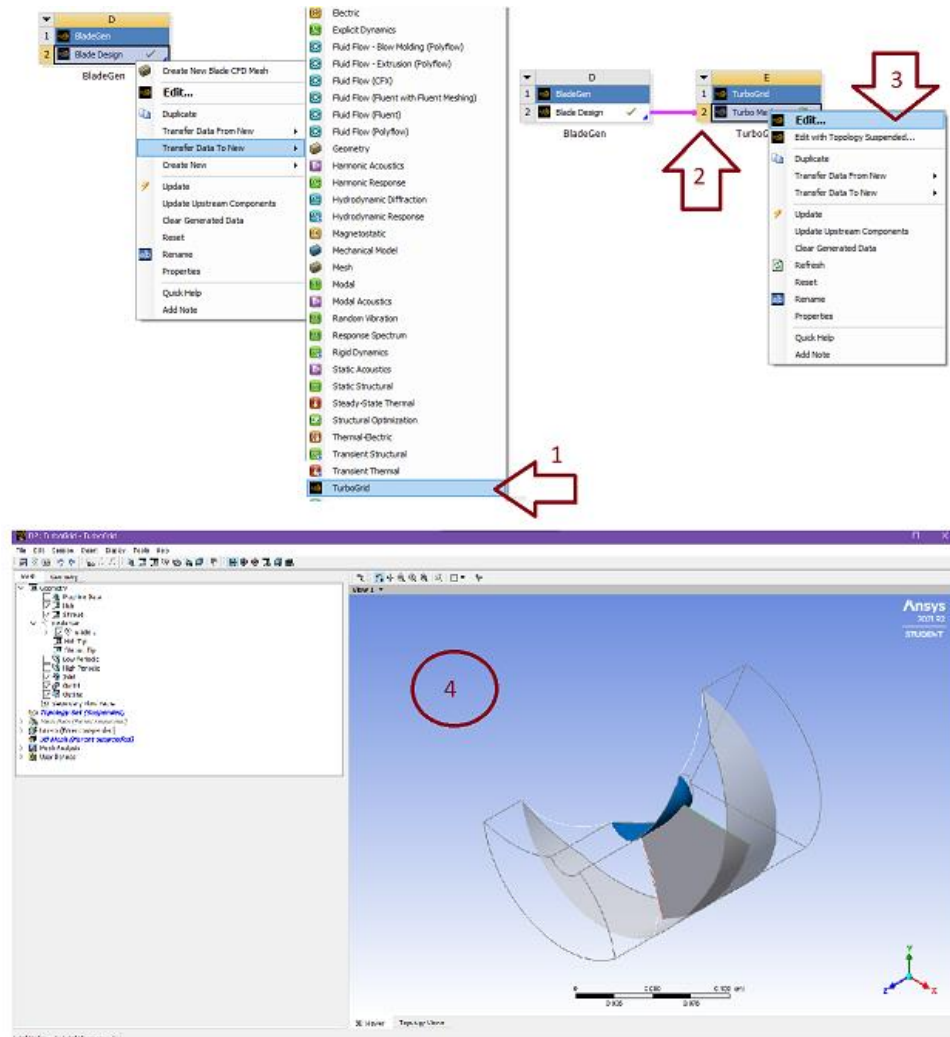
4.2.3. Mallar la turbina

Una vez terminada la etapa de modelación se procede al paso más importante: el mallado; esta etapa de la simulación se llevará a cabo en el programa Ansys TurboGrid. Para realizar un correcto mallado, generalmente se sigue un procedimiento o una secuencia estándar; a continuación, se explica dicha secuencia:

1. Definir la geometría ya sea cargando archivos o enlazando proyectos.
 2. Opcional: se elige un tipo de topología y se anula la opción de suspender la **Topology Set** si es necesario.
 3. Opcional: se puede modificar las configuraciones de la malla (**Mesh Data**), pues aquí se controla el número y la disposición de los nodos en muchas zonas de la malla.
 - a. Importante: Si se requiere de una malla de alta calidad; es decir un mallado fino; se puede configurar más adelante, esto se hace con el fin de disminuir el tiempo de procesamiento mientras se termina de configurar el resto de aspectos de la malla. Es importante mencionar que la calidad de la malla se ve directamente afectado al alterar la densidad del mallado.
 4. Opcional: Se pueden agregar mallas 2D para que guíen la malla 3D; cuando se genera la topología o el mallado 3D el programa de manera automática crea este tipo de mallas donde lo ve necesario.
 5. Verificar la calidad del mallado, si es requerido o hay problemas de estadísticas de malla; se pueden realizar ajustes en la configuración de la malla (**Mesh Data**), el número o en la distribución de capas.
 6. Guardar la malla.
- 4.2.3.1. Definir la geometría: El paso fundamental para el mallado, por no decir el más importante; es la importación de la geometría modelada anteriormente al nuevo programa, este procedimiento se expone en la figura 33 y en los siguientes pasos:
1. Clic derecho sobre la celda **Blade Design > Transfer Data To New > TurboGrid**.

2. Se genera un nuevo bloque para el software Ansys TurboGrid, a este bloque se le enlace la información del bloque anterior, es decir, la geometría del rotor.
3. Clic derecho en la celda **Turbo Mesh**.
4. Ambiente de TurboGrid.

Figura 33. Abrir TurboGrid

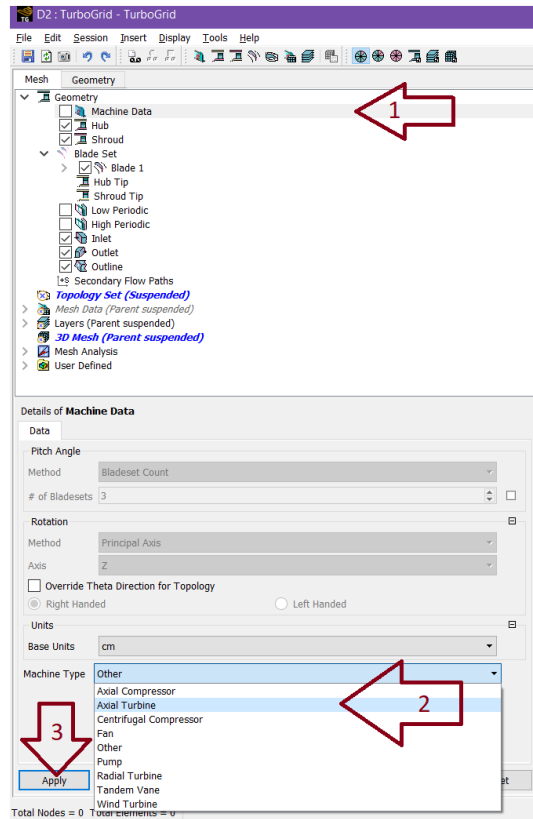


Fuente: Elaboración propia.

Como primer paso en el espacio de trabajo **Mesh**, podrá activar y desactivar la visibilidad de cada objeto; para evitar que se sature la vista hay que dejar activada la visibilidad únicamente de: *Hub, Shroud, Blade 1 y Outline*.

Luego de esto en **Geometry > Machine Data** se dará doble clic; esto abrirá un apartado en la parte inferior izquierda, observe la figura 34; acá se seleccionará el tipo de máquina: *Axial Turbine*.

Figura 34. Tipo de máquina



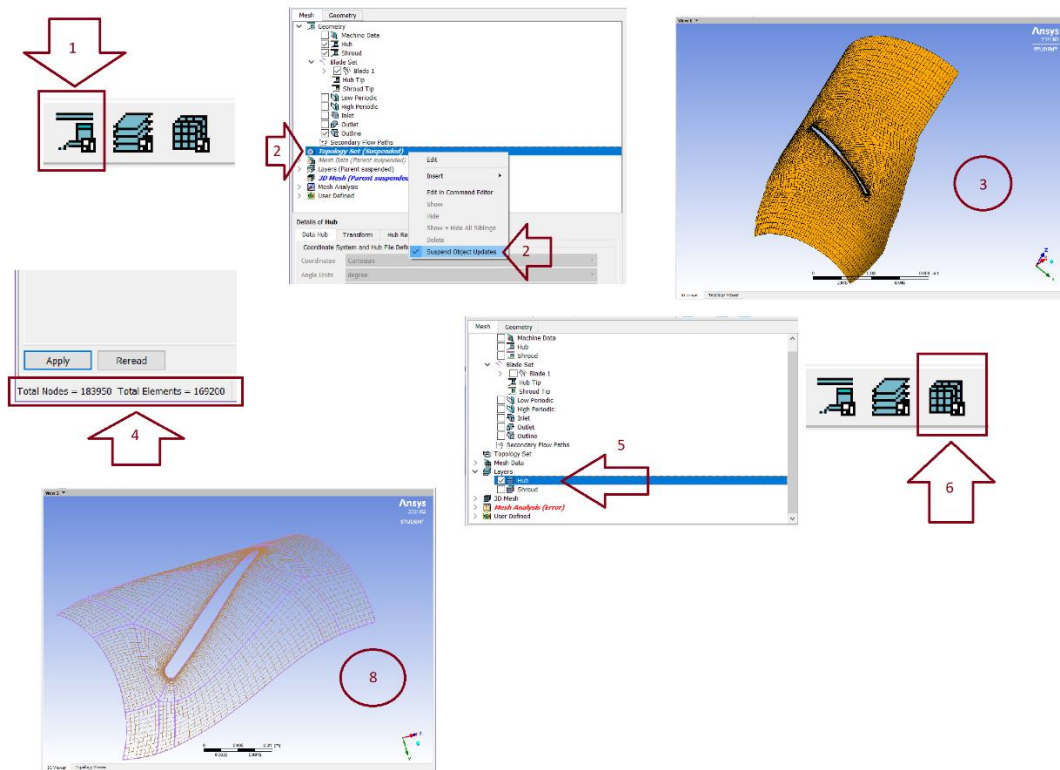
Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.2. Creación de la topología y la malla: Se llega a un paso importante: se creará la topología y la malla. Para esto se llevan a cabo los siguientes pasos, expuestos en la figura 35:

1. Se ocultarán todos los objetos, haga clic en el **Hide all geometry objects**. Esto permitirá una vista sin obstáculos de la topología y de la malla.
2. Cuando inicialmente se suspende la topología, se hace con el fin de reducir esfuerzos computacionales en el momento de definir la geometría; después cuando se anula la opción de suspensión de objeto se realizan los cálculos restantes, lo que produce una malla 3D. Haga clic derecho en **Topology Set** y desactive **Suspend Object Updates**. Después de esto se generan el número de nodos, elementos y la malla 3D.

3. Malla.
4. Número de nodos y elementos.
5. Active la visibilidad del cubo en: **Layers > Hub**.
6. Clic en **Hide all mesh objects**.
7. Topología del cubo (*Hub*).
 - a. Nota: los problemas de calidad de malla se tratan más adelante.

Figura 35. Topología y malla

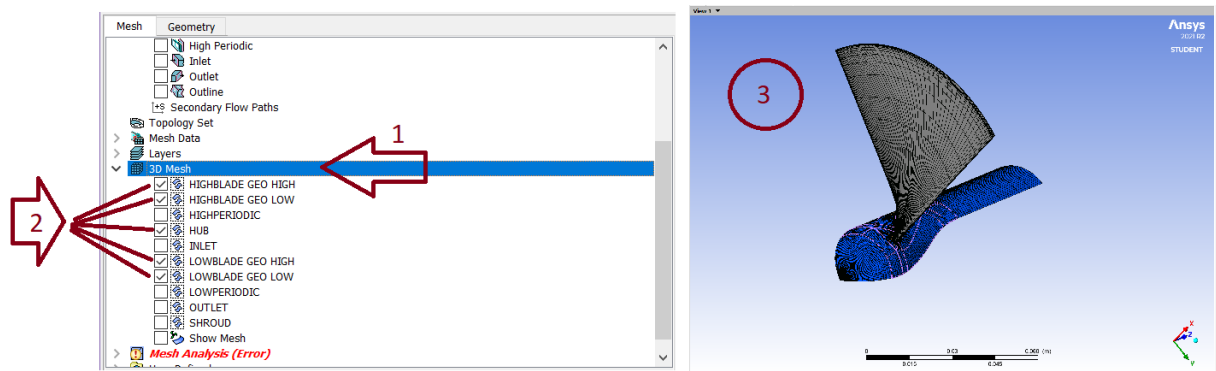


Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.3. Visualización de la malla: Esta sería la primera malla generada, figura 36; para poder visualizarla en el rotor; se puede hacer lo siguiente:

1. Abrir **3D Mesh**.
2. Activar: *HIGHBLADE GEO HIGH*, *HIGHBLADE GEO LOW*, *HUB*, *LOWBLADE GEO HIG* y *LOWBLADE GEO LOW*.
3. Ahora se ve la malla y como se encuentra en el rotor.

Figura 36. Primera malla



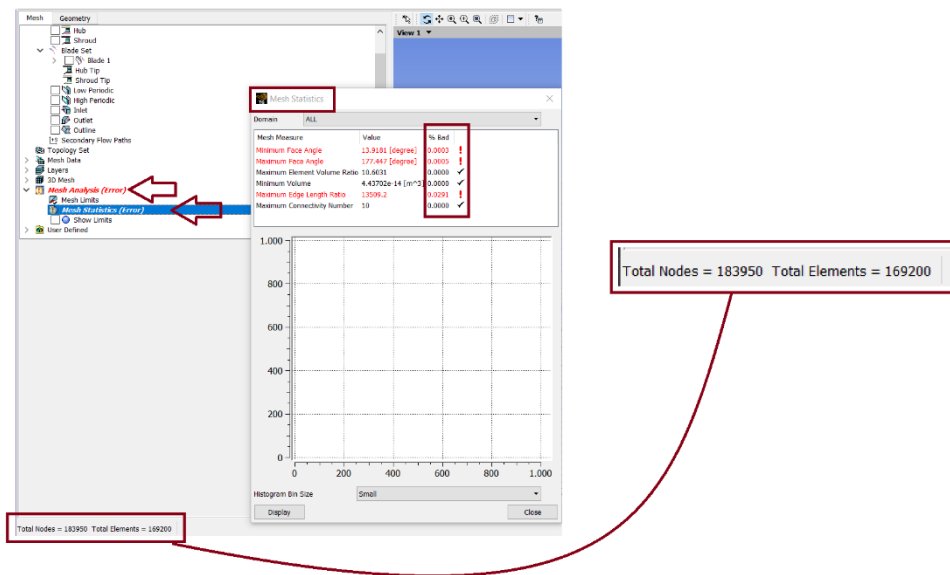
Fuente: Elaboración propia.

Con esta malla ya se puede ir a la siguiente etapa, la discretización del ambiente; sin embargo, es necesario ver las estadísticas de la malla, pues es importante saber la calidad con la que cuenta la malla.

4.2.3.4. Análisis de la malla: En el espacio de trabajo se puede ver las estadísticas de la malla como su número de elementos y nodos.

Para ver la calidad de la malla se debe ir a *Mesh Analysis > Mesh Statistics*; se abre un cuadro donde se presentan el análisis de la malla teniendo en cuenta ciertos factores llamados límites de malla (explicados anteriormente), estos límites definen los valores aceptables para ciertas variables de la malla; el programa cuenta con un rango (valor) en el que debe encontrarse cada variable de la malla para ser aceptable; cuando la malla sale de esos rangos no necesariamente significa que la malla esta errónea, salirse de dicho rango hace referencia a porcentajes de error para la simulación. El cuadro las estadísticas de la malla presenta información organizada en tres columnas: la primera presenta el nombre o especificación del límite, la segunda presenta el valor que tiene dicho límite y la tercera muestra el porcentaje de error; adicionalmente se presenta un visto bueno para las medidas que se encuentran dentro del rango y un signo de interrogación y fuente resaltada en rojo para las medidas que incumplen o salen del rango véase la figura 37.

Figura 37. Primer análisis de malla



Fuente: Elaboración propia.

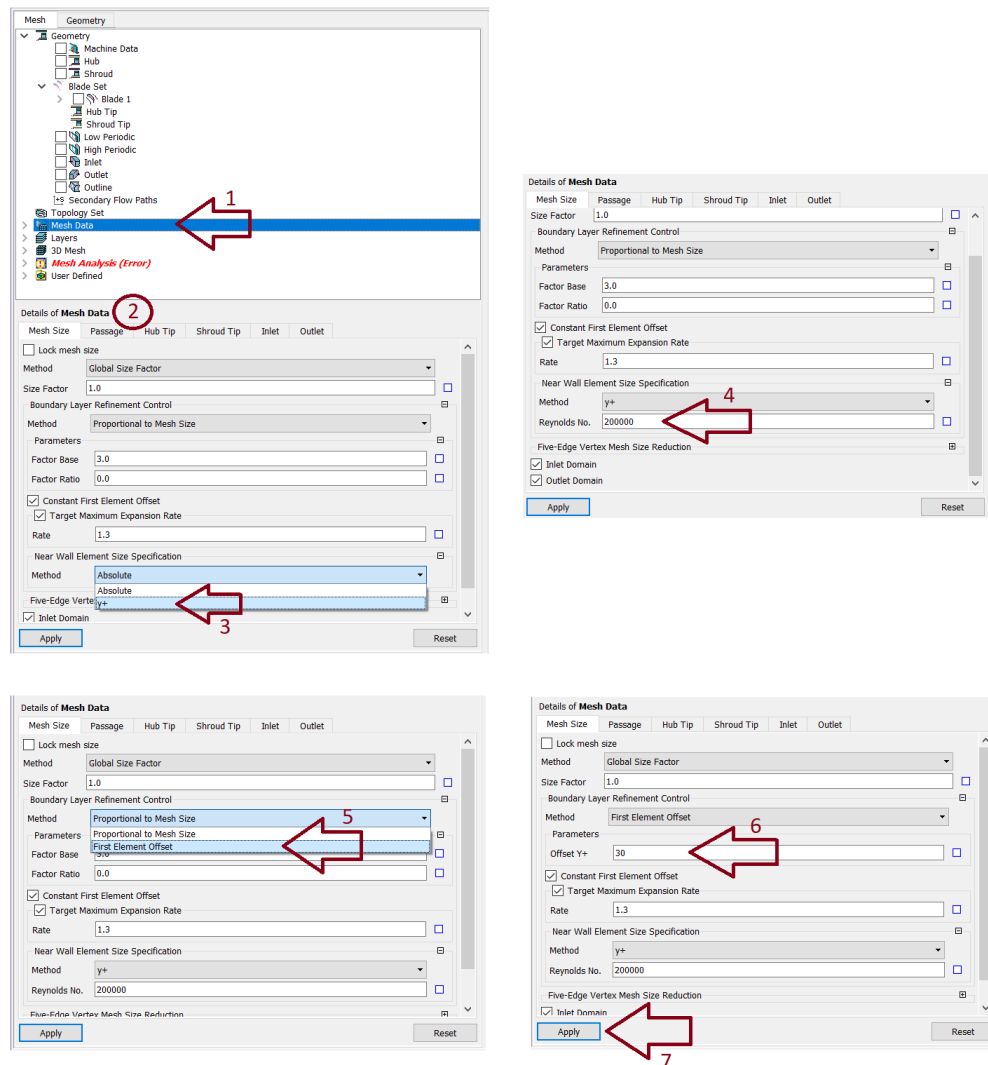
4.2.3.5. Refinamiento de la malla: Luego de revisar los análisis de la malla se ve necesario un refinamiento de malla, pues, aunque la primera malla creada es aceptable, esta se puede mejorar; para mejorar la calidad de una malla se pueden cambiar o variar diferentes características como el tamaño de los elementos, la densidad de la malla, cantidad de nodos, distancias, entre otros, ahora para cambiar estos aspectos existen métodos en el programa que facilitan y enlazan diferentes características.

Con respecto a esta simulación se usará el método *Y+* (*The Y+ Functionality*), para esto pide especificar la altura *Y+* y el *Número de Reynolds*. El procedimiento para implementar este método es el siguiente, este procedimiento se muestra en la figura 38:

1. En el espacio de trabajo se ira a **Mesh Data**, doble clic.
2. En la parte inferior se abrirán los detalles de *Mesh Data*.
3. En la pestaña **Mesh Size**, se configura **Boundary Layer Refinement Control > Near Wall Element Size Specification > Method** se escoge **y+**.
4. Se introduce el Numero de Reynolds en 200000; en el ANEXO A 1 se presenta el procedimiento con el que se obtuvo y escogió dicho valor.
5. Ahora se debe cambiar el control de refinamiento de capa limite; **Boundary Layer Refinement Control >** como método se elige **First Element Offset**.

6. Se ha habilitado el campo **Offset Y+**, establezca el valor de **Offset Y+** como 30, se introduce este valor ya que es el recomendado para el modelo de turbulencia SST.
7. Clic en **Apply**.

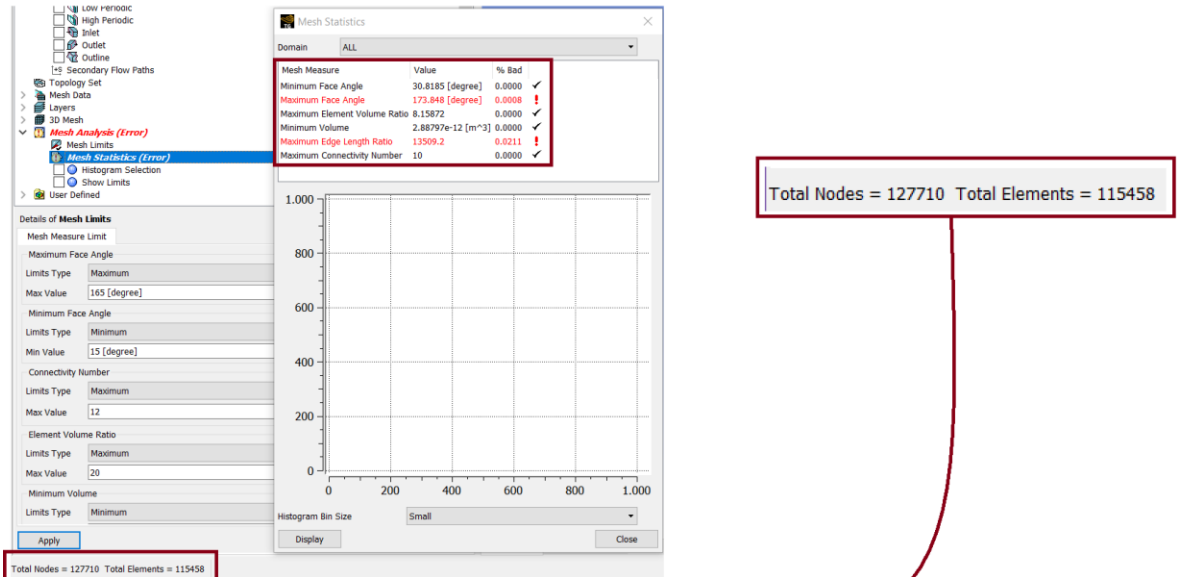
Figura 38. Función Y+



Fuente: Elaboración propia.

Al aplicar este método de refinamiento, los errores en la malla disminuyen y así mismo cambia el número de elementos, aplique de nuevo el procedimiento del numeral 4.2.3.4. *Análisis de la malla*, y compare la información de la figura 39 con la de la figura 37.

Figura 39. Segundo análisis de malla

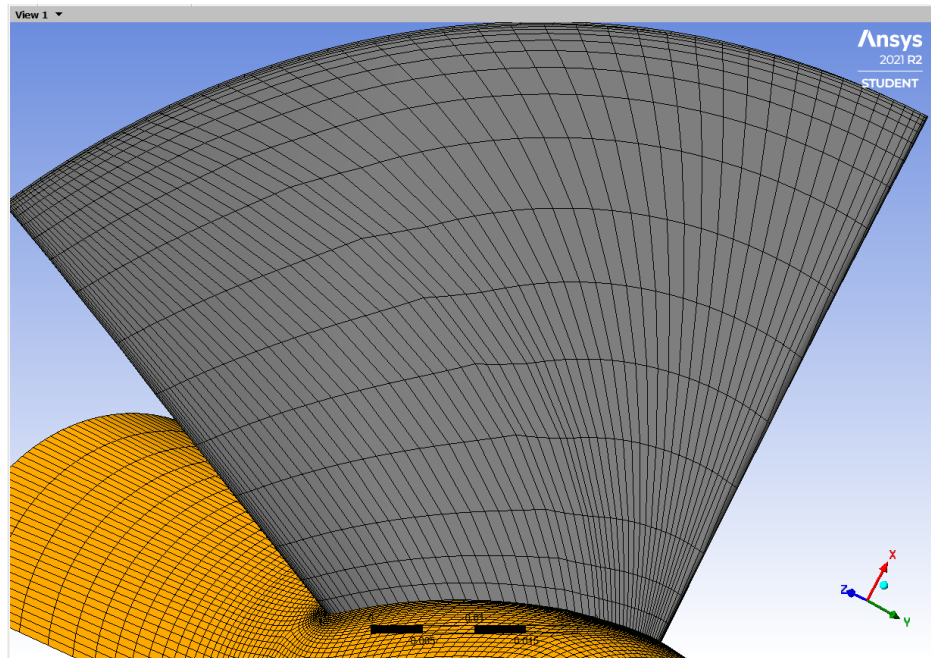


Fuente: Elaboración propia.

En las nuevas estadísticas obtenidas luego de refinar la malla por medio de Y+, se puede ver la disminución en el número de elementos y también una notoria disminución en los porcentajes de error para los límites de la malla. Ahora se analiza el comportamiento de la malla a lo largo de la geometría del rotor; (en caso de no estar activa la visualización de la malla repita el procedimiento del numeral 4.2.3.3. *Visualización de la malla*).

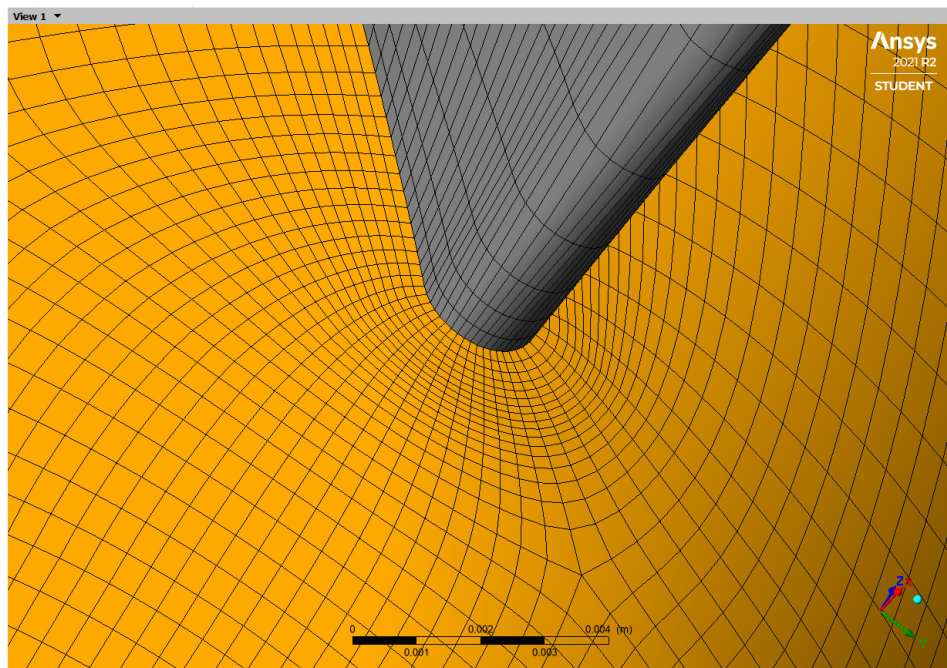
Se plantea ver el mallado en 3 partes importantes: el alabe, figura 40; el pasaje con respecto al borde de ataque, figura 41 y el pasaje con respecto al borde de fuga, figura 42.

Figura 40. Mallado del álabe del rotor



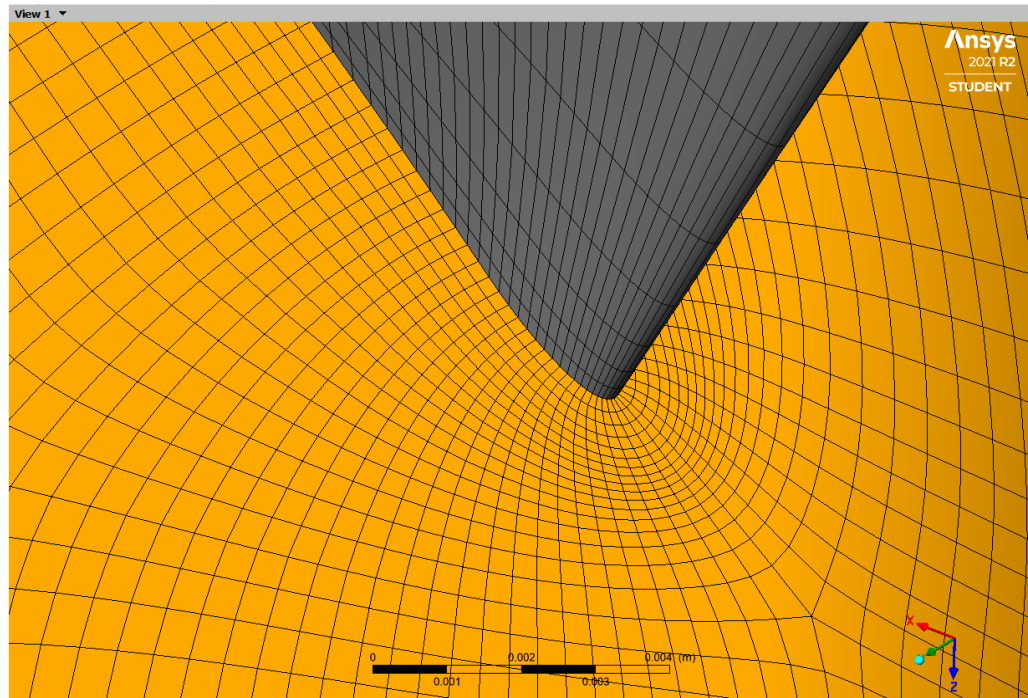
Fuente: Elaboración propia.

Figura 41. Mallado del pasaje cerca al borde de ataque



Fuente: Elaboración propia.

Figura 42. Mallado del pasaje cerca al borde de fuga



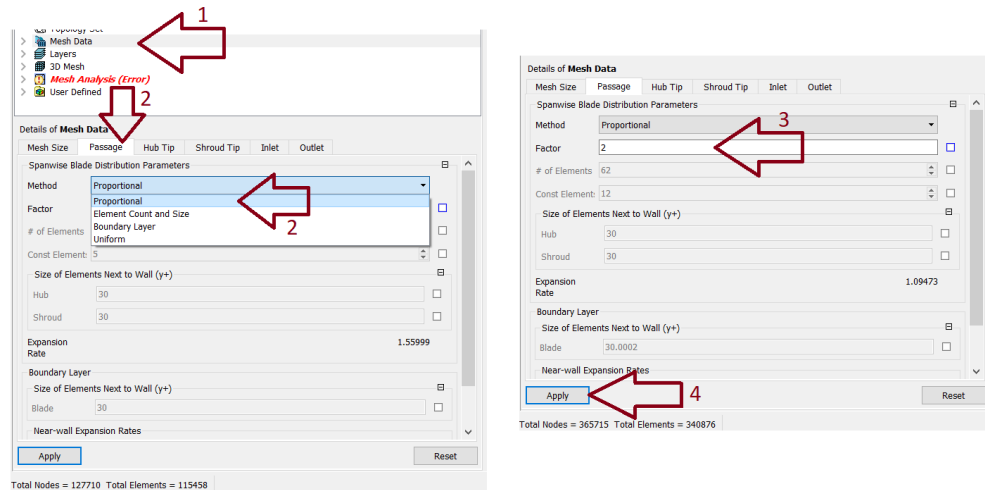
Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta las figuras expuestas anteriormente se ve que los bordes de fuga y ataque cuentan con un mallado más refinado para la simulación, pero el mallado con respecto al álabe presenta cierta interferencia, pues el tamaño de los elementos con respecto a la altura del álabe es demasiado grande; los elementos presentan una altura un poco exagerada lo que puede producir datos erróneos en la simulación o resultados.

Este tamaño de los elementos no representa un error para la malla, sin embargo, se opta por dar una corrección para evitar porcentajes de error altos en los resultados; para resolver este error se debe de disminuir la altura o la distribución de los elementos en el álabe, para esto se refina de nuevo la malla siguiendo este procedimiento, esto se expone en la figura 43:

1. Abrir **Mesh Data**.
2. Diríjase a la pestaña Pasaje, y ahora configure el **Spanwise Blade Distribution Parameters** con el método *Proportional*.
3. Introduzca un factor de 2.
Nota: tenga en cuenta que el número de elementos aumentará.
4. Clic **Apply**

Figura 43. Configuración del pasaje



Fuente: Elaboración propia.

Importante: Cada que se realiza un nuevo cambio en la configuración de la malla es aconsejable ver cómo se comporta la calidad de la malla, se aconseja ver las estadísticas de la malla y también ver visualmente la malla. Usando el procedimiento del numeral 4.2.3.4. *Análisis de la malla*; se hará una comparación entre los valores obtenidos; vea la figura 44.

Figura 44. Comparación de mallas

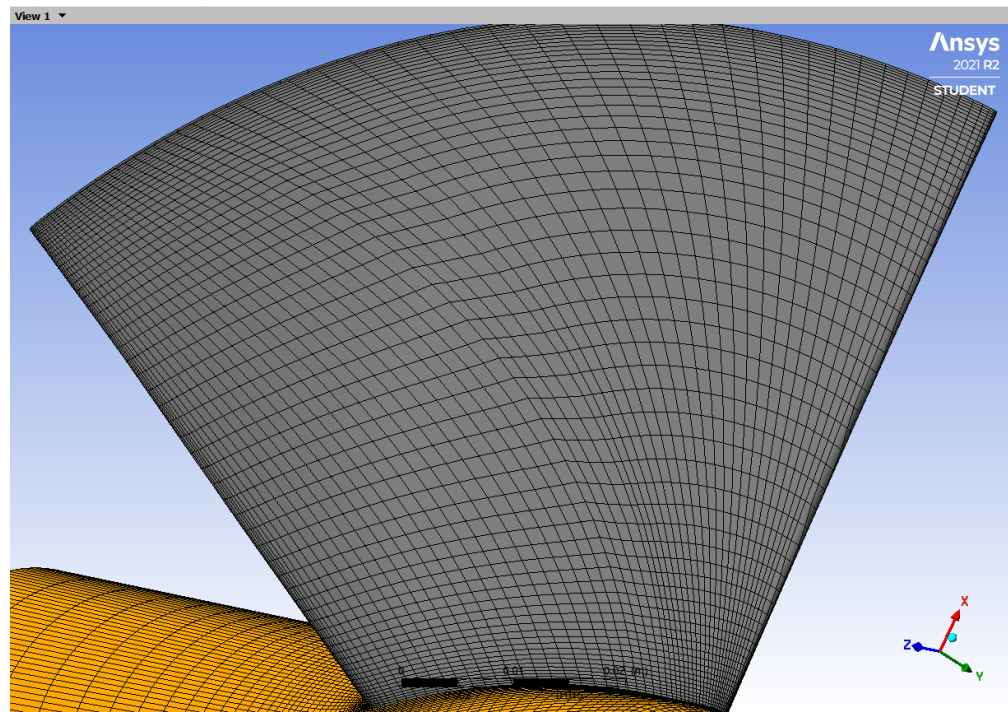
1ra malla				2da malla			
Mesh Statistics				Mesh Statistics			
Domain		ALL		Domain		ALL	
Mesh Measure	Value	% Bad		Mesh Measure	Value	% Bad	
Minimum Face Angle	13.9181 [degree]	0.0003	!	Minimum Face Angle	30.8185 [degree]	0.0000	✓
Maximum Face Angle	177.447 [degree]	0.0005	!	Maximum Face Angle	173.848 [degree]	0.0008	!
Maximum Element Volume Ratio	10.6031	0.0000	✓	Maximum Element Volume Ratio	8.15872	0.0000	✓
Minimum Volume	4.43702e-14 [m^3]	0.0000	✓	Minimum Volume	2.88797e-12 [m^3]	0.0000	✓
Maximum Edge Length Ratio	13509.2	0.0291	!	Maximum Edge Length Ratio	13509.2	0.0211	!
Maximum Connectivity Number	10	0.0000	✓	Maximum Connectivity Number	10	0.0000	✓
Total Nodes = 183950 Total Elements = 169200				Total Nodes = 127710 Total Elements = 115458			

3ra malla			
Mesh Statistics			
Domain		ALL	
Mesh Measure	Value	% Bad	
Minimum Face Angle	43.0911 [degree]	0.0000	✓
Maximum Face Angle	149.331 [degree]	0.0000	✓
Maximum Element Volume Ratio	3.13818	0.0000	✓
Minimum Volume	3.15579e-12 [m^3]	0.0000	✓
Maximum Edge Length Ratio	570339	0.0081	!
Maximum Connectivity Number	10	0.0000	✓
Total Nodes = 365715 Total Elements = 340876			

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 44 se pueden evidenciar diferentes cambios: disminución en el número de límites que venían presentando error al salir de los rangos aceptables; y aunque sigue existiendo un límite fuera del rango aceptable, el porcentaje de error se disminuye lo más posible. Además, al ver el mallado del álabe es notorio el cambio en el tamaño y cantidad de elementos, compare el mallado de la figura 45 con respecto a la figura 40.

Figura 45. Mallado alabe refinado



Fuente: Elaboración propia.

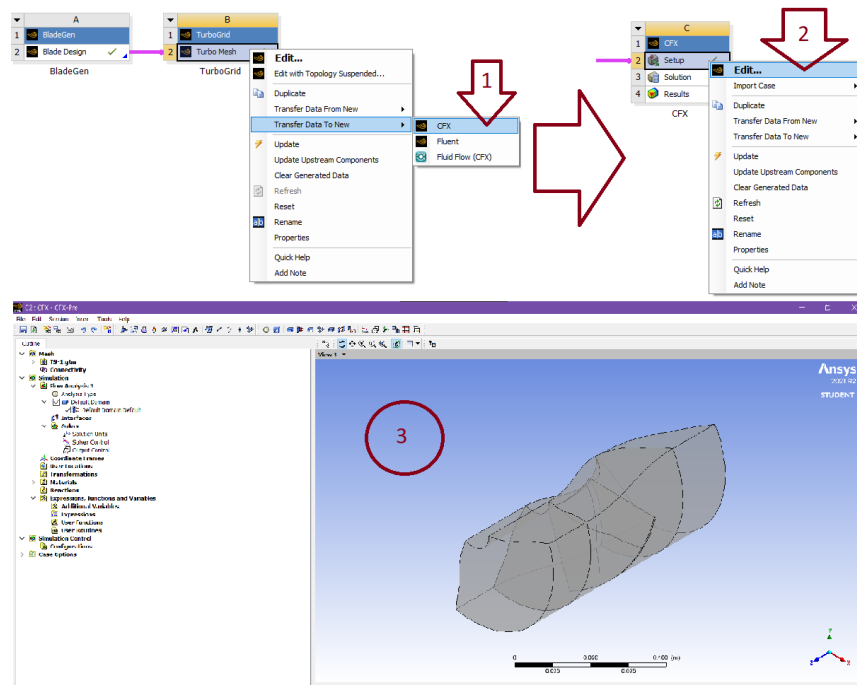
Con estos últimos pasos se podría dar finalizada la parte del mallado; la geometría y su mallado se llevarán al ambiente de preprocesamiento. Nota: es importante mencionar que si se requiere bajar aún más los porcentajes de error de las estadísticas de la calidad de la malla existen aún más métodos para su refinamiento, sin embargo, en este caso la malla tiene una calidad para seguir adelante con el desarrollo del ejercicio.

4.2.4. Discretizar el ambiente

Una vez terminado el mallado se puede ir al siguiente paso; se llevará la geometría y el mallado al programa Ansys CFX. A continuación, se muestra el paso a paso para la apertura de los archivos en el nuevo programa, figura 46:

1. En el *Workbench* en el cuadro de *TurboGrid*; Clic derecho en ***TurboMesh*** > ***Transfer Data To New*** > ***CFX***.
2. Se abre un nuevo bloque que se enlaza al bloque donde está el mallado; Clic derecho en *Setup*.
3. Se abre el entorno de CFX-Pre.

Figura 46. Apertura de CFX-Pre



Fuente: Elaboración propia.

El ambiente de CFX-Pre es una herramienta fácil de manejar; pues en el espacio de trabajo (zona izquierda), está organizado paso a paso el procedimiento y datos que requiere la simulación. En este programa se realiza la última configuración de datos para la simulación; aunque el programa en sí ya es sencillo de manejar existe una herramienta que hace al programa didáctico. Para configurar la turbina guíese de la siguiente metodología, además observe este paso a paso en la figura 47:

1. Clic en *Tools* > *Turbo Mode ...*
2. Al abrir este modo del programa desaparece el espacio de trabajo; en su lugar aparece un nuevo espacio, pero con pocas opciones y con una

metodología paso tras paso; la primera ventana de configuraciones es la de configuraciones básicas.

3. El componente es el rotor de una turbina axial entonces se configura en **Machine Type** > *Axial Turbine*.
4. En **Coordinate Frame** solo existe una opción: *Coord 0*.
5. Con respecto al eje en el que gira el componente: en **Rotation Axis** > *Z*.
6. El análisis para este ejercicio va a ser estacionario y no transitorio entonces la configuración para el tipo de análisis será: **Analysis Type** > **Type** > *Steady State*.
7. Clic **Next**.
8. Siguiente paso: Definición de componentes.
9. Doble clic en el componente llamado *R1*.
10. Como el componente es un elemento que va a estar sometido a una rotación: **Componente Type** > **Type** > *Rotating*.
11. Luego se ingresa el valor al que estaría girando el componente: en la casilla **Value** se ingresa un valor de 1962.023 revoluciones por minuto, en el anexo A3 se explica por qué este valor.
12. Clic **Next**.
13. Siguiente paso: Definición de la física del proyecto; en este paso se configurarán las características del ambiente en el que se encuentra inmerso el componente.
14. La turbina se encuentra expuesta a un flujo de aire estándar, por lo tanto, se escoge aire a 25 grados: **Fluid** > *Air at 25 C*.
15. Se supone una diferencia de presiones en la entrada y salida de la turbina: **Reference Pressure** > 0 atm.
16. Como no es una turbina que aproveche el calor del fluido para moverse entonces la transferencia de calor es nula: **Heat Transfer** > *None*.

17. Para el modelo de turbulencia se usa el modelo de esfuerzos cortantes: en ***Turbulence*** > *shear stress transport*.
18. Ahora para la configuración del fluido en la entrada y en la salida de la turbina se escoge un flujo de masa en la entrada y una presión estática en la salida, seleccionar ***Mass Flow Inlet P-Static Outlet***.
19. Con el fin de disminuir esfuerzos computacionales el programa trabaja desde un alabe la mayoría de procesos; desde el diseño en BladeGen el programa solo diseña la sección de un alabe y luego simplemente multiplica por la cantidad de álabes escogidos cuando necesita todo el componente, debido a esto el programa presenta varias opciones para ingresar el flujo de entrada: para solo el pasaje (para un alabe), para la máquina en general o para el componente. Con respecto a lo anterior en ***Mass Flow*** > *Per Machine*.
20. En ***Mass Flow Rate*** se ingresa el valor de flujo de 0.10026kg/s. En el anexo A2 se muestra cómo se obtiene este valor.
21. Para ingresar la dirección en la que entra este flujo se tienen tres opciones: *Normal to Boundary* (normal al límite), por coordenadas cartesianas o por coordenadas polares. Para dejar claro que el fluido entra de frente a la turbina (axial al eje en el que gira), se escoge la opción *Cartesian Components*.
22. Y para configurar estas coordenadas se requiere la dirección, como el rotor estará girando alrededor del eje Z; en ***Inflow Direction (x, y, z)*** > x=0, y=0, z=1.
23. Y como último la presión en la salida sería de 1 atm.
24. Clic ***Next***.
25. Siguiente paso: Definición de la interfaz; este paso y el siguiente en su mayoría no necesitan intervención.
26. Al estar seccionada en el número de álabes, el programa simulará teniendo en cuenta que dichas secciones tienen lados que visualmente están cortados, pero en realidad siguen siendo un solo componente; en esta parte nos muestra la configuración que automáticamente hace el programa reconociendo las paredes que son periódicas con respecto al resto de turbina.

27. Clic **Next**.

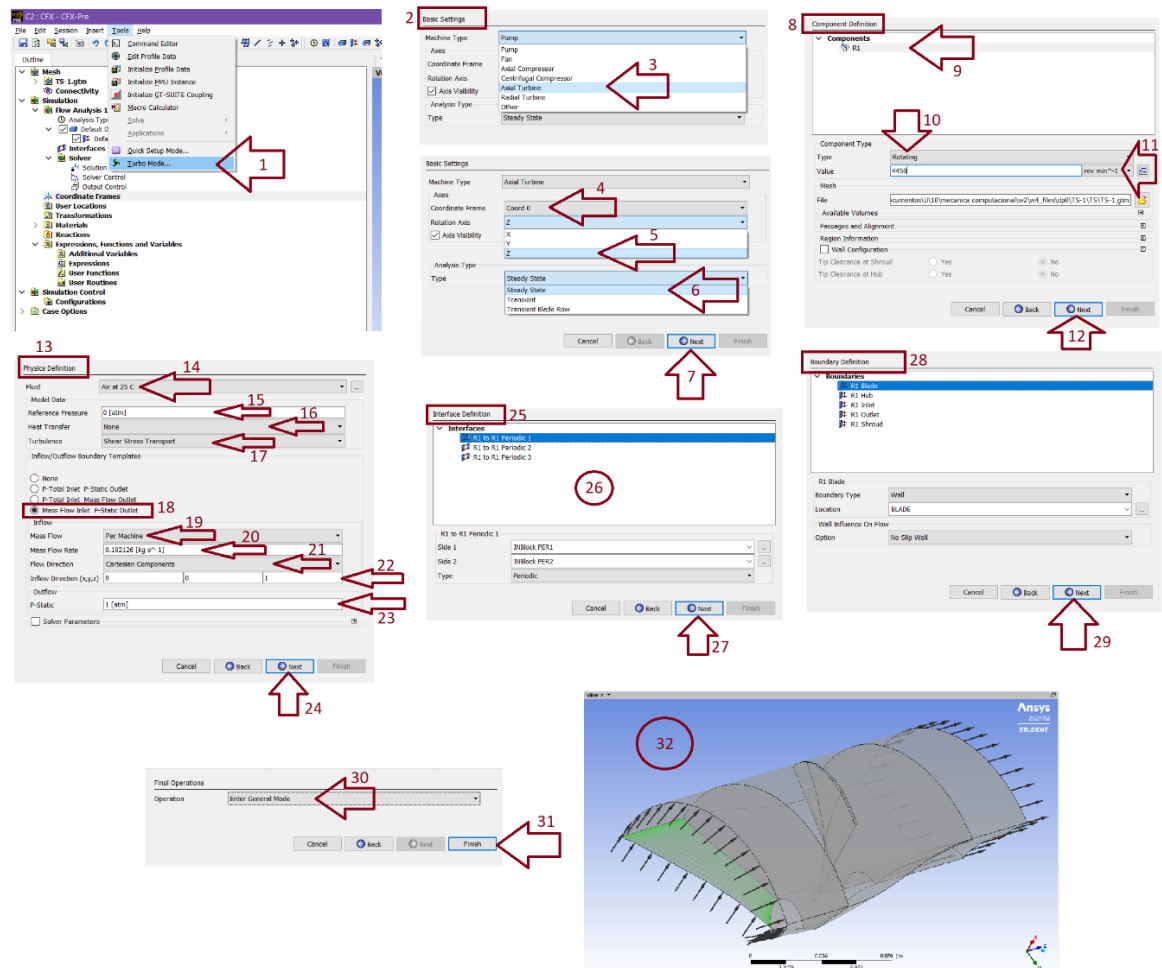
28. Siguiente paso: Definición del límite; en esta parte nos muestra todas las superficies y su configuración.

29. Clic **Next**.

30. Como último paso queda enviar esta configuración al modo general; automáticamente el modo turbo nos da esta opción.

31. Clic **Finish**.

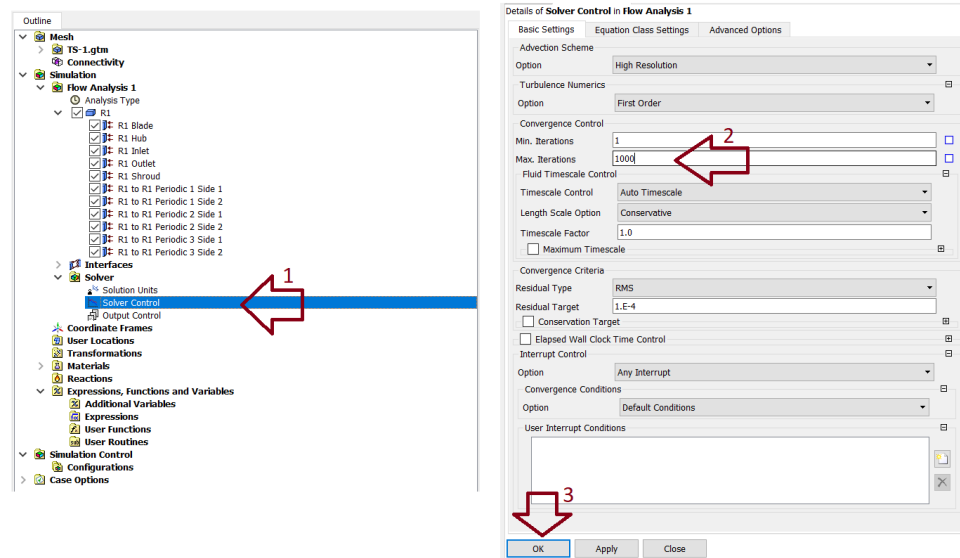
Figura 47. Modo Turbo



Fuente Elaboración propia.

Luego de salir del modo turbo el último paso es configurar el número de iteraciones para la solución, en el espacio de trabajo se busca **Solver Control** y se da doble clic. Al abrirse la ventana de los detalles de la solución se cambia el número máximo de iteraciones de 100 a 1000. Con respecto al criterio de convergencia se decide dejar en 1e-4, esto se puede ver en a figura 48.

Figura 48. Numero de iteraciones



Fuente: Elaboración propia.

Con esto se puede decir que se llega al final de la configuración del caso para su análisis. Se puede cerrar el CFX-Pre para ser llevado al ambiente de solución. Es importante mencionar que los pasos anteriormente mostrados son para simular la turbina en aire como fluido de trabajo a una velocidad de 5 metros por segundo.

4.2.5. Resolver

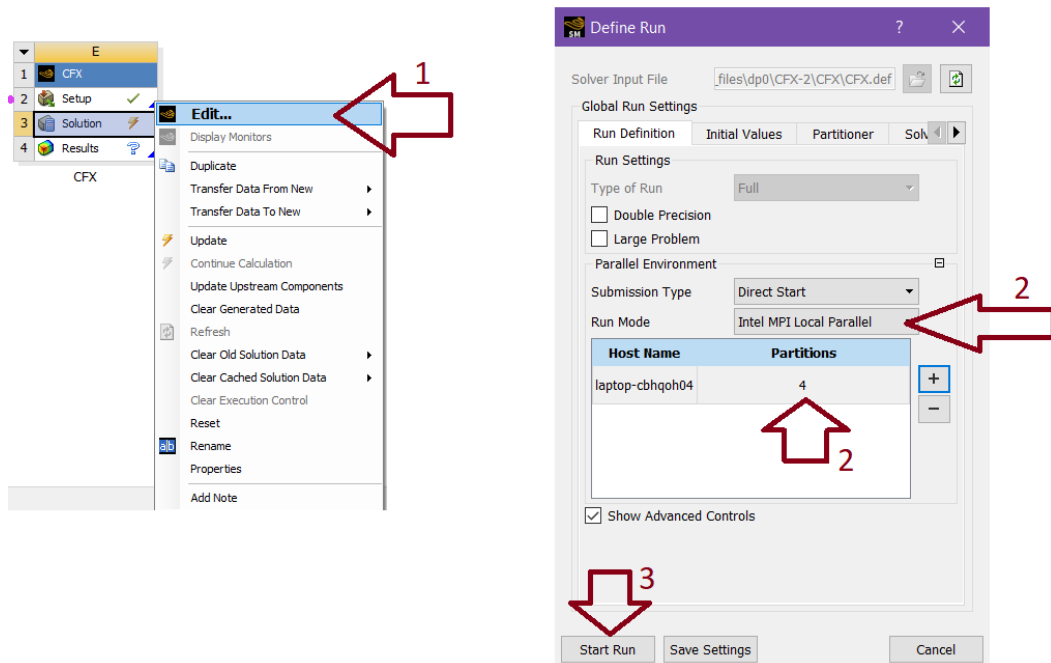
Una vez cerrado el CFX-Pre se procede a correr la solución del caso, el siguiente procedimiento se plasma en la figura 49:

1. En el Workbench se debe ir al bloque de CFX y en la celda **Solution** se dará doble clic y luego **Edit**.
2. Se abre el CFX-Solver Manager, en esta plataforma se configurará la solución dependiendo del tipo de procesador y cantidad de núcleos con los

que el computador disponga, para el caso la solución se configurará como se ve en la imagen.

3. Clic en **Start Run**.

Figura 49. Solucionador



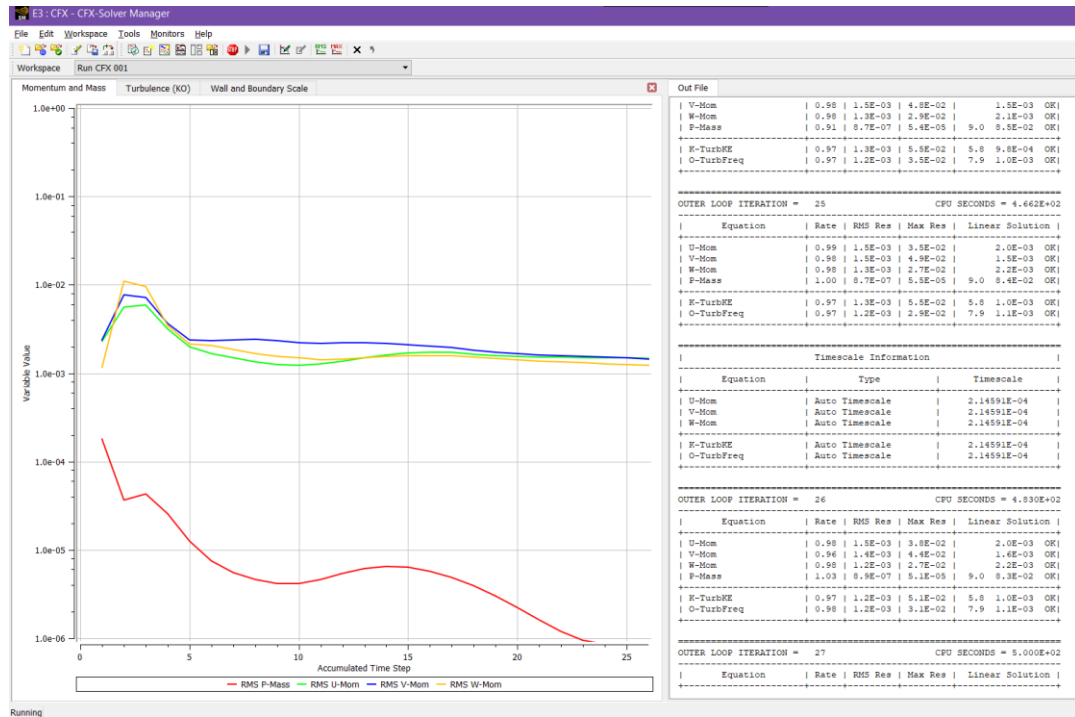
Fuente: Elaboración propia.

Una vez iniciada la solución se empiezan a mostrar diferentes gráficas como Momento y masa o la gráfica de turbulencia (KO). En estas gráficas se puede ver el valor de la variable con respecto al número de iteraciones. La solución estará completa en el momento que se logre la convergencia; esto sucederá cuando el objetivo residual de los criterios de convergencia baje del valor puesto en la configuración del CFX-Pre el cual es $1e-4$. Otra manera de que la solución termine es completando el número de iteraciones configurado; cabe aclarar que por el hecho que complete las iteraciones no significa que el caso tenga convergencia, pues puede llegar el caso en el que los gráficos se estabilice quedando fuera de la convergencia. A continuación, se presenta los siguientes casos:

- Caso sin convergencia, figura 50.
- Cuando la solución termina haya logrado la convergencia o no, muestra un aviso con el de la figura 51.

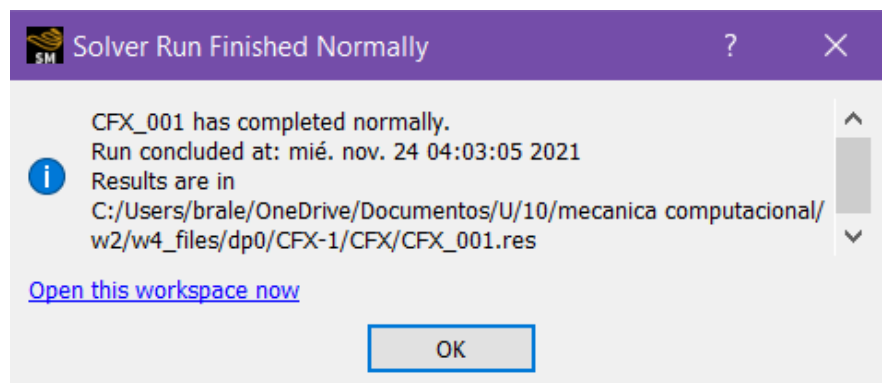
- La figura 52 es el ejemplo de una gráfica para una solución que está cerca a la convergencia.

Figura 50. Caso sin convergencia



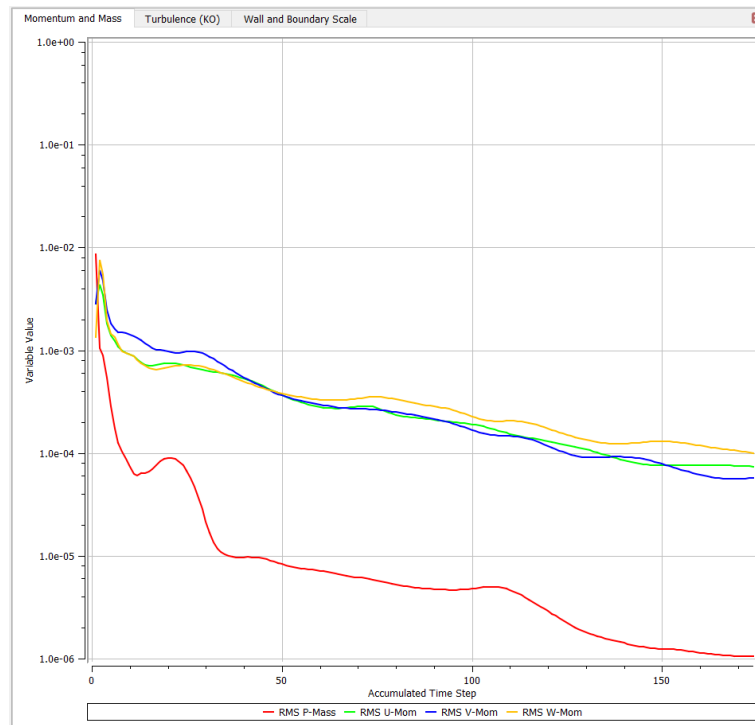
Fuente: Elaboración propia.

Figura 51. Solución terminada



Fuente: Elaboración propia.

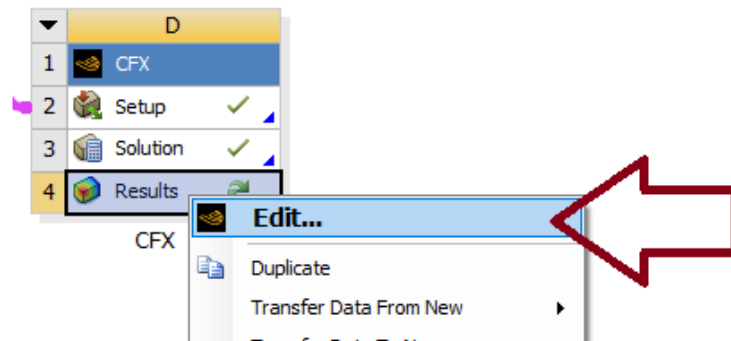
Figura 52. Caso con convergencia



Fuente: Elaboración propia.

Ahora para poder visualizar los resultados de la simulación se va a cerrar el CFX-Solver y se va a ir al Workbench, luego en el mismo bloque de CFX se abrirán los resultados dando clic derecho en la celda **Results** > **Edit**, como se puede ver en la figura 53.

Figura 53. Abrir los resultados

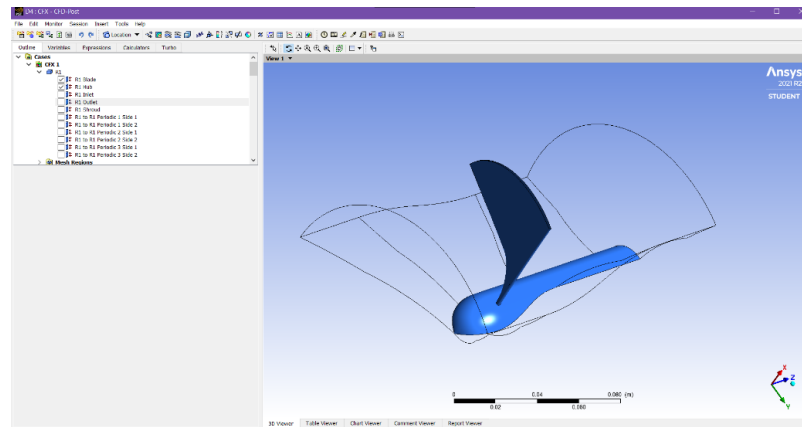


Fuente: Elaboración propia.

4.2.5.1. Resultados

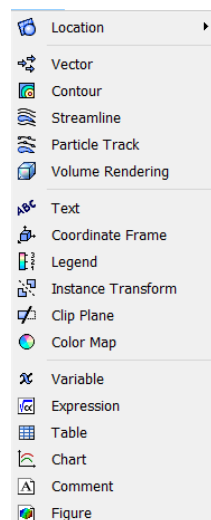
En la figura 54 se muestra el ambiente de CFX-Post, cuenta con varias herramientas para que permitan la visualización del comportamiento de variables a través de la turbina; en el programa se pueden visualizar contornos de presión en el alabe, líneas y vectores de velocidad de viento, entre otras; en a figura 55 se exponen dichas herramientas.

Figura 54. CFX-Post



Fuente: Elaboración propia.

Figura 55. Herramientas de CFX



Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, así como en el CFX-Pre, el CFX-Post cuenta con una herramienta similar al *Turbo Mode*; en este programa aparece los reportes los cuales consolidan los datos más importantes en un artículo, en este se presentan tablas de datos como: datos de entrada de la configuración de todo el caso, componentes de velocidad, eficiencia, graficas de vectores de velocidad, contornos de presión, entre otras.

Teniendo en cuenta que las condiciones ambientales no son constantes, se realizaron varias simulaciones a diferentes velocidades tanto para el agua como para el aire. Para una visualización más completa de toda la simulación se hace usa la herramienta *Report*. A continuación, se muestra la información más importante entregada sobre la simulación de la turbina sometida a aire a 5m/s, en las primeras tablas, el programa entrega la información con la que fue configurado el caso, en la figura 56 se muestra un ejemplo de esto.

Figura 56. Datos de entrada

Dominio	Límites	
R1	Límite: entrada R1	
	Escribe	ENTRADA
	Ubicación	ENTRADA de bloque
	Ajustes	
	Dirección del flujo	Condición normal a límite
	Régimen de flujo	Subsónico
	Masa y cantidad de movimiento	Tasa de flujo másico
	Tasa de flujo másico	1.0026e-1 [kg·s ⁻¹]
	Área de caudal másico	Total para todos los sectores
	Turbulencia	Intensidad media y relación de viscosidad de Eddy

Dominio - R1	
Escribe	Líquido
Ubicación	Entrada, salida, pasaje principal
Materiales	
Aire a 25 C	
Definición de fluido	Biblioteca de materiales
Morfología	Fluido Continuo
Ajustes	
modelo de flotabilidad	no flotante
Movimiento de dominio	Giratorio
Modelo de rotación alternativa	cierto
Velocidad angular	1.9620e+3 [revoluciones mín ⁻¹]
Definición del eje	Eje de coordenadas
Eje de rotación	Coordenada 0.3
Presión de referencia	1.0000e+0 [cajero automático]
Modelo de turbulencia	acero inoxidable
Funciones de pared turbulenta	Automático

Fuente: Elaboración propia basado de Ansys CFX.

Teniendo esto claro en la tabla 4 se presentan los datos de rendimiento obtenidos sobre la turbina en aire a 5m/s y en la tabla 5 un resumen de datos.

Tabla 4. Resultados de rendimiento en aire a 5m/s

Velocidad de rotación	205,4630	[radian/s]
Diámetro de referencia	0,1034	[metro]
Caudal volumétrico	0,0846	[m³/s]
Cabeza (LE-TE)	0,7198	[metro]
Cabeza (ENTRADA-SALIDA)	0,9137	[metro]
Coefficiente de flujo	0,3727	
Coefficiente de carga (IN-OUT)	0,0199	
Potencia en el eje	0,2591	[W]
Coefficiente de potencia	0,0021	
Eficiencia Total (ENTRADA-SALIDA) %	28,8441	

Fuente: elaboración propia basado de Ansys CFX.

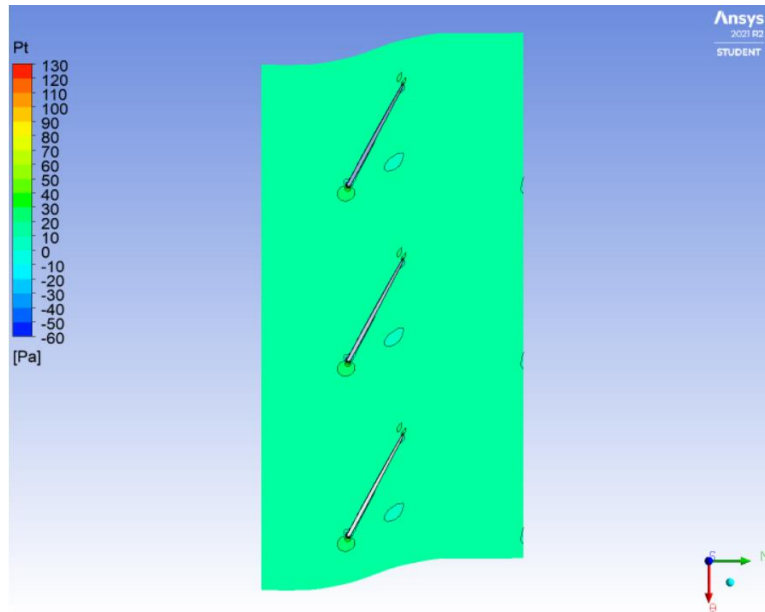
Tabla 5. Resumen de datos para aire a 5m/s

Cantidad	Entrada	Unidades
Densidad	1,1850	[kg·m³]
Pestatica	101343,0000	[Pa]
Ptotal	101354,0000	[Pa]
Ptotal (rot)	101353,0000	[Pa]
U	10,2741	[m/s]
Cm	4,1761	[m/s]
Cu	0,0131	[m/s]
C	4,1811	[m/s]
Parámetro de distorsión	1,0052	
Ángulo de flujo: Alfa	0,1717	[grados]
Wu	-10,2610	[m/s]
W	11,1962	[m/s]
Ángulo de flujo: Beta	-66,5631	[grados]

Fuente: elaboración propia basado de Ansys CFX.

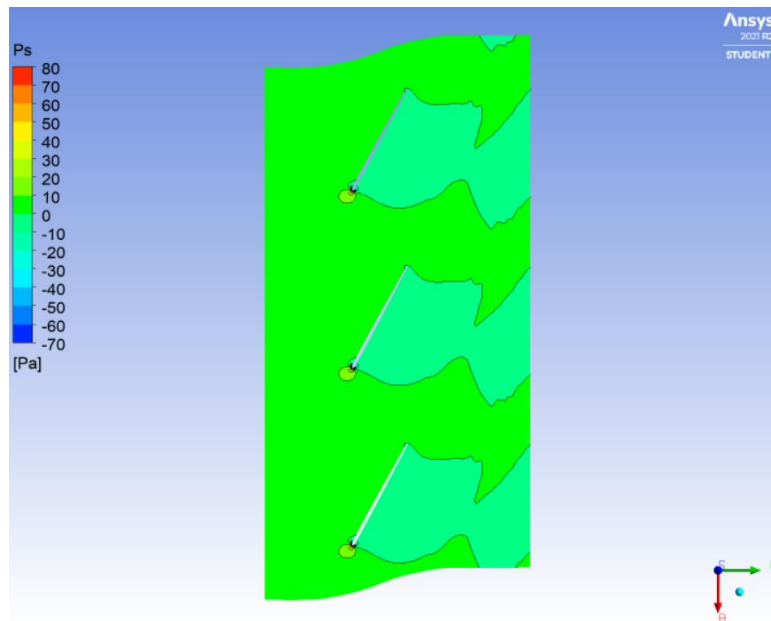
Para visualizar el comportamiento del fluido a través de rotor se usan las imágenes aportadas por el programa, a continuación, se muestran de las gráficas más importantes: contornos de presión total al 50% de amplitud, figura 57; contorno de presión estática al 50% de amplitud, figura 58; vectores de velocidad al 20, 50 y 80 por ciento de la amplitud, figura 59 y la carga del alabe al 50%, figura 60.

Figura 57. Pt al 50%



Fuente: Ansys CFX.

Figura 58. Ps al 50%

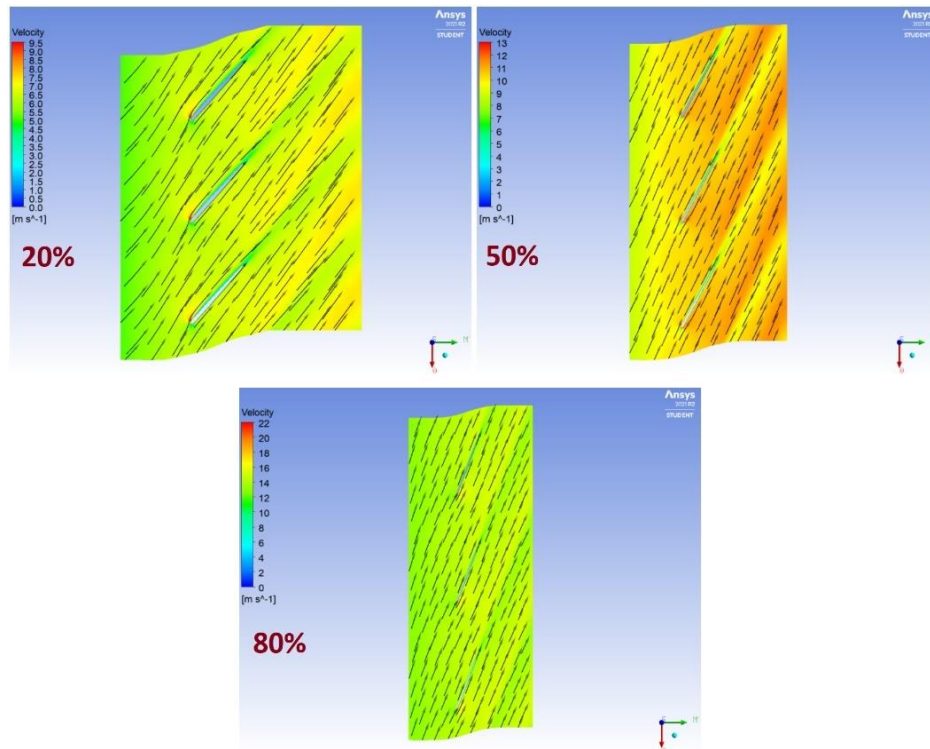


Fuente: Ansys CFX.

Algo que se debe mencionar sobre los resultados obtenidos de la simulación es que en las figuras 57 y 58, se aprecia que el borde de ataque presenta una alta presión,

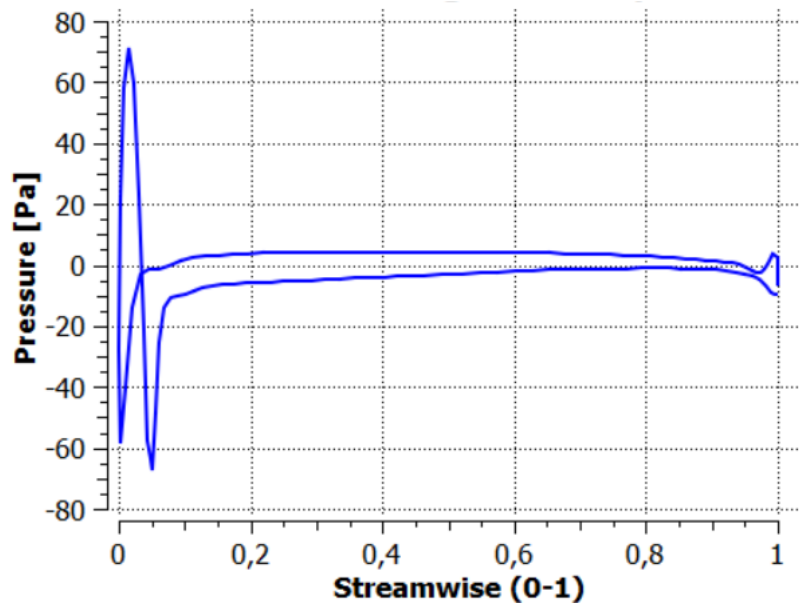
característica del choque del fluido en esta zona, lo que es corroborado por la distribución de presiones en el alabe de la figura 60. En la figura 59 se aprecia a través de los vectores de velocidad, que el flujo es direccionado por los alabes y que esta velocidad aumenta desde la raíz hasta la punta del alabe.

Figura 59. Vectores de velocidad



Fuente: Elaboración propia basado en Ansys CFX.

Figura 60. Carga del alabe al 50%



Fuente: Ansys CFX.

Con esto se podría acabar la parte computacional del proyecto, cabe aclarar nuevamente que estos son los resultados para la turbina en aire con una velocidad de 5m/s; para simular y obtener resultados con respecto a las otras velocidades (10, 15 y 20 m/s) y al otro fluido de trabajo (agua); se debe de repetir los pasos desde el numeral 4.2.4. *Discretizar el ambiente*, teniendo en cuenta que cada simulación tendrá una configuración diferente dependiendo los valores obtenidos en los cálculos de los anexos A2 y A3, sin embargo, en la tabla 6 se organizan los datos obtenidos en las simulaciones para agua y aire a diferentes velocidades.

Tabla 6. Diferentes resultados

	aire 5m/s	aire 10m/s	aire 15m/s	agua 5m/s	agua 10m/s	agua 15m/s	
Velocidad de rotación	205,463	410,925	616,388	205,463	410,925	616,388	[rad/s]
Diámetro de referencia	0,103	0,103	0,103	0,103	0,103	0,103	[m]
Caudal volumétrico	0,084	0,169	0,253	0,084	0,169	0,255	[m³/s]
Cabeza (LE-TE)	0,719	2,715	5,896	0,597	2,304	5,260	[m]
Cabeza (ENTRADA-SALIDA)	0,913	3,528	7,698	0,784	3,031	6,901	[m]

Coeficiente de flujo	0,372	0,372	0,372	0,373	0,373	0,374	
Coeficiente de carga (IN-OUT)	0,019	0,019	0,018	0,017	0,016	0,016	
Potencia en el eje	0,259	1,522	4,030	17,135	447,865	2517,230	[W]
Coeficiente de potencia	0,002	0,001	0,001	0,0002	0,0005	0,0009	
Eficiencia Total (ENTRADA-SALIDA)	28,844	21,939	17,753	2,635	8,908	14,615	[%]

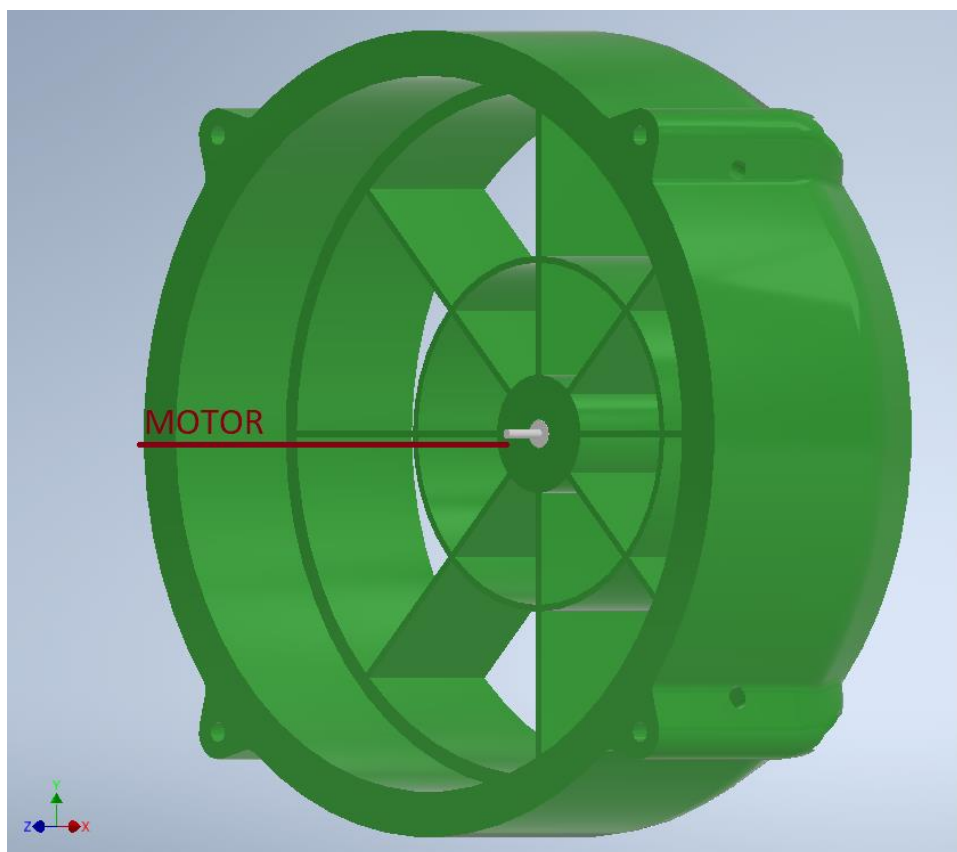
Fuente: Elaboración propia basado en Ansys CFX.

4.3. ETAPA 3: FABRICACIÓN

Una vez concluida la etapa del análisis se lleva a cabo la fabricación del rotor, para esto se debe diseñar un soporte o montaje que sostenga el rotor; por lo cual se tuvo en cuenta el diseño original del artefacto *WaterLily Turbine*, para tener una idea de cómo debía ser el mejor diseño para el montaje del rotor. Para la fabricación de este montaje se escoge la impresión 3D, por la complejidad de la geometría, por las características del material, pues es un material liviano y también por la relación velocidad-calidad de fabricación, además el costo de fabricación es aceptable con respecto a muchos otros factores; como precio-calidad, precio-tiempo, entre otras.

En la búsqueda del mejor montaje para la turbina se planteó una carcasa de 2 partes: una parte principal que sería la carcasa donde se apoya el motor que va acoplado al rotor y una tapa que cierre dicha carcasa. Estas dos piezas se pueden visualizar en las figuras 61 y 62.

Figura 61. Carcasa



Fuente: Elaboración propia.

Figura 62. Tapa de la carcasa



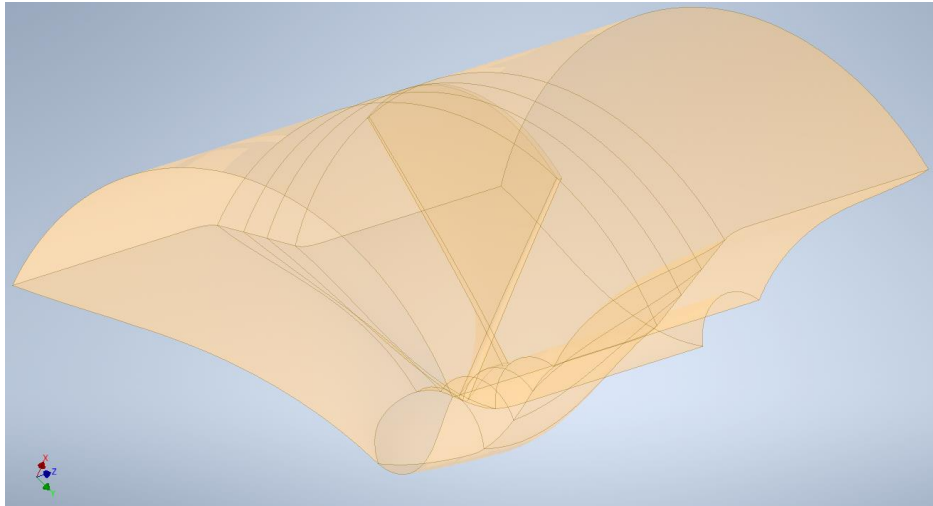
Fuente: Elaboración propia.

Nota: en el anexo A4 se muestra los planos de la carcasa, sin embargo, acá se explicarán los detalles más importantes que se tuvieron en cuenta para diseñar la carcasa que fueron: el rotor, que no existiera fricción, el motor y como sujetar la totalidad de la turbina.

4.3.1. Rotor

El primer paso para el diseño de la carcasa fue el modelamiento completo del rotor, pues el modelamiento hecho en BladeGen hace referencia al canal de fluido al que se somete el rotor y no al propio cuerpo del rotor. En la figura 63 se ve que el archivo proveniente de Ansys BladeGen, es un grupo de superficies y no se encuentra nada parecido al rotor de una turbomáquina.

Figura 63. Archivo exportado al software CAD Inventor®

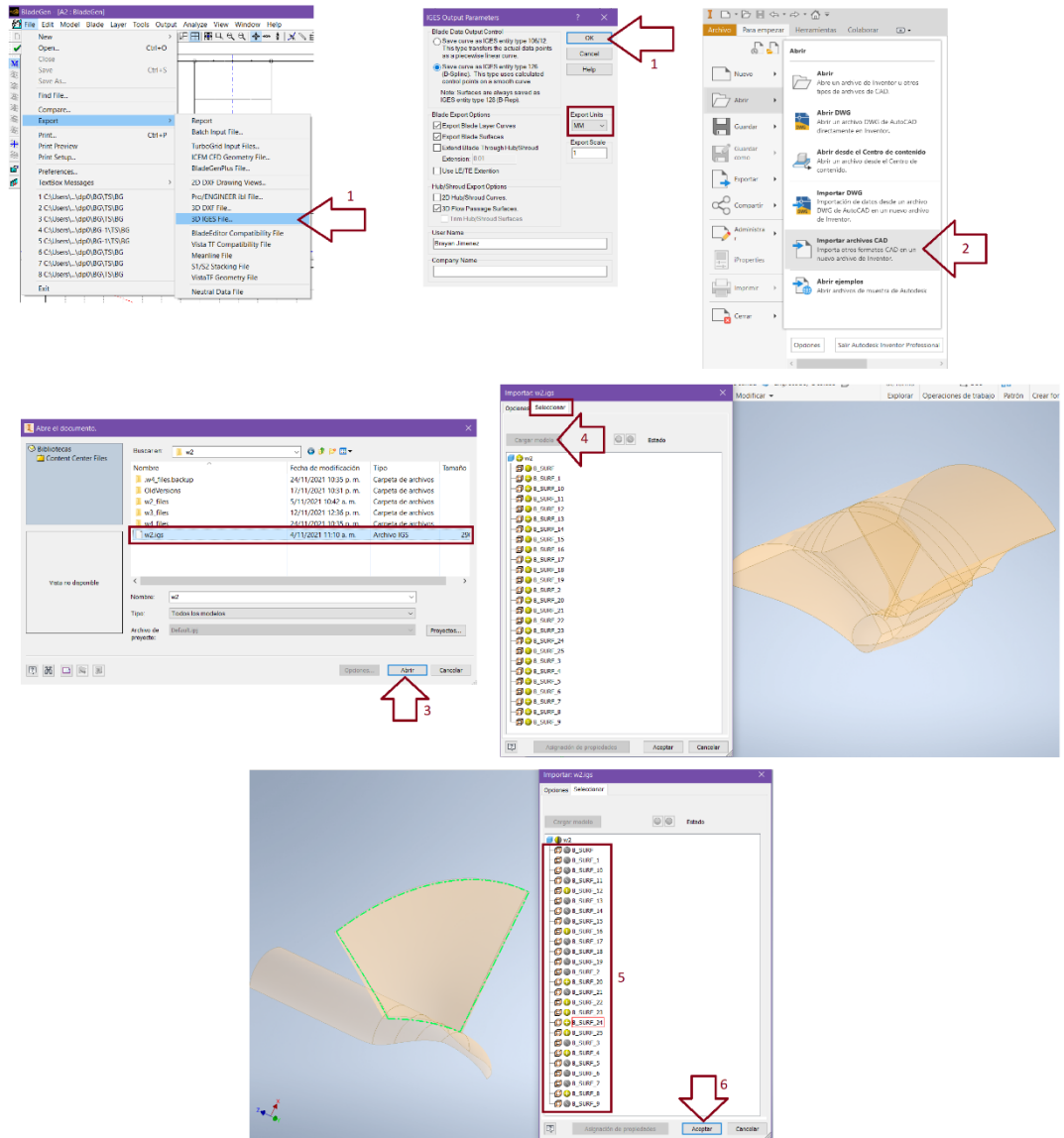


Fuente: Elaboración propia.

Para crear el sólido del rotor vea los siguientes pasos y la figura 64:

1. Se exporta la geometría, **File > Export > 3D IGES File...**, luego se selecciona donde se va a guardar el archivo. Es importante tener en cuenta las dimensiones en las que se modelo para no tener problemas posteriormente.
2. En el software CAD Inventor® se selecciona la opción de importar archivo CAD. **Archivo > Abrir > Importar archivos CAD.**
3. Se selecciona el archivo.
4. **Seleccionar > Cargar modelo.**
5. Se dejan activas solo las superficies que hacen referencia al alabe y al cubo.
6. Clic **Aceptar.**

Figura 64. Exportar la geometría



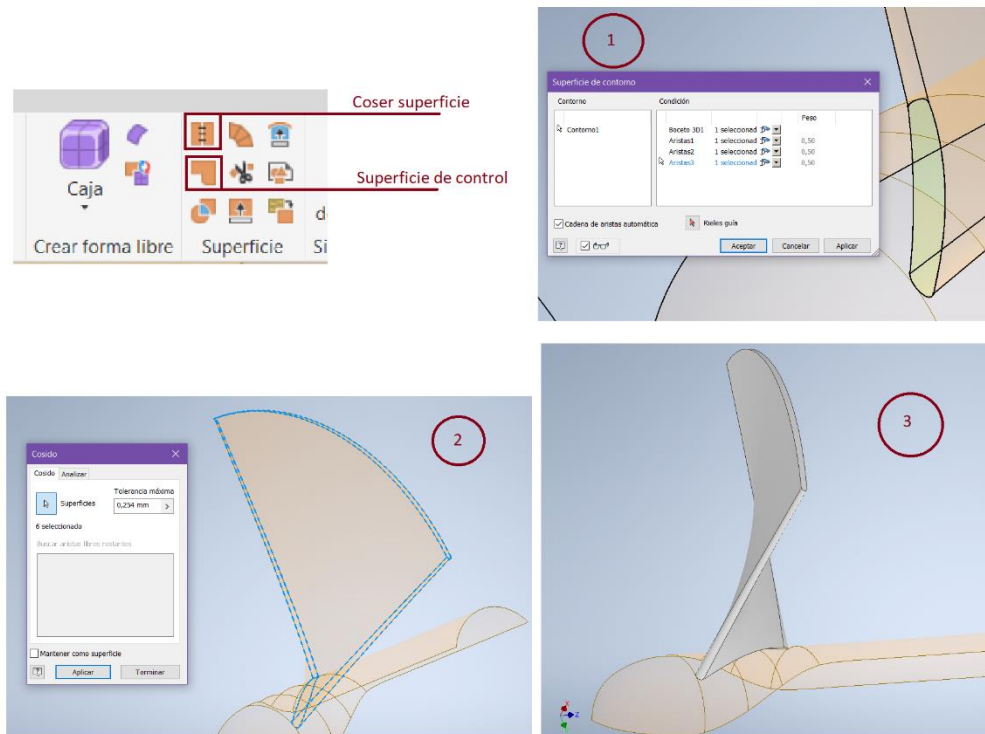
Fuente: Elaboración propia.

Una vez que la geometría del alabe y del cubo se encuentra en el programa se deben convertir estas superficies en objetos sólidos, el siguiente procedimiento se ilustra en la figura 65.

1. Se deben generar tapas para el alabe, en la parte de la punta y el cubo, esto se hace con la herramienta **superficie de contorno**.

2. Con la herramienta **coser superficie** se unen las superficies que forman el alabe.
3. Alabe en sólido.

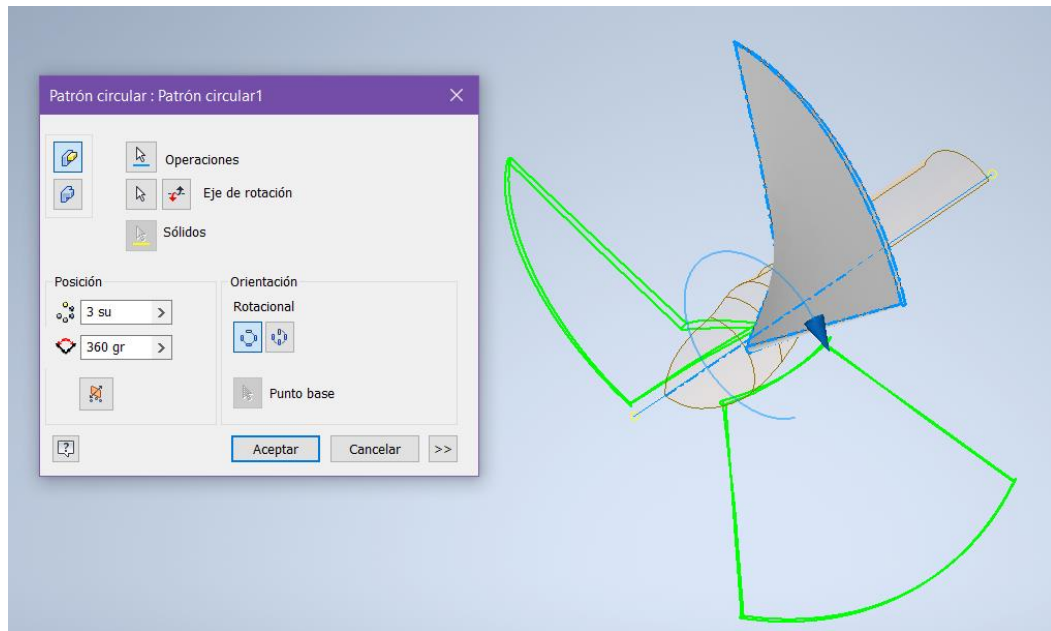
Figura 65. Alabe solido



Fuente: Elaboración propia.

Como BladeGen modela un solo pasaje; solo tenemos un alabe generado; para crear los 2 alabes faltantes se usa la herramienta de **patrón circular** alrededor del eje Z, vea la figura 66.

Figura 66. Patrón circular



Fuente: Elaboración propia.

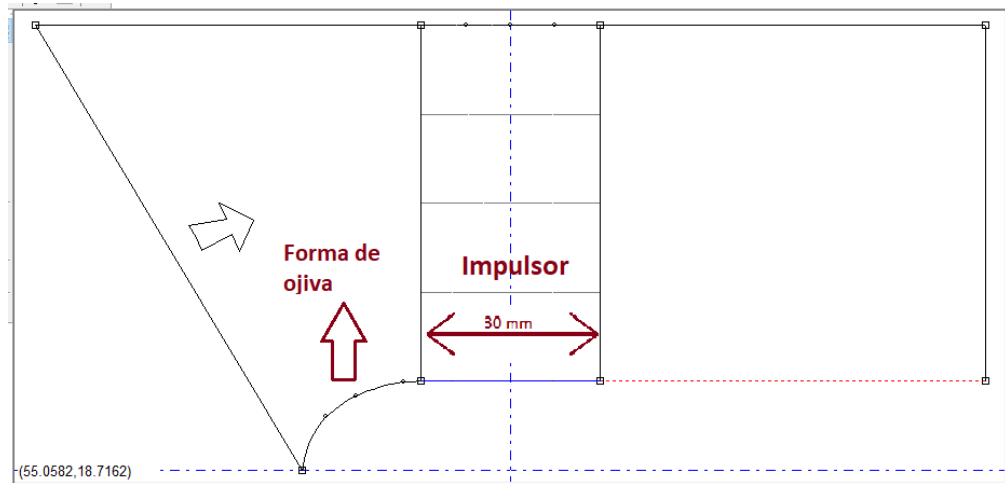
Ahora se debe volver solido el cubo de la turbina, para dicho procedimiento se tomó guía del módulo para la generación de geometrías de rotores para máquinas hidráulicas axiales por medio del programa inventor.²³ Tenga en cuenta que:

- Según las dimensiones del rotor (Tabla 3), el ancho del impulsor debe ser de 30 milímetros.
- El cubo del rotor debe tener la forma de la superficie exportada, (punta en forma de ojiva, figura 67).

Si el procedimiento fue exitoso el rotor se vería como en la figura 68.

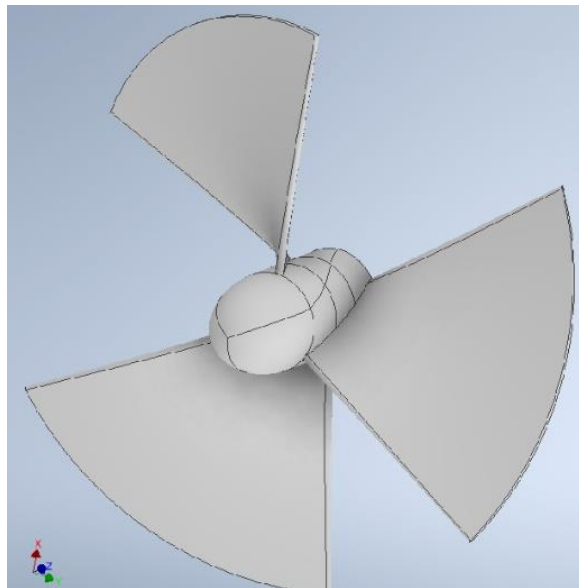
²³ AGUIRRE, Carlos. Módulo para la generación de geometrías de rotores para máquinas hidráulicas axiales por medio del programa inventor [en línea]. Universidad Santo Tomás, Facultad de ingeniería mecánica. 2021.

Figura 67. Parámetros del diseño



Fuente: Elaboración propia.

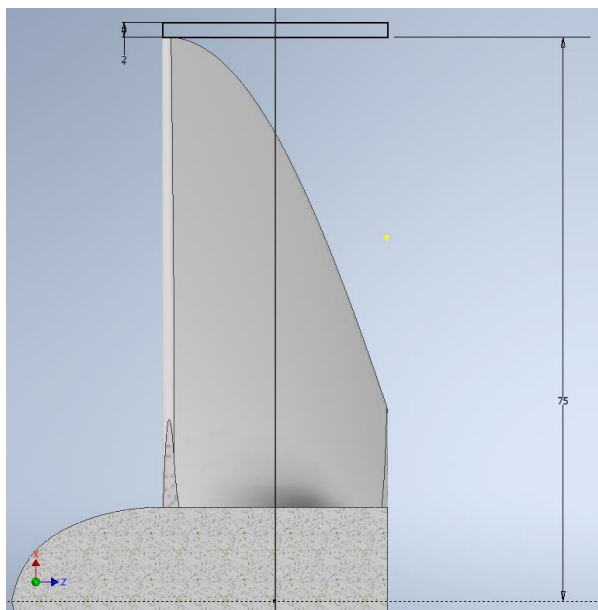
Figura 68. Cubo solido



Fuente: Elaboración propia.

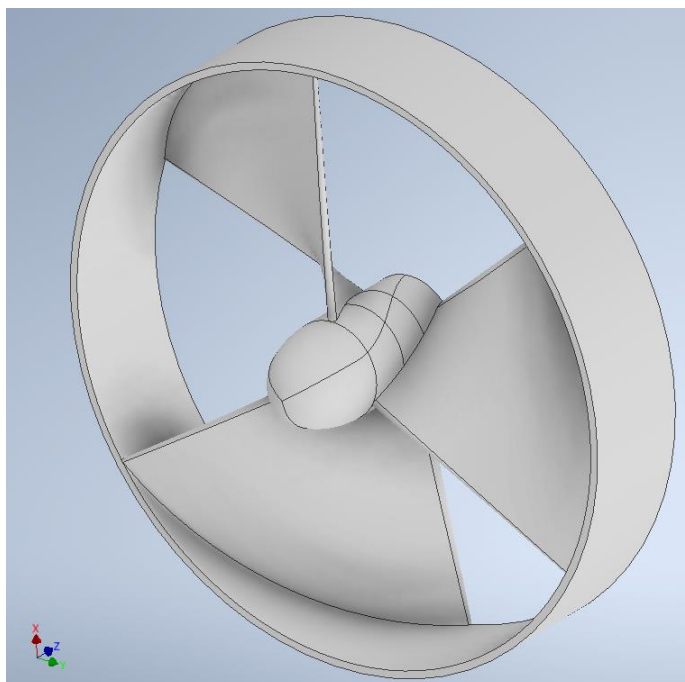
Como ultimo para terminar con el rotor, se le agrega un anillo exterior con el fin de aportarle firmeza a los alabes y al rotor ya que el espesor de los alabes es relativamente bajo, observe las figuras 69 y 70.

Figura 69. Anillo exterior



Fuente: Elaboración propia.

Figura 70. Rotor completo

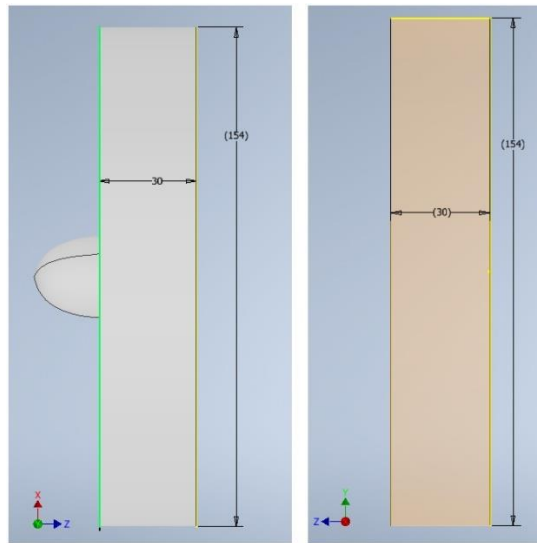


Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Fricción

Con respecto a las dimensiones del rotor terminado, se crea una superficie cilíndrica de tamaño igual al diámetro exterior teniendo en cuenta el anillo (154 milímetros) y de alto igual al ancho del impulsor (30 milímetros), como se expone en la figura 71.

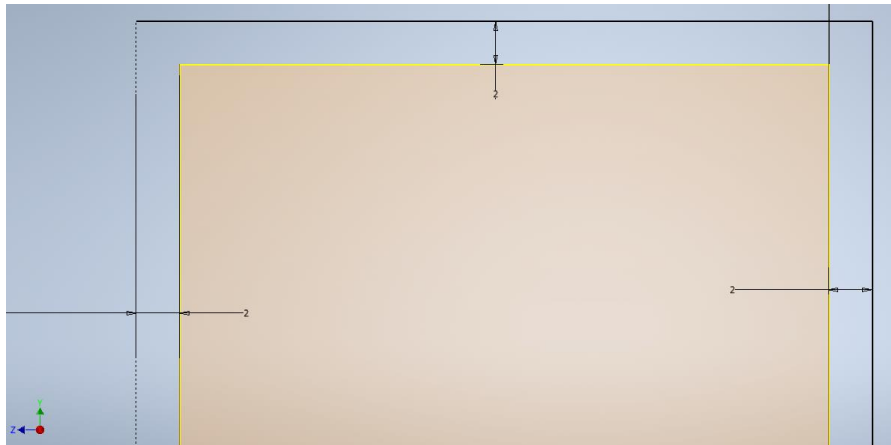
Figura 71. Límites para la carcasa



Fuente: Elaboración propia.

Esta superficie se crea con el fin de especificar límites de diseño para lo que sería la carcasa. La superficie actúa como un control para saber las partes que no puede tener contacto entre el rotor y la carcasa, pues no puede tener ningún tipo de fricción entre estos dos elementos; si hay mucha fricción entre el rotor y la carcasa se generarían pérdidas y el rotor no podría girar con la libertad necesaria.

Figura 72. Espacio carcasa - rotor



Fuente: Elaboración propia.

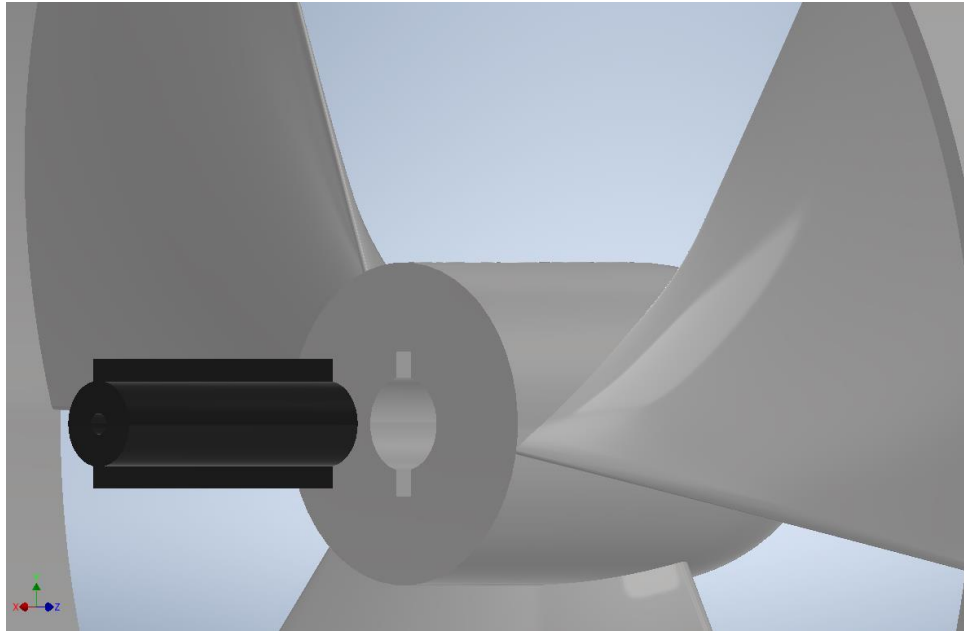
Este es espacio entre la carcasa y el rotor, vea la figura 72; es el factor desde el que partió el diseño para la carcasa, de aquí en adelante el diseño solo se trató de pasos tradicionales para la creación de un sólido (planos, extrusiones, revoluciones, etc.), no obstante, si se quiere conocer a mayor detalle la carcasa en el anexo A4 se encuentran los planos de esta.

4.3.3. Motor

Un detalle importante fue el motor, pues de este factor surgen necesidades: asegurar que el eje del motor no presentara deslizamiento en el rotor y asegurar que el motor quedara ajustado en la carcasa.

Para que el eje del motor no quedara con un ajuste holgado se diseñó un acople pequeño y remplaceable que fuera independiente del rotor, figura 73; esto fue un gran pro a favor del diseño, pues en caso de que se dañara el agujero del eje del motor no habría la necesidad de volver a gastar tiempo y dinero imprimiendo un nuevo rotor; solo se necesitaría imprimir una pequeña pieza de unos pocos centímetros.

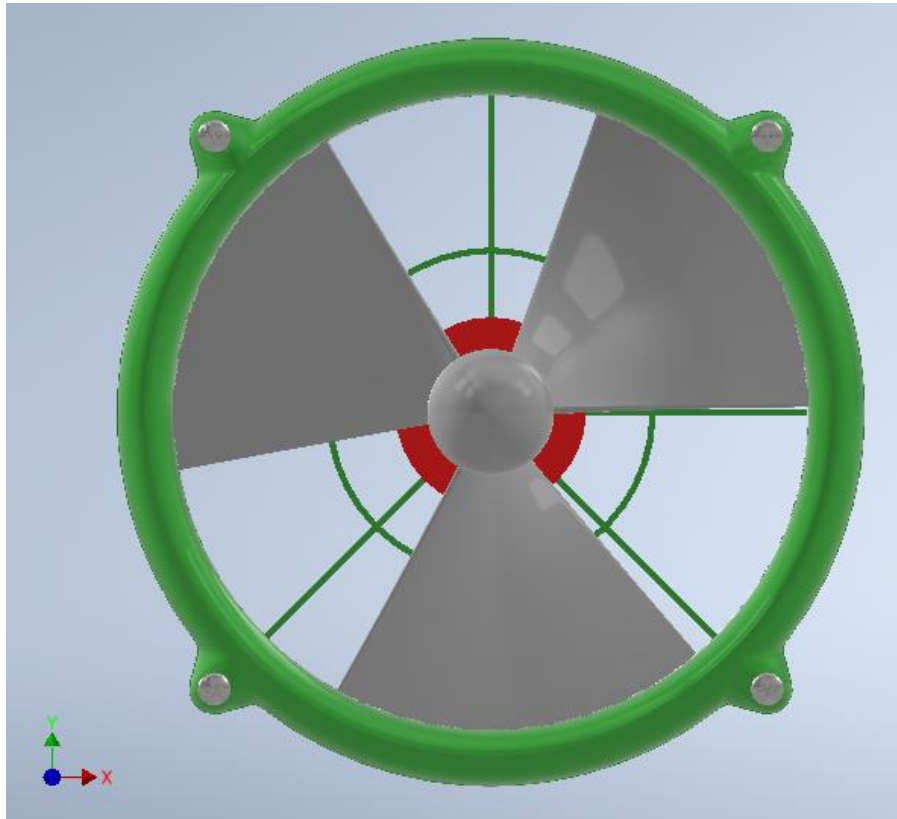
Figura 73. Acople



Fuente: Elaboración propia.

Ahora con respecto al soporte del motor; se diseña una cama para el motor en la misma carcasa; esta cama tiene que estar diseñada con respecto a las medidas del motor para que este quede muy bien centrado y sin ningún tipo de juego. En cuanto a la selección del motor se tuvo gran variedad de opciones como: motores sellados para operar sumergidos, motores de 12v, motores de 9v, mini generadores, servomotores y otros. Entre las opciones que se tenía se escogió el motor presentado en la figura 75, debido a un factor: el tamaño. Aunque el motor de 12v o los generadores producía más energía con menos revoluciones o los motores sellados permitían que la turbina funcionara sumergida, dichos artefactos tienen un cuerpo que supera el diámetro del cubo del rotor (30 milímetros), esto se ejemplifica en la figura 74 (vea como sobresale el sólido de color rojo, la cama en la que descansaría el motor) y esto se convierte en un problema para el análisis numérico; también hay que sumar que los generadores o los motores que producían más de 6v requerían de un torque elevado, estas serían las razones principales de por qué se escoge dicho motor, figura 75; ahora en la figura 76 puede observar la vista media del ensamble completo en donde se puede ver cómo está ubicado el motor dentro de la carcasa y como la cama del motor no supera el diámetro del cubo del rotor.

Figura 74. Factor de tamaño del motor



Fuente: Elaboración propia.

Figura 75. Dimensiones del motor



**Motor DC 35 gr*cm 9800 RPM (9V) /
Dinamo (2V)**

Por Ferretrónica

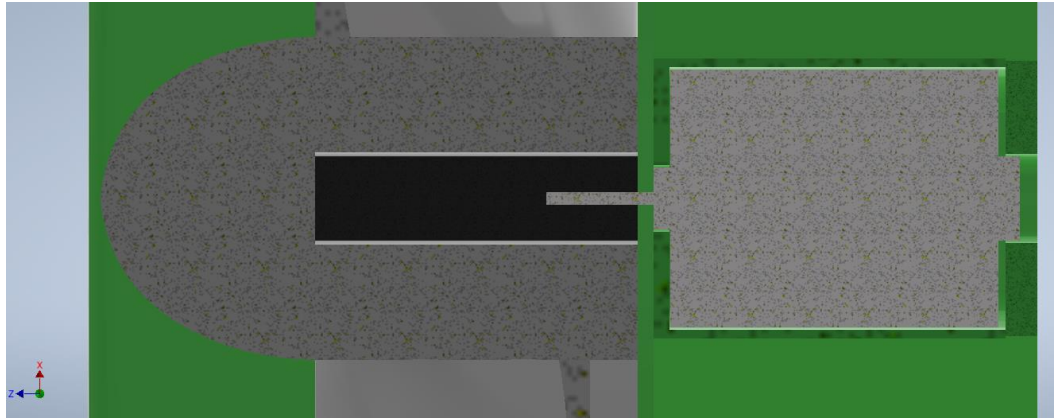
Principales Características:

- Diámetro del Eje: 2 mm
- Longitud del Eje: 9 mm
- Dimensiones del Motor: 30.5 mm x 24 mm x 18.3 mm.

Fuente: Ferretronica.²⁴

²⁴ FERRETRONICA. [tienda virtual]. Tunja. 2021. Disponible en <https://ferretronica.com/products/motor-dc-35-gr-cm-9800-rpm-9v-dinamo-2v>

Figura 76. Vista media del motor dentro de la carcasa

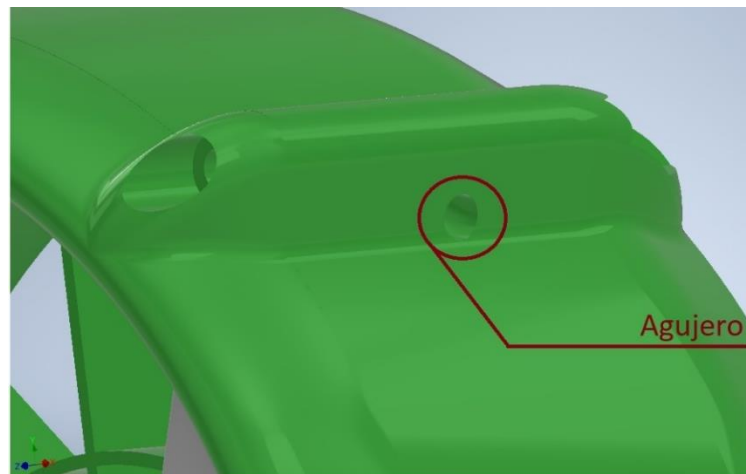


Fuente: Elaboración propia.

4.3.4. Sistema de sujeción

El último punto importante para el diseño de la carcasa fue ¿cómo sujetar la turbina cuando se quiera experimentar o poner en campo?, para esto se pensó en un elemento flexible que le permitiera ser colgada o amarrada; por lo cual se le agrega a la turbina cuatro apoyos de los que se pudiera asegurar cables, guayas o una cuerda, estos apoyos son agujeros en la zona exterior de la carcasa como se ilustra en la figura 77.

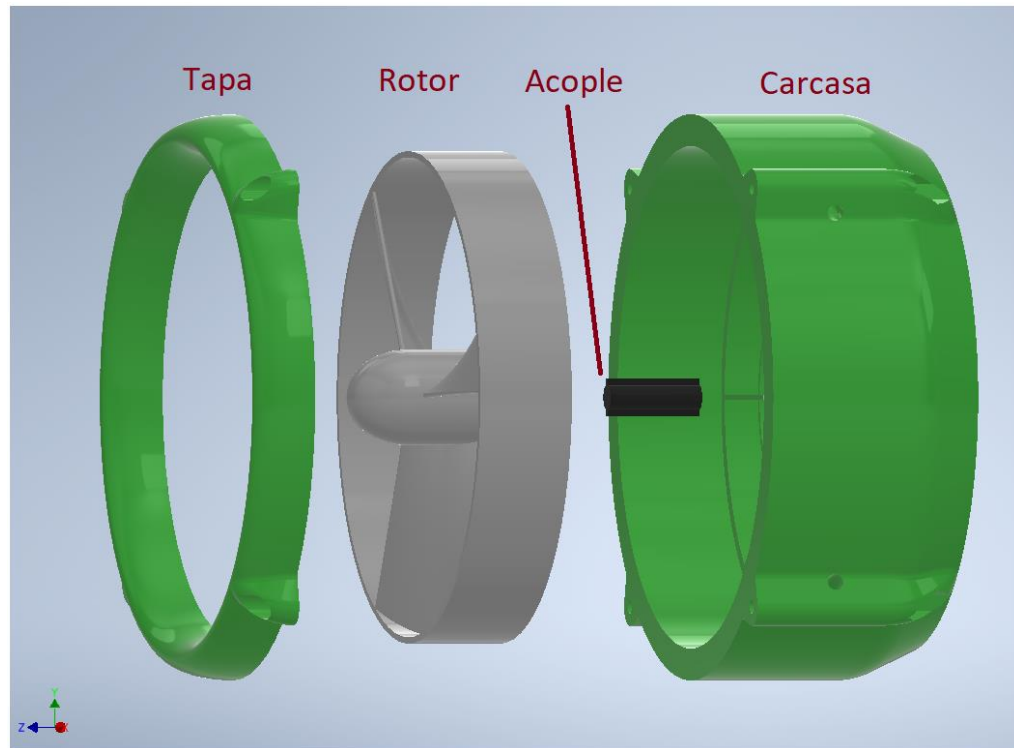
Figura 77. Agujero para cuerda, cable.



Fuente: Elaboración propia.

Expuestos estos detalles se puede ver el montaje para el rotor terminado, figura 78; el cual consta de 3 piezas: la carcasa, la tapa de la carcasa y el acople que une el motor con el rotor.

Figura 78. Componentes



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo los componentes terminados se puede llevar a la impresión, para esto es necesario exportar los archivos en formatos **.STL**. El proceso de impresión llevo a aproximadamente 3 días. A continuación, en la tabla 6, se muestran algunas características sobre la impresión.

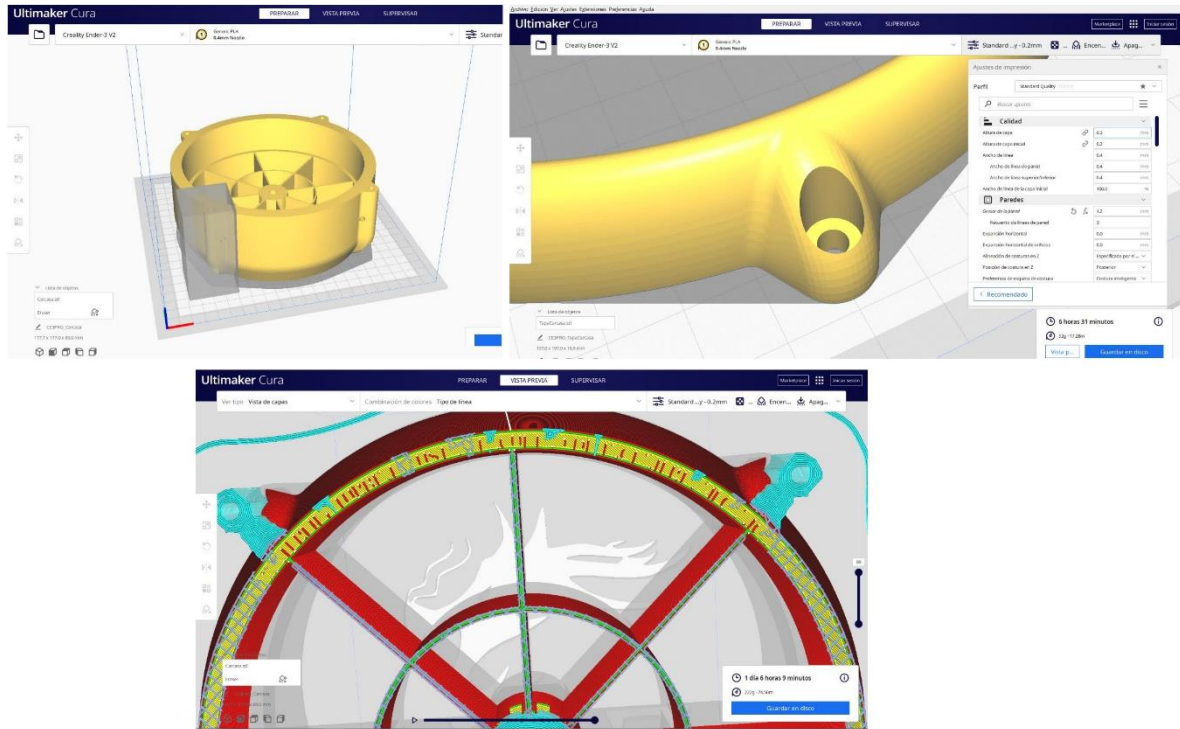
Tabla 7. Características de la impresión.

Componente	Tiempo	Masa [g]	Material
Rotor	14h 6min	67	PLA
Carcasa	1d 5h 51min	256	PLA
Tapa	6h	54	PLA
Acople	34min	2	PLA

Fuente: Elaboración propia.

Antes de imprimir cualquier componente, los archivos se analizan en un software que permite ver cómo será el laminado o la manera en la que se comportaran los hilos de impresión. En la figura 79 se presenta un ejemplo de esto.

Figura 79. Análisis previos a la impresión



Fuente: Elaboración propia.

Otro punto que cabe resaltar sobre el proceso de impresión es que ningún componente fue impreso en el primer intento, pues como se requería exactitud en algunas partes como en el agujero que iba a ir al eje del motor, el acople en el rotor o el ajuste que debía tener el motor en la carcasa; se realizaron varias pruebas con el objetivo de obtener la mejor calibración tanto para el material como para la impresora; estos procesos se realizaron con el acople, con secciones del rotor y de la carcasa. La figura 80 es un ejemplo de esto, se imprimió una pequeña parte de la carcasa a la que no se le dio ningún tipo de ajuste a la impresión, además de que el diseño se encontraba con las medidas exactas del motor; esto produjo que el motor no entrara.

Figura 80. Cama para el motor sin ajuste



Fuente: Elaboración propia.

Figura 81. Prueba de ajuste del acople

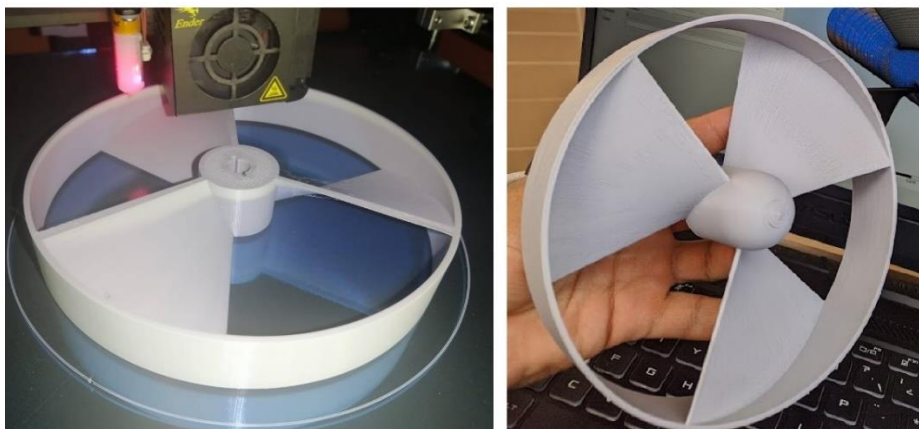


Fuente: Elaboración propia.

Otro ejemplo es la figura 81, donde se imprimió de nuevo una parte de la carcasa, el acople y solo el cubo del rotor, esto se realizó con el objetivo de ver el ajuste entre acople-motor y entre acople-rotor.

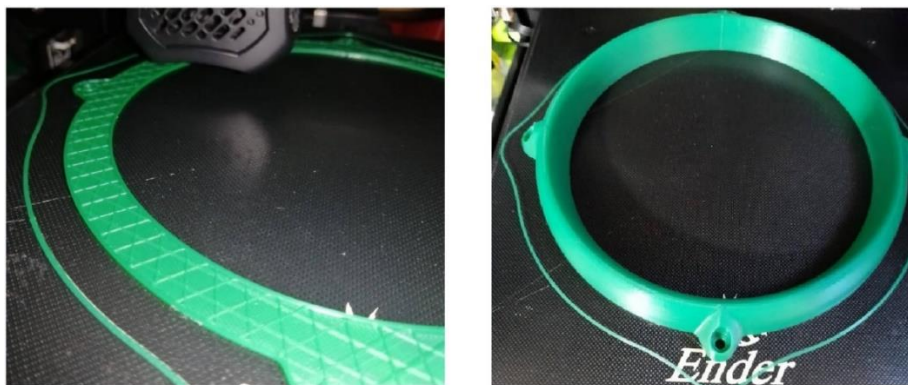
Luego de completar esta fase de pruebas se pudo llevar a cabo la totalidad de la impresión. A continuación, en las figuras 82, 83 y 84; se muestran algunos de los componentes en proceso de impresión y luego ya terminados.

Figura 82. Rotor en proceso



Fuente: Elaboración propia.

Figura 83. Tapa



Fuente: Elaboración propia.

Figura 84. Carcasa



Fuente: Elaboración propia.

Ahora como último se presenta la turbina totalmente ensamblada y montada en un ambiente exterior, sujeta mediante cuerdas, figura 85.

Figura 85. Turbina ensamblada



Fuente: Elaboración propia.

4.4. ETAPA 4: EVALUACION EXPERIMENTAL

Una vez se realiza el análisis numérico mediante Ansys, Inc. y se fabrica el modelo mediante impresión 3D, se lleva a cabo una evaluación experimental a través de un banco de pruebas de ventilador axial que permite simular experimentalmente una corriente de aire a velocidades controladas, al igual que en un canal hidráulico que permite controlar el caudal y la velocidad del fluido, para de esta manera determinar el comportamiento de la turbina con agua y con aire, simultáneamente se mide el voltaje y la intensidad proporcionados por el motor acoplado a la turbina.

En las pruebas con el ventilador axial, se realiza el montaje de la turbina utilizando 4 cables tensores que permiten ubicar de manera adecuada la turbina dentro del banco de pruebas, como se muestra en la figura 86; sin embargo en este equipo se debe tener en cuenta la posición en la que se ubica la turbina, ya que la dirección de las corrientes del aire no se distribuyen de manera uniforme a lo largo del canal, en el centro la velocidad del viento es baja, lo que puede ocasionar errores en la toma de muestras, Por lo tanto la ubicación de la turbina será en los laterales del túnel, donde se obtienen las mayores corrientes de aire y se puede tomar datos con mejor fiabilidad.

Este equipo cuenta con un variador de frecuencia que permite regular la velocidad del ventilador en un rango desde los 0 hasta los 20 m/s aproximadamente.

Figura 86. Medición de la velocidad del viento



Fuente: Elaboración propia.

Los datos obtenidos de la velocidad del aire y la velocidad angular del rotor en la salida del banco de pruebas se organizan en la tabla 8.

Tabla 8. Velocidades en la salida del banco de pruebas.

Velocidad [m/s]	Velocidad angular [rpm]	Voltaje motor (V)	Corriente motor (mA)
5	3160	0,479	0,03
7	4180	0,630	0,04
9	5340	0,820	0,05
10	5715	0,830	0,04
12	6220	0,950	0,04
14	6820	1,018	0,05

Fuente: Elaboración propia.

También se realiza una toma de muestras en la entrada del banco de pruebas, debido al espacio disponible se ubica junto al motor del ventilador, en esta ubicación el banco de pruebas ejerce una succión de aire hacia el interior del túnel por lo tanto es necesario posicionar la turbina con la entrada de aire en la dirección del flujo, como se observa en la figura 87.

Figura 87. Montaje en succión



Fuente: Elaboración propia.

Los datos obtenidos de la velocidad del aire y la velocidad angular del rotor en la entrada del banco de pruebas se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Velocidades en la entrada del banco de pruebas.

Velocidad Aire [m/s]	Velocidad Entrada [m/s]	Velocidad angular [rpm]
5	4	4450
7	5,5	5220
8	6,5	5270
10	9,5	7250
12	11,5	8510
15	12	9140
19	18	13160

Fuente: Elaboración propia.

El canal hidráulico de ensayo utilizado es el canal hidrodinámico modular 309X450 mm HM-162 (Véase en los anexos A4). Posee un circuito de agua cerrado y una sección para realizar pruebas, los laterales de la sección de ensayo están fabricadas en vidrio templado, de esta manera permiten interactuar con la turbina en el canal y tener una visualización adecuada de los ensayos realizados.

El canal de entrada está diseñado de tal manera que el flujo entra en la sección de pruebas con turbulencias muy bajas, con una regulación del caudal y velocidad del fluido.

El ensayo es realizado con diferentes caudales; La turbina está sumergida a una profundidad baja, es decir que solo $\frac{1}{4}$ de la sección de la turbina está dentro del fluido, posteriormente se prueba con una profundidad media, donde la altura del fluido llega al centro de la turbina como se observa en la figura 88. Finalmente, una profundidad alta donde se sumerge a $\frac{3}{4}$ de la altura total. (La turbina no puede ser sumergida completamente durante el ensayo ya que se debe visualizar una sección de los álabes para poder tomar la velocidad del rotor).

Figura 88. Pruebas en canal de agua.



Fuente: Elaboración propia.

Los datos obtenidos en las pruebas del canal hidráulico se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Pruebas de ensayo en el canal hidráulico.

Caudal de agua.	Velocidad Del agua [m/s]	Velocidad angular [rpm]
Bajo	1,71	235
Medio	1,71	261
Alto	1,71	291

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

La selección de una turbina hidro cinética de flujo axial, es la opción más adecuada para esta aplicación en particular, ya que es una estructura compacta, práctica, funcional, ligera y conserva igual o mejor desempeño que otros tipos de turbinas.

Mediante el uso del software ANSYS es posible realizar un modelo del rotor hidro cinético a través de BladeGen con las especificaciones geométricas que han sido propuestas anteriormente en el desarrollo del trabajo.

En relación con los dos fluidos con los que se realizó la evaluación experimental en este trabajo al contrastar los datos recolectados se puede notar cierta diferencia pues a partir de la velocidad del aire de 5 m/s la turbina gira a 3160 rpm y en agua con velocidad de 1.71 m/s y caudal alto proporciona 291 rpm; podría decirse que en agua se obtiene mayor generación de energía debido a la densidad del fluido pues esta les proporciona mayor arrastre a los álabes.

A través de la simulación se observan variables de interés como la velocidad de rotación, el caudal volumétrico, potencia en el eje, la eficiencia, los vectores de velocidad; El flujo es direccionado por los álabes, la velocidad aumenta desde el inicio hasta la punta del alabe y la presión es mucho mayor en el borde de ataque.

Se puede inferir que el diseño estructural tanto de la turbina, la carcasa y el acople es adecuado, las piezas funcionan de manera adecuada durante los ensayos experimentales, no se identifican concentradores de esfuerzos que debiliten algún componente o sean propensos a la falla, las tolerancias establecidas han permitido evitar pérdidas por fricción o por movimientos irregulares debido a la holgura en las piezas.

Con respecto a el material y proceso de fabricación seleccionado, este permite obtener una buena calidad superficial, tolerancias especificadas para cada componente y se evidencia una buena resistencia mecánica de la estructura en general y un peso de relativamente bajo teniendo en cuenta que este artefacto debe ser portátil.

Ahora se menciona a un caso particular que surge en el desarrollo del proyecto pues al realizar los cálculos para las velocidades angulares surge una curiosidad con respecto a los triángulos de velocidades; en el momento de realizar el cálculo teórico se obtiene que las magnitudes de los triángulos en la salida eran los mismos que

ingresaban, esto genero incertidumbre pero luego observando más a profundidad se encuentra que el los ángulos del alabe eran simétricos lo que generaba que no hubiera ningún cambio entre la salida y la entrada del rotor; esto dejo ver que la turbina funciona más por el arrastre o la fricción que tenga con el fluido.

RECOMENDACIONES

Durante las pruebas experimentales se manifiestan algunas irregularidades con los equipos de medición, por ejemplo, en el túnel de viento se presentan incoherencias según la posición donde se ubique la turbina, esto se relaciona a que la dirección de las corrientes de aire a lo largo del túnel no es de forma lineal, sino que, de forma helicoidal, siendo más intensas en los extremos y casi nulas en el centro del túnel; la dirección de viento no era axial a la turbina, presentaba un comportamiento similar al de un remolino.

También es necesario adquirir o fabricar un instrumento de medición que permita tomar los datos en el canal hidráulico, como la velocidad del fluido, velocidad angular de la turbina, presiones de entrada y salida, temperatura, etc. Algún tipo de artefacto que facilite la validación y brinde unos resultados de mayor confiabilidad para este tipo de trabajos.

Ahora con relación a lo analizado del propio proyecto existen ciertos factores que se proponen para futuros trabajos relacionados con este tema y con este mismo proyecto el primero es el uso de un generador, motor o dinamo que aproveche de mejor manera la potencia generada por la turbina y produzca mejores rangos de voltaje e intensidad tanto en agua como en aire; se puede pensar también en impermeabilizar los componentes del motor para evitar que el fluido pueda alterar el correcto funcionamiento cuando se utilice en agua o por otro lado una gran opción está ligada a construir el generador dentro de la carcasa y el rotor de la turbina, por ejemplo fabricar el embobinado del generador en la carcasa y los imanes irían en el anillo del rotor, esto podría solucionar la parte de conversión de energía produciendo la energía suficiente y el problema del funcionamiento al sumergirlo total en agua.

Otra idea va relacionada con la calidad superficial de la turbina, aunque la fabricada es adecuada, si se obtiene una superficie con menos irregularidades el fluido va a tener menor fricción con los componentes, esto se puede lograr con un filamento de impresión de menor diámetro, impresión en resina, un recubrimiento de resina-laca, o puliendo la superficie hasta lograr un acabado liso.

Como último se deja abierto para trabajos posteriores que se centren en la mejora del rendimiento de la turbina, mediante la modificación de la geometría, variación de ángulos, dimensiones, número de álabes, espesores, materiales, entre otras cosas, que permitan obtener mejores resultados.

BIBLIOGRAFÍA

AGUIRRE, Carlos. Módulo para la generación de geometrías de rotores para máquinas hidráulicas axiales por medio del programa inventor [en línea]. Universidad Santo Tomás, Facultad de ingeniería mecánica. 2021.

ANSYS, INC. 5.7. The Y+ Functionality [sitio web]. Estados Unidos; [Consultado: 22 de noviembre de 2021]. Disponible en https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/tg_tutr/TG_Axfan_ATM.html%23tg_y_func_tut11

ANSYS, INC. 10.8.2. Mesh Limits [sitio web]. Estados Unidos; [Consultado: 22 de noviembre de 2021]. Disponible en https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/tg_user/i1034630.html

ANSYS, INC. Chapter 9: BladeGen [sitio web]. Estados Unidos; [Consultado: 15 de noviembre de 2021]. Disponible en https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/wb_bm/bm_bladegen.html

ANSYS, INC. Chapter 10: Ansys TurboGrid Workflow [sitio web]. Estados Unidos; [Consultado: 22 de noviembre de 2021]. Disponible en https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/tg_user/tgANSYMeshMesh.html

ANSYS, INC. Chapter 11: TurboGrid [sitio web]. Estados Unidos; [Consultado: 15 de noviembre de 2021]. Disponible en https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/wb_bm/bm_turbogrid.html

ANSYS, INC. Chapter 12: CFX [sitio web]. Estados Unidos; [Consultado: 15 de noviembre de 2021]. Disponible en https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/wb_bm/i4574564654078565014526.html

ANSYS, INC. Guía del usuario de Workbench [sitio web]. Estados Unidos; [Consultado: 15 de noviembre de 2021]. Disponible en

https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/wb2_help/wb2_help.html

ANSYS, INC. Historia de la empresa [sitio web]. Estados Unidos; [Consultado: 15 de noviembre de 2021]. Disponible en <https://www.ansys.com/company-information/the-ansys-story>

ANTHONY, Armand & ROY, Sukanta. Performance analysis of a modified Savonius hydrokinetic turbine blade for rural application [en línea]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. Vol. 943. No. 1. Disponible en <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/943/1/012034/meta>

BETANCUR, Juan., MARIN, Juan., & ARRIETA, Edwin. Design and hydrodynamic analysis of horizontal-axis hydrokinetic turbines with three different hydrofoils by CFD [en línea]. Journal of Applied Engineering Science, 2020. vol. 18, no 4, p. 529-536. Disponible en <https://aseestant.ceon.rs/index.php/jaes/article/view/25273>

BUKALAKAP. Waterlily Usb Portable Power Turbine Charger Water Wind Outdoor Camper [sitio web]. Disponible en <https://www.bukalapak.com/p/komputer/desktop/269dhga-jual-waterlily-usb-portable-power-turbine-charger-water-wind-outdoor-camper>

COMPEL SRL. Tacómetro Minipa MDT-2238A. [sitio web]. Uruguay. Disponible en <https://www.compelsrl.com/minipa-varios/1882-tacometro-minipa-mdt-2238.html>

DAGATRON. Medidor ambiental multifunción LM8000A. [tienda web]. Barcelona. Disponible en https://www.dagatron.es/medidores-ambientales/99-medidor-ambiental-multifuncion-lm8000a.html?search_query=anemometro&results=5

DMS. [en línea]. Guts of CFD. Wyoming. Disponible en: <https://dmsonline.us/guts-of-cfd-transport-equation/>

ESPINOSA SARMIENTO, Angie Lizeth. Desenvolvimento de uma metodologia para o projeto aerodinâmico de rotores axiais reversíveis de ventiladores de jato de túneis rodoviários [en línea]. Tesis Doctoral. M. Sc. thesis, Universidade Federal de Itajubá, 2013. Disponible en: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/934?locale-attribute=es>

FERRETRONICA. [tienda virtual]. Tunja. 2021. Disponible en <https://ferretronica.com/products/motor-dc-35-gr-cm-9800-rpm-9v-dinamo-2v>

GETDATGADGET. Waterlily turbine generates electricity using water and wind power. [sitio web]. Getdatgadget, 2019. Imagen. Disponible en <https://www.getdatgadget.com/waterlily-turbine-generates-electricity-using-water-and-wind-power/>

GHARIB, Ahmed, et al. Wind–water experimental analysis of small sc-darrieus turbine: an approach for energy production in urban systems [en línea]. Sustainability, 2021. 13(9), 5256. Disponible en <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/9/5256>

GRESHO, Philip M. y SANI, Robert L. On pressure boundary conditions for the incompressible Navier-Stokes equations [en línea]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1987. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/flid.1650071008>

MEHTA, Dhruv., THOTA RADHAKRISHNAN, Adithya K., LIER, Jules V., & CLEMENS, Francois. A Wall Boundary Condition for the Simulation of a Turbulent Non-Newtonian Domestic Slurry in Pipes [en línea]. Water, 2018. vol. 10, no 2, p. 124. Disponible en <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/2/124>

MORAGUES, Jaime., & RAPALLINI, Alfredo. Energía eólica [en línea]. Instituto Argentino de la Energía “General Mosconi, 2003. vol. 22. Disponible en <http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/534/541/2962.pdf>

MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos. 6 ed. México: Pearson Education. 2006, 626p.

NIKOLIC, Vlastimir; SAJJADI, Shahim y PETCOVIC, Dalibor. Design and state of art of innovative wind turbine systems [en línea]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020. 61, 258-265. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116300041>

R. Torres y J. Graw. Transferencia de calor con Comsol multiphysics. colección multifásica. Addlink. 120 p. ISBN 9788461173181.

SAINI, Gaurav y SAINI, Rajeshwer Prasad. A review on technology, configurations, and performance of cross-flow hydrokinetic turbines [en línea]. International Journal of Energy Research, 2019. vol. 43, no 13, p. 6639-6679. Disponible en <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.4625>

YANGYOZOV, Anastas Todorov; DIMITROVA, Damjanka Stojanova y PANAYOTOV, Lazar Georgiev. Modeling and performance calculation of a horizontal axis wind and hydrokinetic turbine: Numerical study [en línea]. Annual journal of technical university of varna, Bulgaria, 2018. vol. 2, no 2, p. 70-79. Disponible en <https://aj-tuv.org/index.php/ajtuv/article/view/95>

ANEXO A 1

NUMERO DE REYNOLDS

Para el refinamiento de malla por medio del método Y+, usado en el numeral 5.2.3.5. *Refinamiento de malla*; se requiere un valor para el número de Reynolds, para llegar a dicho número de Reynolds se realizó un cálculo teniendo en cuenta los datos del proyecto (dimensiones geométricas y las condiciones de flujo); el procedimiento fue el siguiente:

1. Se busca la ecuación correspondiente para el cálculo del Número de Reynolds, esta ecuación se obtiene del libro Mecánica de fluidos de Mott, en la figura 89 se presenta dicha ecuación.

Figura 89. Ecuación del número de Reynolds.

$$N_R = \frac{vD\rho}{\eta} = v \times D \times \rho \times \frac{1}{\eta}$$
$$N_R = \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \text{m} \times \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{m} \cdot \text{s}}{\text{kg}}$$

Fuente: Mecánica de fluidos ²⁵

Donde: v = velocidad del fluido; D = diámetro de la sección; ρ = densidad del fluido y η = viscosidad dinámica del fluido.

2. Se organizan los datos necesarios para realizar el cálculo del número de Reynolds; para esto se tiene en cuenta las condiciones de la zona de Tunja:
 - $v = 10\text{m/s}$
 - $\rho = 1,185\text{kg/m}^3$
 - $\eta = 0,0000177\text{Pa}\cdot\text{s}$

²⁵ MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos. 6 ed. México: Pearson Education. 2006, 626 p.

$$- D = 0,15m$$

3. Teniendo claros los datos, se lleva a cabo el cálculo:

$$N_R = \frac{(10 \text{ m/s})(0,15m)(1,185 \text{ kg/m}^3)}{0,0000177Pa * s} \quad (9)$$

$$N_R = 102033,8 \quad (10)$$

4. Se obtiene un numero de Reynolds igual a 102033, (flujo turbulento); ahora para el refinamiento de la malla se toman varios valores iniciando desde el calculado anteriormente, sin embargo, al final el mejor valor para el numero de Reynolds esta aproximadamente en 200000.

ANEXO A 2

FLUJO MASICO

En relación con el flujo masico, este se define como la cantidad en masa de un fluido que transita en un sector por unidad de tiempo; dicho esto se tiene que el cálculo del flujo masico se relaciona con la densidad y el caudal (velocidad del fluido por área de la sección).²⁶

En la figura 90 se representa la ecuación.

Figura 90. Flujo masico

Flujo másico	$M = \rho Q$	kg/s slugs/s
--------------	--------------	-------------------

Fuente: Mecánica de fluidos de Mott.

Para el proyecto se trabajó en aire y agua, los cuales tienen una densidad de 1.185kg/m³ y 997kg/m³, respectivamente, (el valor de la densidad del aire y el agua se toma del software).

Teniendo en cuenta que el flujo masico es la multiplicación de la densidad del fluido por la velocidad del fluido por el área de la sección, los cálculos del flujo masico para las diferentes velocidades se presentan en la tabla 11.

Tabla 11. Flujo masico

	ρ [kg/m ³]	D ext [m]	D int [m]	A [m ²]	v [m/s]	$\dot{m}$ [kg/s]
agua	997	0,15	0,03	0,0169646	5	84,56853
					10	169,13706
					15	253,70559
					20	338,27413
aire	1,185	0,15	0,03	0,0169646	5	0,10026
					10	0,20052
					15	0,30078
					20	0,40104

Fuente: Elaboración propia.

²⁶ MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos. 6 ed. México: Pearson Education. 2006, 626 p.

ANEXO A 3

VELOCIDAD ANGULAR

Para el cálculo de la velocidad angular se tuvo en cuenta todo lo conocido sobre turbomáquinas, para esto se tiene que:

$$U = \frac{C}{\tan \beta} \quad (11)$$

$$U = 2\pi * n * r \rightarrow n = \frac{U}{2\pi * r} \quad (12)$$

Donde:

- U = velocidad circunferencial
- C = velocidad del fluido
- β = ángulo beta
- r = radio
- n = velocidad angular del rotor

Conociendo esto se inicia por calcular el ángulo beta para 3 diferentes alturas del alabe, vea la tabla 12.

Tabla 12. Ángulo beta

r (m)		Beta	
r del cubo	0,015	90-31,65	58,35
r medio	0,045	90-61,6	28,4
r exterior	0,075	90-72,02	17,98

Fuente: Elaboración propia

Teniendo claro el ángulo beta se puede proceder a calcular U.

$$U = \frac{C}{\tan \beta} = \frac{5m/s}{\tan 58.35} = 3.082m/s \quad (13)$$

Debido a que este procedimiento se debe realizar para cada C y para cada ángulo beta, los cálculos se organizan en la tabla 13.

Tabla 13. Velocidad angular

C [m/s]	U [m/s]	Beta	r [m]	n [rps]	n [rpm]	n prom [rpm]
5	3,08203849	58,35	0,015	32,7014441	1962,086644	1962,023
	9,24730655	28,4	0,045	32,7056566	1962,339397	
	15,4067147	17,98	0,075	32,694064	1961,643837	
10	6,16407698	58,35	0,015	65,4028881	3924,173287	3924,046
	18,4946131	28,4	0,045	65,4113132	3924,678794	
	30,8134293	17,98	0,075	65,3881279	3923,287674	
15	9,24611548	58,35	0,015	98,104332	5886,2599	5886,069
	27,7419197	28,4	0,045	98,11697	5887,0182	
	46,220144	17,98	0,075	98,082192	5884,9315	
20	12,328154	58,35	0,015	130,80578	7848,3466	7848,093
	36,9892262	28,4	0,045	130,82263	7849,3576	
	61,6268587	17,98	0,075	130,77626	7846,5753	

Fuente: Elaboración propia

ANEXO A 4

EQUIPOS DE MEDICIÓN

En las figuras 91, 92, 93 y 94 se presentan los equipos más importantes usados para el desarrollo del proyecto; el canal hidráulico, el túnel de viento, el anemómetro y el tacómetro, respectivamente.

Figura 91. Canal hidráulico GUNT modular 309x450mm de pendiente variable.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 92. Banco didáctico de turbina de eje vertical.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 93. Anemómetro, luxómetro digital LM-8000A.



Fuente: Dagatron.²⁷

²⁷ DAGATRON. Medidor ambiental multifunción LM8000A. [tienda web]. Barcelona. Disponible en https://www.dagatron.es/medidores-ambientales/99-medidor-ambiental-multifuncion-lm8000a.html?search_query=anemometro&results=5

Figura 94. Tacómetro Minipa MDT-2238A.



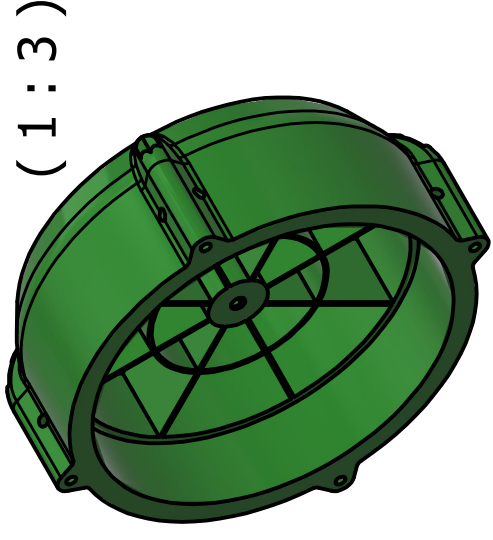
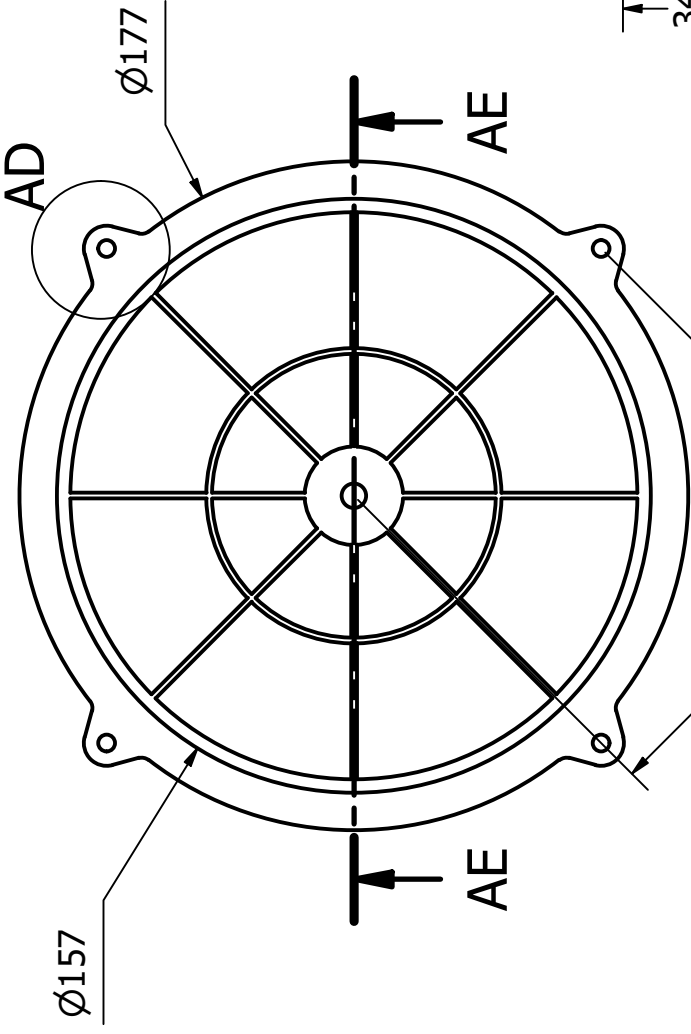
Fuente: Compel SRL.²⁸

²⁸ COMPEL SRL. Tacómetro Minipa MDT-2238A. [sitio web]. Uruguay. Disponible en <https://www.compelsrl.com/minipa-varios/1882-tacometro-minipa-mdt-2238.html>

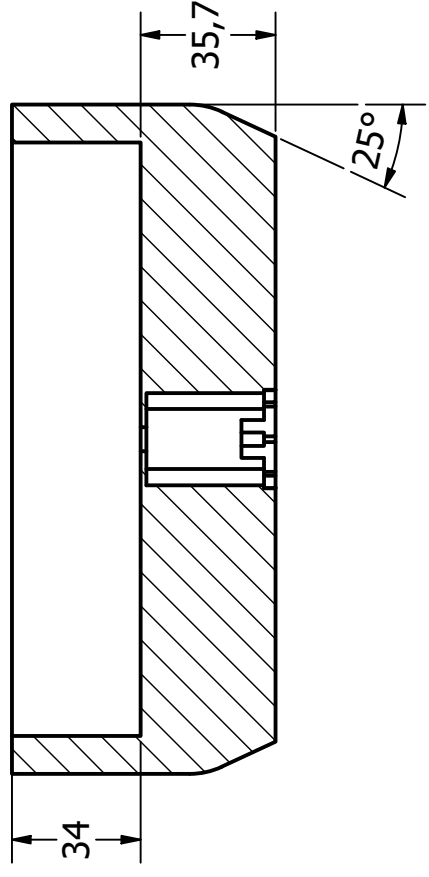
ANEXO A 5

Planos

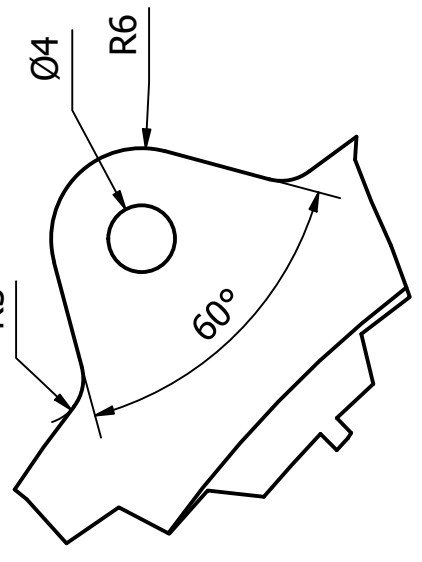
En esta parte se muestran los respectivos planos de la carcasa, la tapa de la carcasa y el acople del motor.



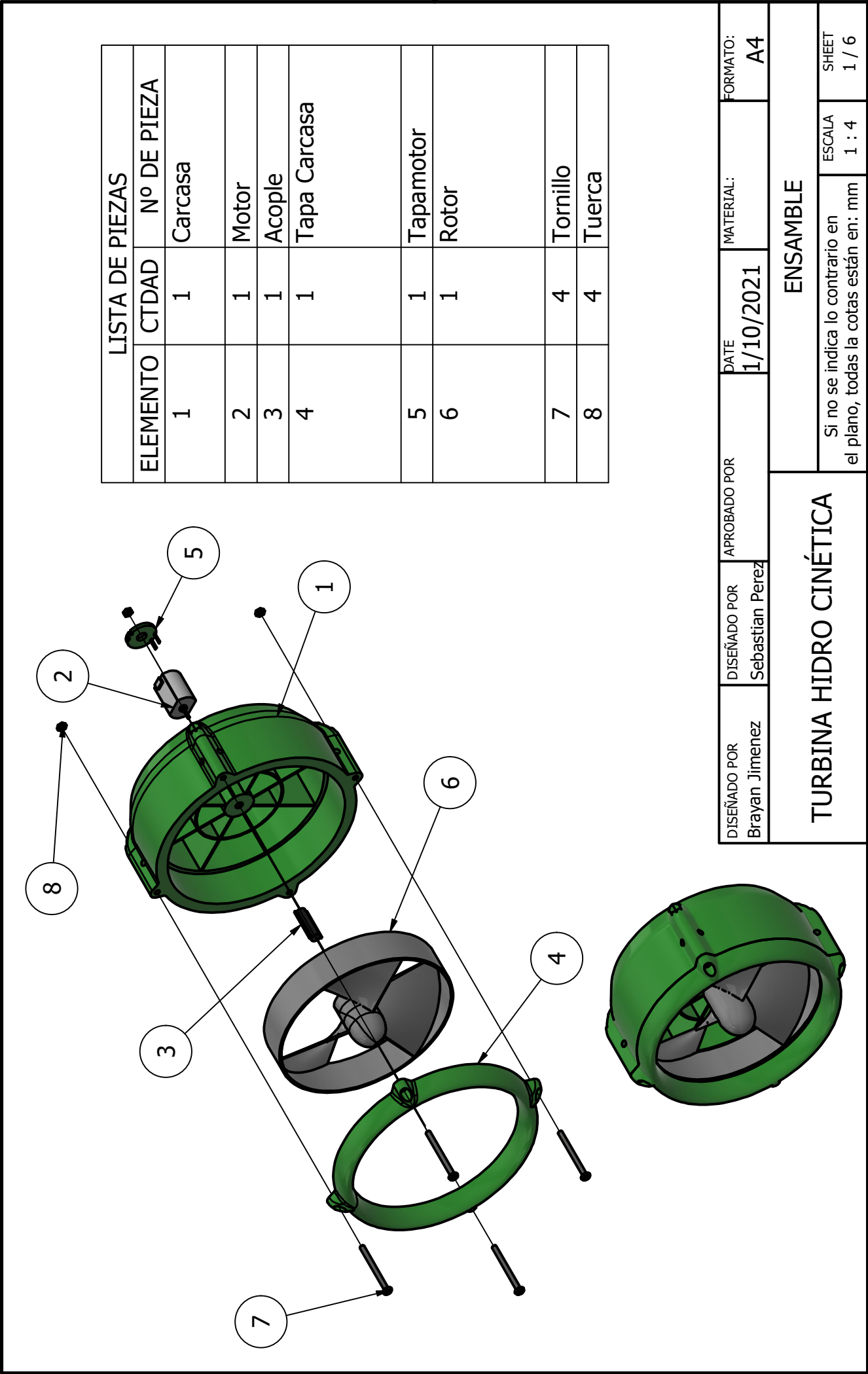
AE-AE (1 : 2)



AD (2 : 1)

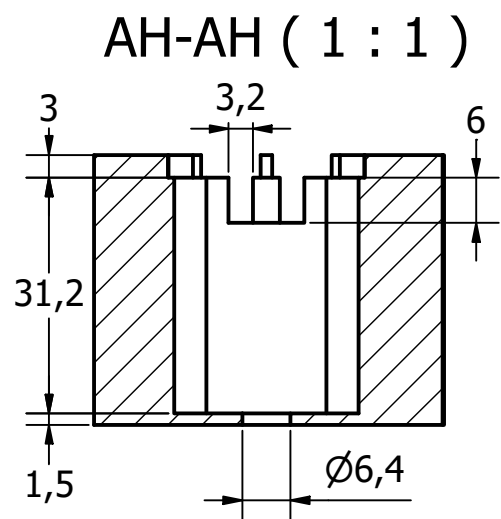
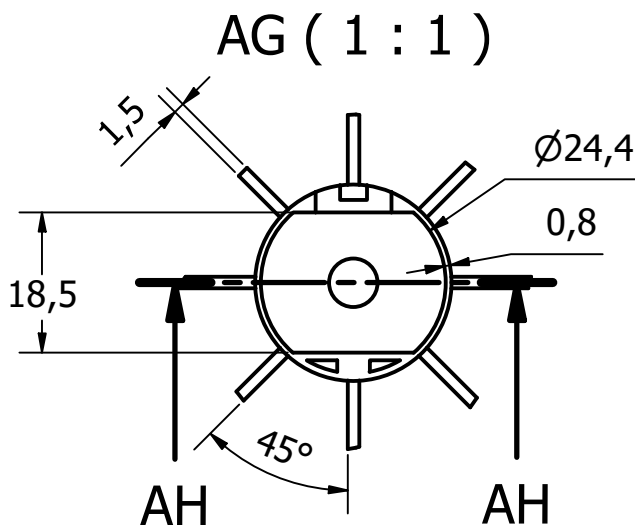
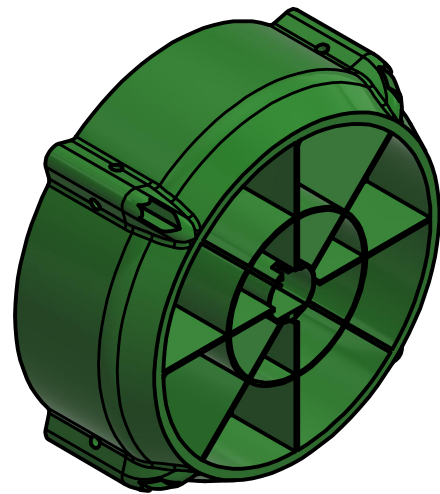
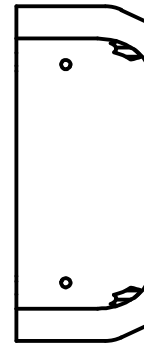
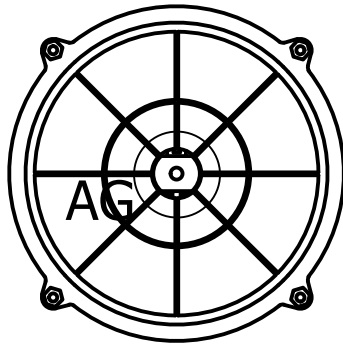


DISEÑADO POR Brayan Jimenez	DISEÑADO POR Sebastian Perez	APROBADO POR	DATE 1/10/2021	MATERIAL: Plastico PLA	FORMATO: A4
CARCASA					
TURBINA HIDRO CINÉTICA				ESCALA 1 : 2	SHEET 2 / 6
Si no se indica lo contrario en el plano, todas la cotas están en: mm					

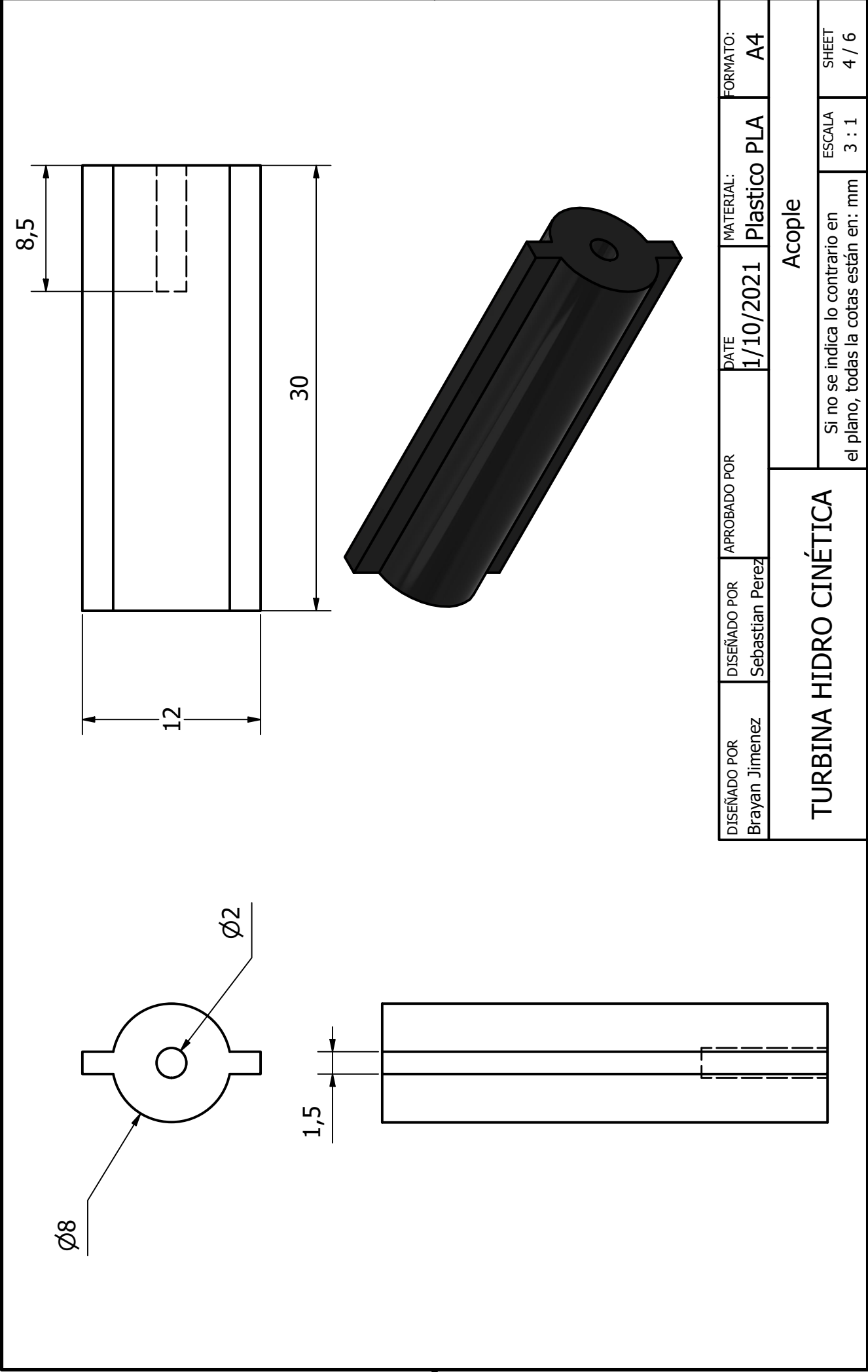


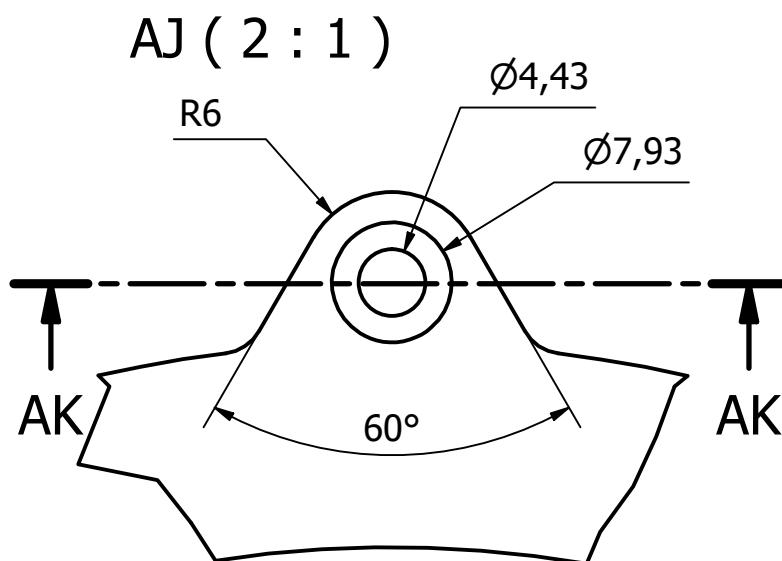
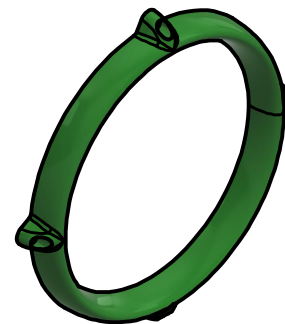
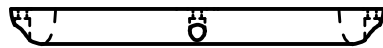
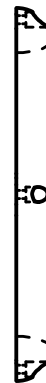
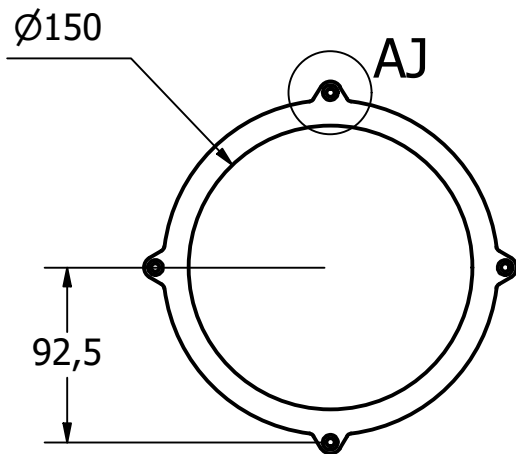
LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Carcasa
2	1	Motor
3	1	Acople
4	1	Tapa Carcasa
5	1	Tapamotor
6	1	Rotor
7	4	Tornillo
8	4	Tuerca

DISEÑADO POR Brayan Jimenez	DISEÑADO POR Sebastian Perez	APROBADO POR	DATE 1/10/2021	MATERIAL:	FORMATO: A4
TURBINA HIDRO CINÉTICA			ENSAMBLE		
Si no se indica lo contrario en el plano, todas la cotas están en: mm			ESCALA 1 : 4	SHEET 1 / 6	

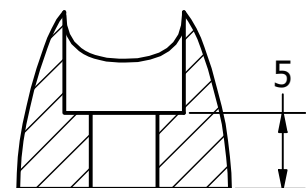


DISEÑADO POR Brayan Jimenez	DISEÑADO POR Sebastian Perez	APROBADO POR	DATE 1/10/2021	MATERIAL: Plastico PLA	FORMATO: A4
TURBINA HIDRO CINÉTICA			SUJECION MOTOR		
Si no se indica lo contrario en el plano, todas la cotas están en: mm			ESCALA 1 : 4	SHEET 3 / 6	





AK-AK (2 : 1)



DISEÑADO POR Brayan Jimenez	DISEÑADO POR Sebastian Perez	APROBADO POR	DATE 1/10/2021	MATERIAL: Plastico PLA	FORMATO: A4
TURBINA HIDRO CINÉTICA			Tapa Carcasa		
Si no se indica lo contrario en el plano, todas la cotas están en: mm			ESCALA 1 : 4	SHEET 5 / 6	

