

E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática
y de Telecomunicación

Estudio, diseño y análisis de una turbina hidrocinéctica gorlov



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Autor: Andrés Echeverría Beriain

Directores: Juan Pablo Fuertes Bonel

Javier León Iriarte

Pamplona, 8 de septiembre de 2022

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

“Alguien no es grande o mediocre en la vida por hacer algo grande o no. Uno es mediocre si tiene algo o alguien grande delante y no sabe darse cuenta.”

David Beriain

AGRADECIMIENTOS

Quisiera aprovechar estas líneas para agradecer a todas las personas que me han ayudado y me han apoyado a lo largo de estos años de carrera, así como en la elaboración del presente Trabajo Fin de Grado.

En primer lugar, quisiera agradecer a mi tutor, Juan Pablo Fuertes, por aceptar mi propuesta para realizar este Trabajo Fin de Grado bajo su dirección. Así mismo, me gustaría agradecer la ayuda de Javier León y Alexia Torres por haber empleado parte de su tiempo atendiéndome en cualquier momento. Ha sido esencial su ayuda a lo largo de estos meses sin la cual no hubiese sido posible la consecución de este trabajo.

También tengo que agradecer, ¡y mucho!, a Javier Armañanzas, con quién he disfrutado las frescas mañanas de este verano en el laboratorio.

Por último, no puedo olvidar a mis amigos, a mi pareja, y muy especialmente a mi familia que, me ha brindado la oportunidad de estudiar y me ha ofrecido su apoyo a lo largo de todos estos años.

Muchas gracias a todos.

RESUMEN

En este Trabajo Fin de Grado (TFG) se analiza un modelo de turbina hidrocínética de eje vertical denominado Gorlov. Para llevar a cabo el diseño se emplean los softwares Matlab y SolidWorks y para simular el comportamiento en servicio, se emplea el software de CFD X-Flow. El principal objetivo es analizar el comportamiento de la turbina en funcionamiento en un canal de riego y buscar la mejora del modelo, hasta conseguir uno que genere par suficiente para obtener energía, teniendo en cuenta varios parámetros de diseño, tales como el perfil de los álabes, para los cuales se ha seleccionado el perfil NACA 4415

Palabras clave: Turbina hidrocínética, XFlow, SolidWorks, diseño, CFD.

ABSTRACT

In this Final Degree Project (TFG) a model of a vertical axis hydrokinetic turbine called Gorlov is analysed. The design is carried out using Matlab and SolidWorks software and the CFD software X-Flow is used to simulate the behaviour in service. The main objective is to analyse the behaviour of the turbine in operation in an irrigation channel and to seek to improve the model to achieve one that generates sufficient torque to obtain energy, taking into account various design parameters, such as the profile of the blades, for which the NACA 4415 profile has been selected.

Keywords: hydrokinetic turbine, Xflow, SolidWorks, Matlab, design, CFD.

ÍNDICE

RESUMEN.....	6
ABSTRACT.....	6
ÍNDICE.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	10
1.- PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS.....	16
2.- ESTADO DEL ARTE.....	20
2.1.- Introducción.....	20
2.2.- Impactos ambientales de las turbinas hidrocínéticas.....	20
2.3.- Componentes de una turbina hidrocínética.....	21
2.4.- Clasificación de las turbinas hidrocínéticas.....	22
2.4.1- Según su orientación respecto al flujo del agua.....	22
2.4.2.- Según el recurso empleado.....	26
2.4.3.- Ejemplos de turbinas hidrocínéticas comerciales.....	27
3.- PROCESO DE MODELIZADO.....	32
4.- SIMULACIÓN Y ANÁLISIS.....	37
4.1.- Simulaciones previas. Estudio de convergencia.....	37
4.1.1.- Configuración de una simulación.....	38
4.1.2.- Resultados de las simulaciones previas. Estudio de la convergencia.....	44
4.2.- Comportamiento de la turbina según el ángulo de orientación de la pala.....	51
5.- CONCLUSIONES.....	58
6.- BIBLIOGRAFÍA.....	62

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1. Partes de una turbina.	22
Ilustración 2. Sección de una pala	22
Ilustración 3. Turbinas hidrocínéticas de flujo axial con estructura abierta.	23
Ilustración 4. Turbina hidrocínética de flujo axial con estructura cerrada.	23
Ilustración 5. Turbina de flujo cruzado y eje horizontal.	24
Ilustración 6. Tipos de turbinas hidrocínéticas de eje vertical.	25
Ilustración 7. Turbina hidrocínética Gorlov.....	26
Ilustración 8. Tipos de turbinas hidrocínéticas.	26
Ilustración 9. Turbina RivGen.	27
Ilustración 10. Turbina SeaFlow y Turbina SeaGen.....	27
Ilustración 11. Turbina Orbital O2.	28
Ilustración 12. Turbina Sail Gen.....	28
Ilustración 13. Turbina Sail Gen sumergida.	28
Ilustración 14. En la izquierda, vista de alzado de la turbina gorlov acotada en mm, y la derecha, vista en 3D del modelo.	32
Ilustración 15. NACA 4415 generado en Matlab.	33
Ilustración 16. Posicionamiento de una pala en la base de la turbina.....	33
Ilustración 17. Distintas configuraciones según el ángulo de orientación de la pala: 90°, 88° y 86°.	34
Ilustración 18. Revolución de una pala.	34
Ilustración 19. Matriz generadora de las tres palas.....	35
Ilustración 20. Configuración de la pestaña Enviroments.	39
Ilustración 21. Configuración de la pestaña Materials.....	39

Ilustración 22. Importación de la geometría y su visualización junto a las dimensiones del canal.....	40
Ilustración 23. Configuraciones fixed y enforced.	41
Ilustración 24. Configuración Rigid body dynamics.....	42
Ilustración 25. Configuración de la pestaña Simulation.	43
Ilustración 26. Región de remallado.....	43
Ilustración 27. Menú de la pestaña Post-Processing y plano de corte mostrando la velocidad del agua en un instante determinado de la simulación.	44
Ilustración 28. Visualización de los dos niveles de malla: 3 mm y 1,5 mm.	45
Ilustración 29. Región de remallado con tamaño de elemento 1,5 mm. ..	45
Ilustración 30. Diferentes configuraciones de RS-TRS, en orden descendente: 8 mm - 2 mm, 4 mm - 2 mm, 4 mm - 1 mm, 3 mm – 1,5 mm.	47
Ilustración 31. Gráficos del parámetro de estabilidad de diferentes configuraciones de RS-TRS, en orden descendente: 8 mm - 2 mm, 8 mm - 1 mm, 4 mm - 2 mm, 4 mm - 1 mm, 3 mm – 1,5 mm	48
Ilustración 32. Velocidad angular de la turbina en vacío.....	49
Ilustración 33. Curva de convergencia de la velocidad de rotación.	50
Ilustración 34. Gráfico de la velocidad de rotación de la turbina.....	52
Ilustración 35. Gráfico Par Vs Velocidad de rotación.....	54
Ilustración 36. Gráfico de Potencia Vs Velocidad de rotación.....	54

1.-PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS

1.- PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS

La elaboración de este TFG surge de la necesidad de potenciar el uso de las energías renovables, concretamente la energía hidráulica, con el objeto de obtener electricidad de forma limpia y económicamente rentable.

En los últimos años las energías renovables han sufrido un gran desarrollo para hacer frente al agotamiento de las fuentes de combustibles fósiles, y a los problemas generados por los altos niveles de polución. Sin embargo, quedan por explotar muchas áreas de las energías renovables y por ello, este Trabajo Fin de Grado se centra en una tecnología de microgeneración poco desarrollada en Navarra y en el resto de España, que es la obtención de energía mediante turbinas hidrocínéticas.

Las instalaciones de turbinado hidrocínético, al aprovechar la energía cinética del flujo para generar energía eléctrica, suponen una solución idónea para canales abiertos y con salto hidráulico prácticamente nulo. Así mismo, al no requerir de gran infraestructura, son fácilmente integrables en medios rurales, favoreciendo así una filosofía de generación autosuficiente y próxima al punto de consumo.

El objetivo es diseñar o rediseñar una turbina hidrocínética para generar electricidad en ríos y/o canales de riego. Para ello, lo primero de todo se llevará a cabo una revisión bibliográfica del estado del arte sobre la tecnología hidrocínética en general, para ver que tipos de turbinas existen, su modo de aplicación y las ventajas e inconvenientes de éstas.

Una vez elegido el tipo de turbina a rediseñar, se decidirá los parámetros de diseño.

El siguiente paso es realizar en SolidWorks las distintas configuraciones de diseño según los parámetros de diseño elegidos.

Además, como se pretende fabricar la turbina para ensayarla en un canal de ensayo real para contrastar los resultados obtenidos mediante simulación, habrá que tener en cuenta las dimensiones de éste a la hora de diseñar la turbina, evitando así escalar las dimensiones y resultados.

Posteriormente habrá que preparar el canal de simulación en XFlow con las dimensiones y condiciones de entorno y contorno oportunas, procurando que se asemejen a la realidad.

Cuando todo esté listo y funcione correctamente, con una de las turbinas diseñadas en SolidWorks, habrá que lanzar simulaciones con distintos tamaños elemento del mallado y remallado y con ello crear una gráfica, velocidad Vs nº de elementos, para estudiar la convergencia de la velocidad y así escoger un tamaño de elemento que nos aporte unos resultados aceptables, pero teniendo en cuenta el tiempo de simulación.

Una vez se tenga un RS Y TRS aceptables, se introducirá un par de freno a la turbina en el sentido contrario al de giro. Habrá que probar con distintos pares hasta llegar a uno que frene a la turbina, pero que no la haga girar en sentido contrario al que gira cuando lo hace libre.

Cuando se tenga el par máximo que soporta la turbina, se simulará con algunos pares de freno algo más pequeños y se construirá la gráfica par velocidad para cada ángulo de ataque, siendo éste el parámetro de diseño establecido.

Finalmente se procederá analizará la influencia del ángulo de orientación de las palas en la potencia generada por la turbina.

2.- ESTADO DEL ARTE

2.- ESTADO DEL ARTE

2.1.- Introducción

Las turbinas hidrocínéticas permiten la generación de energía eléctrica a partir de una fuente renovable, en este caso utilizando la energía de las corrientes de agua, generalmente de ríos, mares y canales, entre otros. Constituyen una tecnología que contribuye a la conservación del medio ambiente, al no requerir la construcción de represas, dado que su funcionamiento no está limitado a alturas o caídas de agua, siendo una de las principales características diferenciadoras con relación a las centrales hidroeléctricas convencionales [1].

2.2.- Impactos ambientales de las turbinas hidrocínéticas

Aunque las turbinas hidrocínéticas presentan un impacto ambiental mínimo, en comparación con las centrales hidroeléctricas convencionales al no requerir de embalses [2], [3], éstas producen impactos ambientales directos sobre los seres vivos acuáticos debido a colisiones, e indirectos por medio de cambios en la distribución de la profundidad y la velocidad del flujo, la socavación producida en los alrededores del mecanismo instalado que conlleva una degradación de la calidad del agua y, el transporte de sedimentos que causa cambios en el hábitat de numerosas especies, así como el hábitat de desove de peces [3]. Por ello, se han llevado a cabo investigaciones mediante simulación computacional, haciendo uso de un conjunto de correlaciones experimentales de la exposición y respuesta de peces vivos ante posibles colisiones con los álabes de una turbina hidrocínética horizontal en funcionamiento, cuyos resultados han mostrado una tasa de supervivencia mayor al 96 % en todos los escenarios analizados, que igualan o incluso superan tasas de supervivencia conocidas para turbinas de centrales hidroeléctricas convencionales [4].

Otras probables consecuencias negativas ambientales son la lixiviación de contaminantes como pinturas y lubricantes, contaminación acústica y contaminación producida por campos electromagnéticos, todos ellos producidos por líneas de transmisión. Además, hay que tener en cuenta que las consecuencias por alteraciones en los ríos y sus respectivos ecosistemas pueden afectar a una fuente de alimentación de vital importancia en zonas rurales en desarrollo [3].

2.3.- Componentes de una turbina hidrocínética

Las turbinas hidrocínéticas presentan ciertas similitudes con las turbinas eólicas en cuanto a componentes. A pesar de esto, al utilizar distinto fluido de trabajo, el diseño de dichos componentes puede variar.

Entre los componentes a destacar se encuentran las palas, la caja reductora y el generador, entre otros. (Ilustración 1)

Palas: por analogía y por diferenciar de las alas de los aerogeneradores, también se les llama hidroalas. Presentan una geometría hidrodinámica la cual permite utilizar la fuerza de sustentación que produce el flujo de agua a su alrededor, generando una diferencia de presiones entre la partes superior e inferior de la pala. El movimiento de las palas produce el giro del rotor, el cual traslada dicho giro a la caja reductora (Ilustración 2).

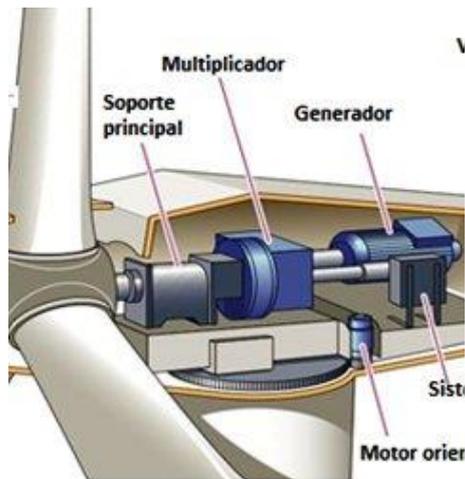


Ilustración 1. Partes de una turbina.



Ilustración 2. Sección de una pala

Caja reductora: se encarga de transmitir la energía producida por el giro del rotor al generador de una manera más conveniente para la generación de energía eléctrica.

Generador: transforma la energía mecánica en energía eléctrica.

2.4.- Clasificación de las turbinas hidrocinéticas

Las turbinas hidrocinéticas se pueden clasificar teniendo en cuenta distintos criterios: según su orientación respecto al flujo de agua, y según el recurso empleado. (Ilustración 8)

2.4.1- Según su orientación respecto al flujo del agua

Al comparar el eje del rotor con respecto al flujo del agua, se clasifican en turbinas de flujo axial y turbinas de flujo cruzado [5].

Flujo axial:

La aplicación de este tipo de turbina se presenta con mayor frecuencia en convertidores que utilizan las corrientes oceánicas para la generación. Desde el punto de vista conceptual y de diseño, son similares a las turbinas de generación eólica.

El eje del rotor en este caso es paralelo a la corriente de agua. A su vez, las corrientes se clasifican dependiendo de la velocidad que genera el mayor o menor número de álabes (rápidas de máximo 3 álabes o lentas de máximo 24 álabes). La estructura puede estar abierta o canalizada, tal y como se puede observar. (Ilustración 3), (Ilustración 4).



Ilustración 3. Turbinas hidrocineéticas de flujo axial con estructura abierta.



Ilustración 4. Turbina hidrocineética de flujo axial con estructura cerrada.

Flujo cruzado:

Son turbinas con el eje perpendicular a la corriente de agua. Dentro de las turbinas de flujo cruzado, se puede distinguir entre turbinas de eje horizontal y turbinas de eje vertical.

Eje horizontal:

Están constituidas por un rotor que se asemeja a un tambor, con una sección rectangular de boquilla alargada, que es usada para dar dirección a la corriente del agua contra las paletas, las cuales se curvan de forma cilíndrica. (Ilustración 5)

Este tipo de turbina tiene mejor aplicación en flujos largos de agua y cabezas bajas, por cuanto permiten que el agua fluya en una primera etapa, hacia el interior de las cuchillas y en una segunda cruzando de dentro hacia fuera. La variación del flujo entre las dos etapas genera pérdidas significativas de choque, razón por la cual este tipo de turbinas es menos eficiente que las convencionales [6].



Ilustración 5. Turbina de flujo cruzado y eje horizontal.

Eje vertical:

El eje de rotación de este tipo de turbina es perpendicular a la dirección de la corriente de agua y a la superficie, disposición que facilita la colocación de los demás mecanismos requeridos para la generación de energía (generador, caja de engranajes, cojinetes) sobre el nivel del agua [7].

Se puede distinguir distintos tipos de turbinas de eje vertical: Darrieus, SC-Darrieus, H-Darrieus, Gorlov y Savonius (Ilustración 6).

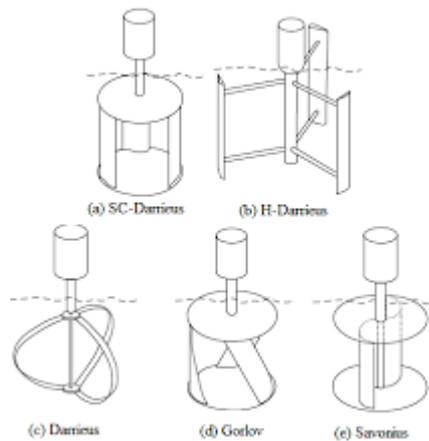


Ilustración 6. Tipos de turbinas hidrocineéticas de eje vertical.

GORLOV

Las turbinas hidrocineéticas Gorlov, fueron desarrolladas en la época de los 90 por el profesor Alexander M. Gorlov en Northeastern University. Su característica principal es su rotor helicoidal, que fue originalmente diseñado para usarse en riadas. Su ventaja con respecto a la tradicional turbina Darrieus, es que reduce la ondulación que se produce en los álabes y que su forma es más amigable con la vida marina que el resto de las turbinas verticales. Investigaciones últimas indican un alto rendimiento de dichas turbinas [8].

Desde el punto de vista medioambiental, una de las ventajas de este tipo de turbina es la seguridad que presenta para los peces en su paso por el flujo de agua, puesto que este tipo de turbina es fácilmente detectable y evitable. Además, en caso de colisionar con alguna de las palas, el pez lo haría con el extremo de ataque, grueso y redondeado, por lo que tan solo provocaría el desplazamiento del animal sin daño físico [8].

En la Ilustración 7 se muestra, en primer lugar, una turbina gorlov ya fabricada y, en segundo lugar, el modelo de una instalación de generación de dos turbinas hidrocineéticas gorlov posicionadas en paralelo.

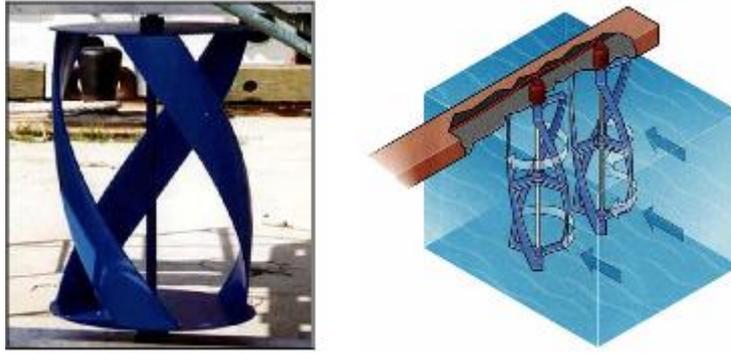


Ilustración 7. Turbina hidrocínética Gorlov.

2.4.2.- Según el recurso empleado

Según el recurso empleado, se pueden distinguir varios tipos (Ilustración 8):

- De río: aprovecha la corriente del agua.
- De marea: se suelen ubicar en estuarios.
- Oceánicas: aprovechan las corrientes marinas.

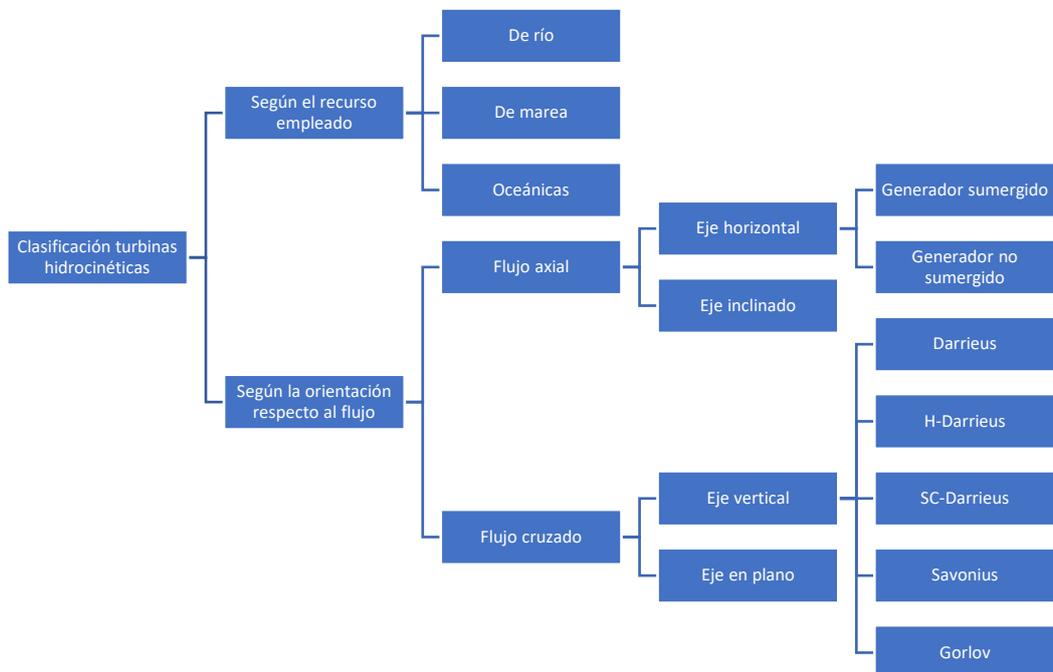


Ilustración 8. Tipos de turbinas hidrocínéticas.

2.4.3.- Ejemplos de turbinas hidrocinéticas comerciales

Ocean Renewable Power Company: compañía americana, desarrolla turbinas hidrocinéticas de río, de marea y oceánicas, como, por ejemplo, la RivGen, de flujo cruzado, la cual llega a producir 80 kW (Ilustración 9).



Ilustración 9. Turbina RivGen.

Marine Current Turbines: empresa perteneciente a Siemens, desarrolla turbinas hidrocinéticas de corrientes de marea. Por ejemplo, la turbina de flujo axial SeaGen, la cual llegó a una potencia nominal de 1,2 MW, entregando un total de 11,6 GWh a la red entre los años 2008 y 2019. El prototipo anterior, SeaFlow, llegó a una potencia nominal de 300 kW (Ilustración 10).



Ilustración 10. Turbina SeaFlow y Turbina SeaGen.

Orbital Marine Power: compañía escocesa, desarrolla turbinas hidrocínéticas de marea, como el modelo Orbital O2, el cual llega a una potencia de 2 MW (Ilustración 11).

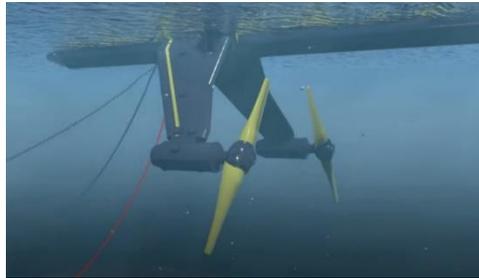


Ilustración 11. Turbina Orbital O2.

ATMB marine: empresa francesa especializada en productos para yates. Desarrolla turbinas hidrocínéticas para autoabastecimiento como el modelo Sail Gen, el cual puede proporcionar una potencia de 300 W. Esta turbina aprovecha la corriente de agua producida por el arrastre de la embarcación. (Ilustración 12), (Ilustración 13).



Ilustración 12. Turbina Sail Gen.



Ilustración 13. Turbina Sail Gen sumergida.

3.- PROCESO DE MODELIZADO

3.- PROCESO DE MODELIZADO

Para el dimensionamiento de la turbina (Ilustración 14) se ha tenido en cuenta las dimensiones del canal de ensayo, el cual cuenta con una anchura de 25 cm y una altura de 40 cm.

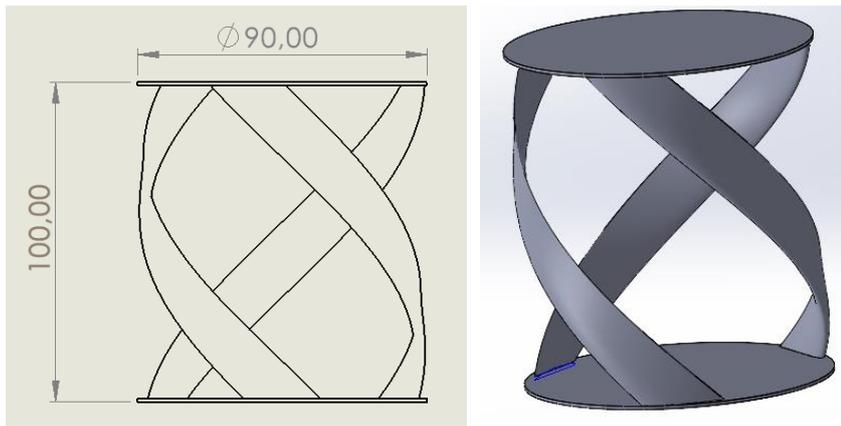


Ilustración 14. En la izquierda, vista de alzado de la turbina gorlov acotada en mm, y la derecha, vista en 3D del modelo.

El proceso de modelizado de todas las turbinas que se diseñan en este trabajo es similar, solo cambia el ángulo de orientación de la pala.

En la turbina se pueden distinguir dos partes: las bases o placas circulares inferior y superior, y las palas.

Las bases, constan de un diámetro de 90 mm y un espesor de 1 mm. Se sitúan centradas y paralelas entre sí a una distancia de 98 mm, la altura de las palas.

Para las palas, se ha utilizado el perfil NACA 4415, que es un perfil aerodinámico asimétrico muy empleado en aerogeneradores, pero que también presenta eficientes resultados en hidrodinámica.

La longitud de la cuerda del perfil de la pala es de 24 mm. Como en Matlab daba una longitud de pala de 1 mm (Ilustración 15), se ha escalado a 24 mm.

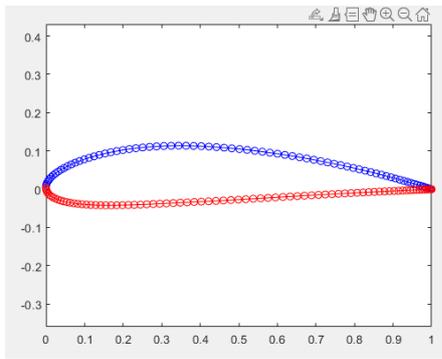


Ilustración 15. NACA 4415 generado en Matlab.

El centro de la base de la pala se sitúa a una distancia de 41,32 mm del centro de la base de la turbina, y para definir los ángulos de orientación (86° , 88° y 90°) se tiene como referencia el ángulo formado entre la cuerda del perfil de la pala, y el radio que pasa por el centro del perfil de la pala. Véase en la Ilustración 16 y en la Ilustración 17. Dichos ángulos de orientación corresponden a los ángulos de ataque 4° , 2° y 0° , respectivamente.

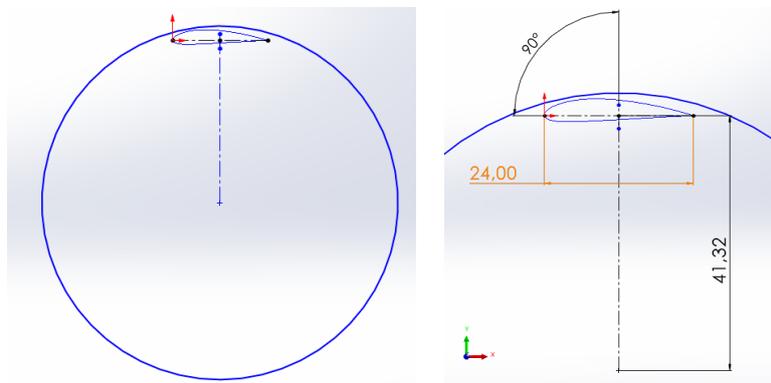


Ilustración 16. Posicionamiento de una pala en la base de la turbina.

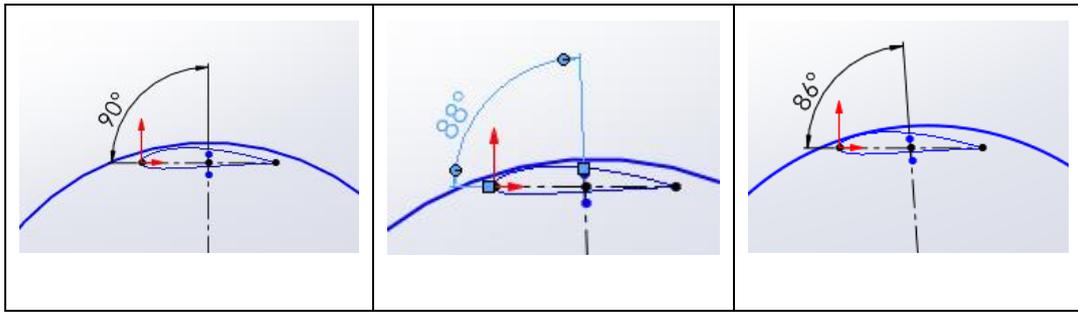


Ilustración 17. Distintas configuraciones según el ángulo de orientación de la pala: 90°, 88° y 86°.

Para la generación del cuerpo de la pala se utiliza la función *Hélice/Espiral* de SolidWorks. Ésta se configura con una altura de 98 mm, un giro total de 0.375 revoluciones (135°) (en diseños anteriores, se probó con 180°, lo que hacía que la turbina no lograra estabilizarse), paso constante y giro en sentido horario. Véase la Ilustración 18.

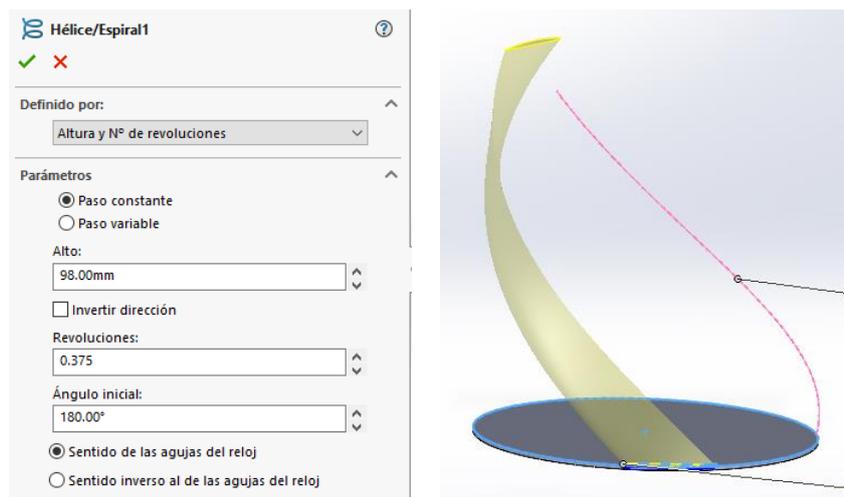


Ilustración 18. Revolución de una pala.

La generación de las dos palas restantes se realiza mediante una matriz circular de la pala ya generada. Como se puede apreciar en la Ilustración 19, estas palas están distribuidas de manera equidistante entre sí a lo largo de los 360°.

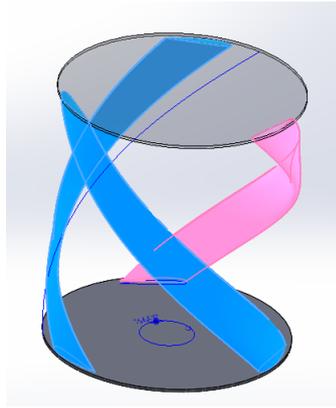
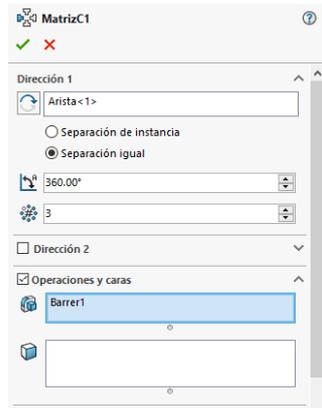


Ilustración 19. Matriz generadora de las tres palas.

4.- SIMULACIÓN Y ANÁLISIS

4.- SIMULACIÓN Y ANÁLISIS

Durante este capítulo se va a realizar una descripción al detalle del proceso seguido para la simulación y el análisis de la turbina de palas fijas, incluyendo cómo se configura una simulación paso a paso y las simulaciones previas realizadas para seleccionar el tamaño de elemento óptimo, a partir del cual se realizará un diseño de experimentos para encontrar el mejor punto de funcionamiento de la turbina. Con estos datos, se desarrollan finalmente simulaciones en 3D.

4.1.- Simulaciones previas. Estudio de convergencia

El primer paso para el estudio correcto y eficiente de la turbina consiste en la selección del tamaño de elemento que arrojará unos resultados óptimos en relación precisión-tiempo de simulación. A fin de cuentas, los programas de CFD son programas de análisis por elementos finitos, y cuanto menor sea el tamaño del elemento, mayor precisión se obtendrá en los resultados, pero también será mucho mayor el tiempo necesario para realizar las simulaciones [9].

De esta manera, se han realizado 5 simulaciones, todas con la misma altura y velocidad para el agua, pero variando los tamaños de elemento. Una vez obtenidos los resultados, se ha realizado un estudio de convergencia sobre los valores extraídos velocidad angular de la turbina, atendiendo a su valor medio dependiendo del número de elementos presentes. Dado que poner un tamaño de elemento fijo fino en todo el canal provocaría una cantidad muy grande de elementos, las simulaciones se han hecho con remallado, partiendo de un tamaño de elemento mayor a uno más fino en las zonas de mayor interés de estudio. Además, se ha creado una región de remallado englobando la turbina, con un tamaño de elemento fino e igual al tamaño más fino de remallado en toda la región. De esta manera se permite ahorrar tiempo

sin tener que suponer una pérdida significativa de precisión. Las simulaciones son: 8 mm - 2 mm, 8 mm – 1 mm, 4 mm - 2 mm, 4 mm - 1 mm y 3 mm - 1,5 mm, donde el número mayor es el RS (Resolve Scale), y el pequeño es el TRS (Target Resolve Scale) y el tamaño del elemento de la región de remallado.

4.1.1.- Configuración de una simulación

El proceso de configuración de una simulación es exactamente el mismo para todas, con la salvedad del remallado. A continuación, se describe el proceso paso por paso:

Enviroment:

El entorno es la primera pestaña por configurar en las simulaciones. Se puede elegir entre simulación en 2D y 3D, donde para estas simulaciones se ha escogido el modelo en 3D (debido a la asimetría de la turbina). El tipo de flujo se puede configurar como multifase, superficie libre o monofase, en función de los fluidos implicados, siendo en este caso superficie libre (flujo de agua y aire en condiciones normales por encima). El tipo de análisis será externo, ya que no interesa lo que suceda dentro de la estructura, y el modelo térmico será isotérmico, dado que no interesa el estudio de la temperatura. A continuación, el programa configura por defecto la gravedad como una aceleración externa, que el entorno de análisis es un canal de agua, que el área de referencia es la frontal (observada en el sentido positivo del eje X) y permite establecer las dimensiones del canal de agua (múltiplos del tamaño de elemento, RS), su posición (se coloca la turbina ligeramente adelantada para observar la duración de la perturbación que origina en la corriente y su estabilización), la altura de agua y de la generación de olas y su velocidad. Para todas las simulaciones, se tomará una velocidad del agua de 1 m/s y para estas simulaciones previas una altura de 16 cm (la representación de la altura de agua parte desde el origen, el cual en este caso coincide con la solera del canal) (Ilustración 20).

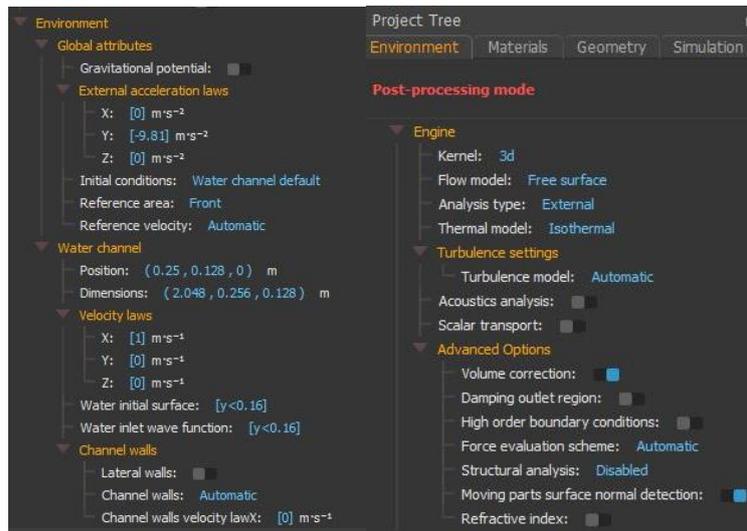


Ilustración 20. Configuración de la pestaña *Enviroments*.

Materials:

En esta pestaña se permite la configuración de los diferentes fluidos que están en la simulación. En este caso, no es necesario modificar nada ya que por defecto vienen los datos del agua (Ilustración 21).

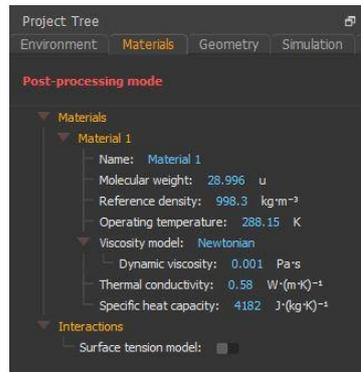


Ilustración 21. Configuración de la pestaña *Materials*.

Geometry:

En esta pestaña se pueden configurar los diferentes aspectos de la geometría presente en las simulaciones. Para la turbina de palas fijas, la geometría es simple de configurar. Se comienza importando un archivo ".step", previamente exportado desde SolidWorks, y se importa como *única geometría*, es decir, aunque el ensamblaje esté compuesto por varias piezas,

el programa las detectará como unidas entre sí, formando una única pieza. (Ilustración 22)

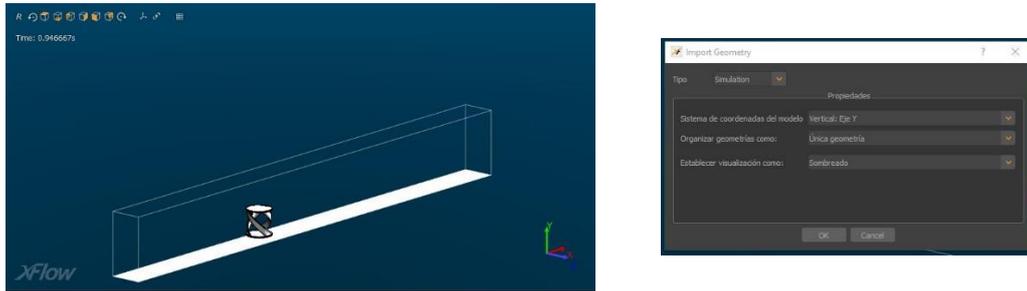


Ilustración 22. Importación de la geometría y su visualización junto a las dimensiones del canal.

Una vez importada la geometría, ésta se puede renombrar si se desea, y se entra a configurar su comportamiento, siendo ésta una de las configuraciones más importantes en cuanto a tiempo de cálculo. Se distingue entre comportamiento fijo, en el que la pieza no se moverá de su posición inicial, teniendo el menor tiempo de cálculo posible; comportamiento como *enforced* o forzado, por el cual el movimiento del cuerpo vendrá dado por leyes de movimiento y la jerarquía que el usuario establezca, independientemente del entorno (tiempo de cálculo medio); y, por último, comportamiento como *rigid body dynamics*, o dinámica de sólido rígido. Con este tipo de comportamiento, se pueden establecer posiciones, velocidades y momentos iniciales para la pieza, pero a continuación su movimiento vendrá marcado únicamente por el efecto del entorno y por las fuerzas o momentos externos que el usuario configure. Además, se pueden establecer restricciones a los movimientos de rotación y traslación. Esta configuración, al depender de la evolución del entorno, que por otro lado se ve afectado por la pieza, es la más costosa de analizar. Existen otros tipos de configuraciones, pero su importancia es reducida, por lo que no se entran a describir (Ilustración 23).

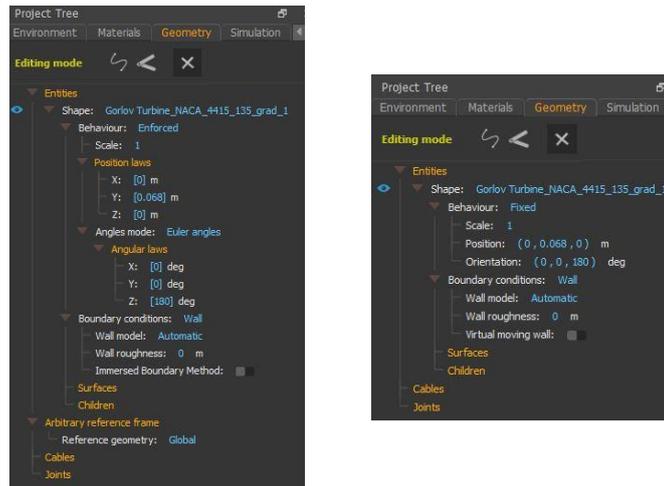


Ilustración 23. Configuraciones fixed y enforced.

En estas simulaciones, la turbina se importará como una sola pieza que se comporte como *rigid body dynamics*. No tendrá ninguna condición inicial y su densidad será de 500 kg/m^3 (polímero). Al introducir la densidad, el programa calcula automáticamente otros parámetros como la masa y los momentos de inercia. Posteriormente, se deben configurar el coeficiente de restitución (define la elasticidad del material en los choques) y el rozamiento estático y dinámico de la pieza. En este caso, no es necesario modificar los datos por defecto. En cuanto a las restricciones del movimiento, se ha fijado la turbina para evitar su traslación y se le ha permitido la libre rotación en el eje vertical Y. Además, se ha introducido el peso de la turbina como una fuerza externa en el eje Y negativo. Cabe destacar también que el programa incluye dos tipos de ejes de coordenadas: los globales, situados en el origen, y los locales, que pueden trasladarse mediante coordenadas del centro de masas. Para las simulaciones de esta turbina, los ejes locales y globales coinciden en el origen (Ilustración 24).

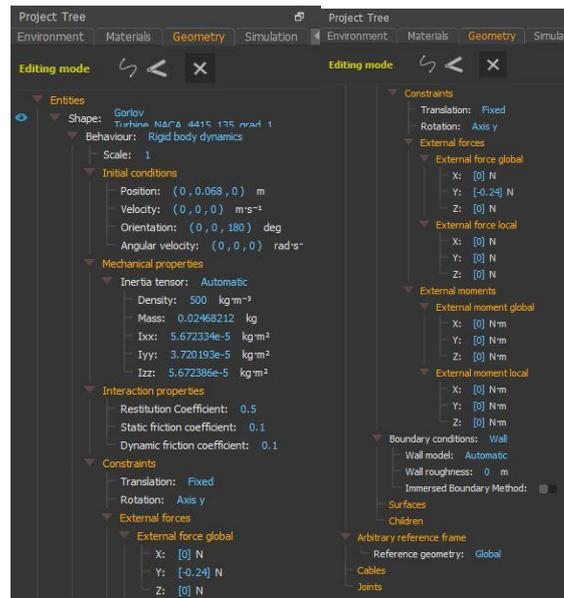


Ilustración 24. Configuración Rigid body dynamics.

Simulation:

En la pestaña *simulation* se configuran los datos referentes a la simulación y la manera en que se va a realizar. Se comienza por el tiempo de simulación, que se ha establecido como 4 segundos para todas las simulaciones, ya que es tiempo suficiente para que la turbina se estabilice dentro del canal y dé un número de vueltas aceptable para la toma de datos. También se puede configurar el modo de toma de cada incremento de tiempo y el Courant (parámetro adimensional que indica la proporción de elemento que recorre el fluido en cada incremento). A continuación, en la escala de resolución se establece el tamaño de elemento, que será la principal diferencia en cada una de las siguientes simulaciones. También se permite modificar el número de incrementos o pasos que el programa va a representar en el cálculo final, pese a que él calcule muchos más internamente, estableciendo su frecuencia. En este caso, se ha establecido que en los 4 segundos eran necesarios 300 incrementos, por lo que la frecuencia necesaria será de 75 Hz. Para establecer una transición entre diferentes tamaños de elemento, se debe activar el algoritmo de refinamiento, que puede seguir dos modelos posibles. Para estas simulaciones se ha elegido el modelo de paredes cuasi-estáticas, que resulta más intuitivo de utilizar. Después de activar esta opción, se indica el nuevo

tamaño de elemento, que se aplicará en los alrededores de la geometría objetivo y en el cambio de fase. Por último, se establecen los niveles de transición para el nivel de refinamiento en 6 para una transición suave. Además, en esta pestaña se crea una región de remallado con el tamaño de elemento más fino e igual en toda la región. (Ilustración 25 e Ilustración 26).

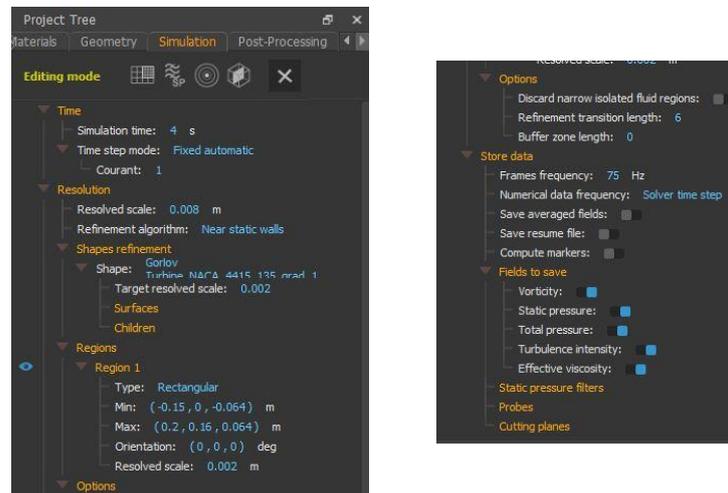


Ilustración 25. Configuración de la pestaña Simulation.

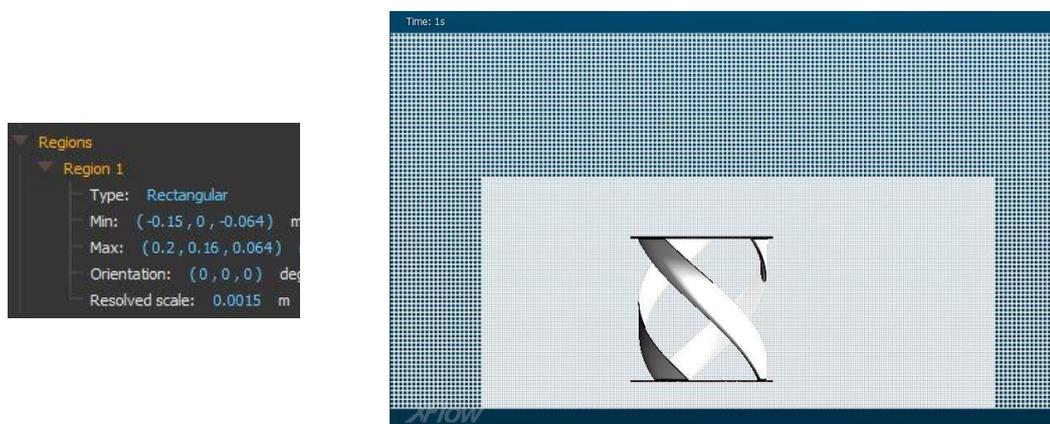


Ilustración 26. Región de remallado.

Post-Processing

En esta pestaña se pueden configurar distintas opciones de postprocesado. En estas simulaciones se ha utilizado las opciones de planos de corte, los cuales por defecto se sitúan en la sección central del canal, y permiten visualizar diferentes propiedades del fluido como velocidad, presión estática, presión total, viscosidad, vorticidad e intensidad de turbulencias, entre otras. (Ilustración 27)

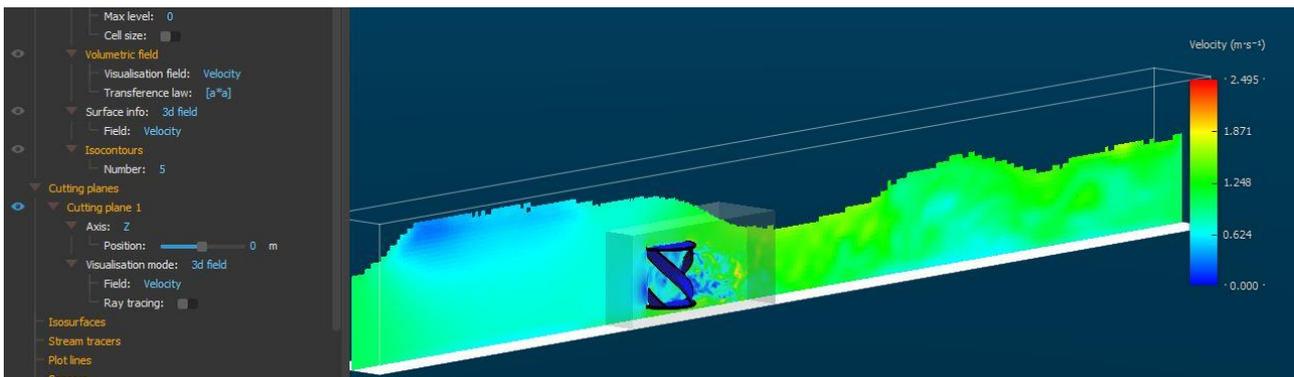


Ilustración 27. Menú de la pestaña Post-Processing y plano de corte mostrando la velocidad del agua en un instante determinado de la simulación.

4.1.2.- Resultados de las simulaciones previas. Estudio de la convergencia.

Región de remallado:

Lo ideal sería poner todo el canal con un mismo tamaño de elemento muy pequeño que aportase un cálculo con mucha precisión. Pero el problema de esto es que conllevaría un número muy grande de elementos y como consecuencia un tiempo de cálculo muy grande. Por ello se establece una serie de niveles a razón de 1/2, empezando por un tamaño de elemento grande y terminando con un tamaño de elemento pequeño en las proximidades de la turbina. El problema es que se generan zonas en el interior de la turbina en las que el tamaño de los elementos no es del mismo nivel, y

por tanto no tienen la misma precisión de cálculo, siendo ésta una zona donde la precisión es importante. En la Ilustración 28 se aprecia los distintos niveles de malla en el interior de la turbina.

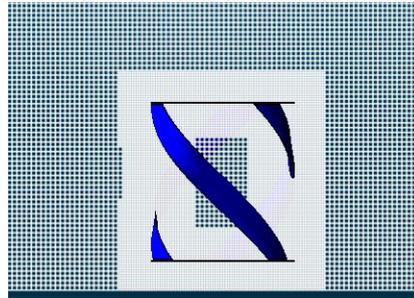


Ilustración 28. Visualización de los dos niveles de malla: 3 mm y 1,5 mm.

Se procede a crear una región en el lugar donde nos interesa que el cálculo tenga mayor precisión en la que el tamaño de elemento sea pequeño y de igual valor que el nivel mínimo de mallado, mientras que el resto del canal tendrá un tamaño de elemento mayor, disminuyendo así el número de elementos y agilizando los cálculos de la simulación.

Se ha considerado una región con forma de prisma rectangular que no solo abarque la totalidad de la turbina, sino que también abarque las proximidades a la entrada y a la salida de la turbina, puesto que lo que ocurre en estas zonas es importante para el comportamiento de la turbina y por tanto se precisa un cálculo minucioso. (Ilustración 29)

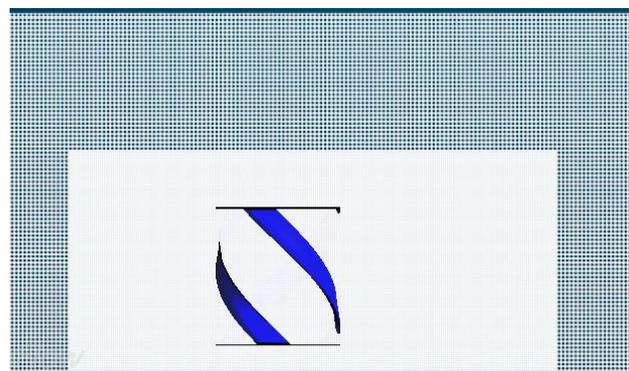
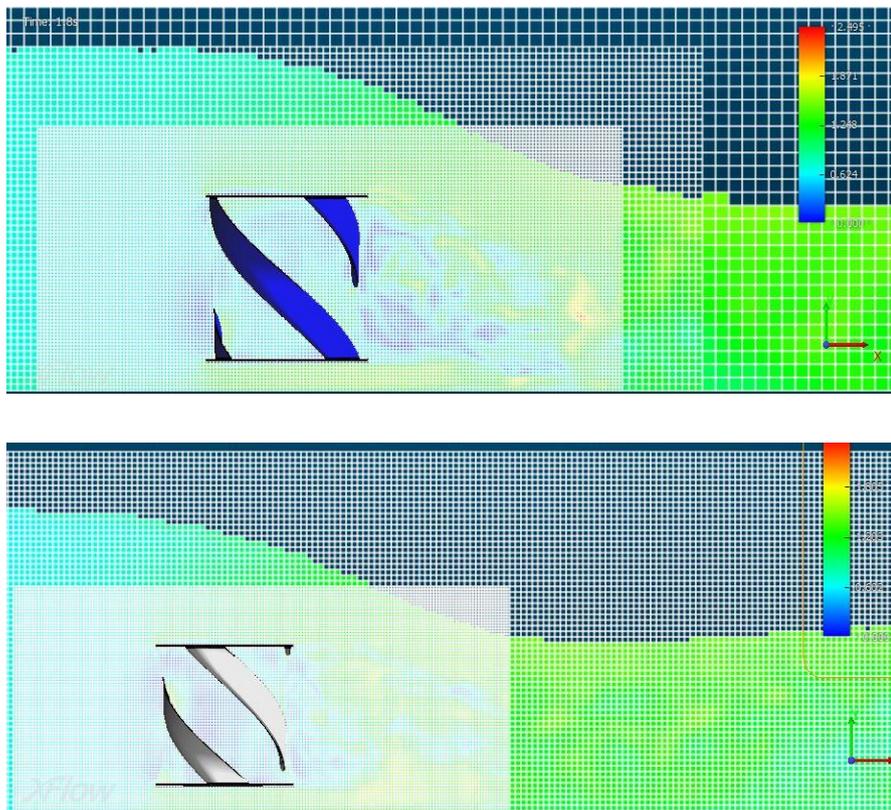


Ilustración 29. Región de remallado con tamaño de elemento 1,5 mm.

En la Ilustración 29 se puede observar que la turbina no se encuentra centrada en la región de remallado, sino que se sitúa desplazada ligeramente a la izquierda. Se ha colocado de esta forma, de modo que la zona de la región situada a la derecha de la turbina sea mayor, para tener en consideración las posibles perturbaciones causadas por la turbina al flujo del agua a su paso por ésta.

Tras haber realizado las simulaciones previas, se han analizado los resultados para, como ya se ha comentado anteriormente, establecer un valor de tamaño de elemento óptimo para las simulaciones. A continuación, se muestra en imágenes las distintas configuraciones de RS y TRS probadas para obtener la curva de convergencia. (Ilustración 30)



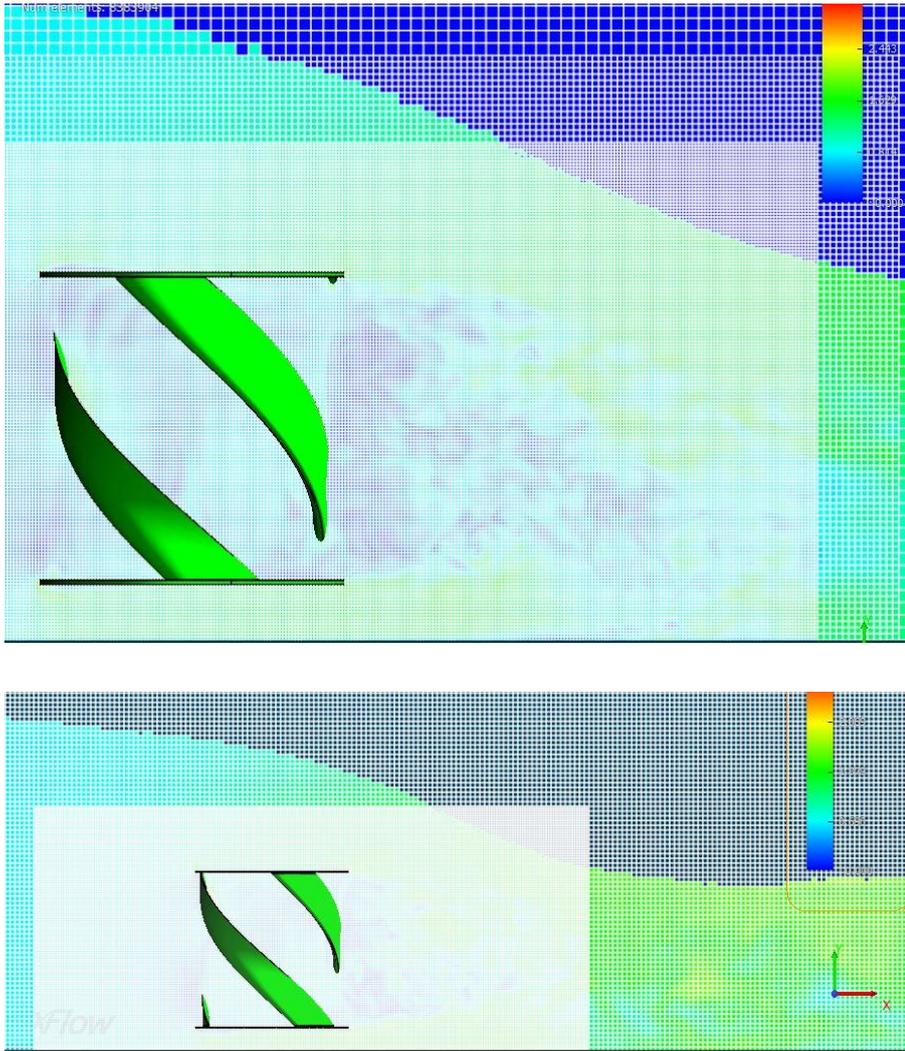


Ilustración 30. Diferentes configuraciones de RS-TRS, en orden descendente: 8 mm - 2 mm, 4 mm - 2 mm, 4 mm - 1 mm, 3 mm - 1,5 mm.

El primer parámetro que se ha tenido en cuenta para dar por válidas las simulaciones ha sido el parámetro de estabilidad. Este parámetro se encarga de reflejar que el cálculo es correcto a nivel de resolución de las ecuaciones para cada elemento, pero no debe considerarse como determinante de que una simulación sea correcta o no, ya que puede que las condiciones de contorno no sean correctas y, por lo tanto, el modelo no se comporte acorde a la realidad. Para hidrodinámica, se consideran aceptables valores muy bajos, que puntualmente pueden llegar a 0,5 [9].

Las siguientes imágenes muestran los gráficos del parámetro de estabilidad de las distintas configuraciones RS-TRS utilizadas. (Ilustración 31)

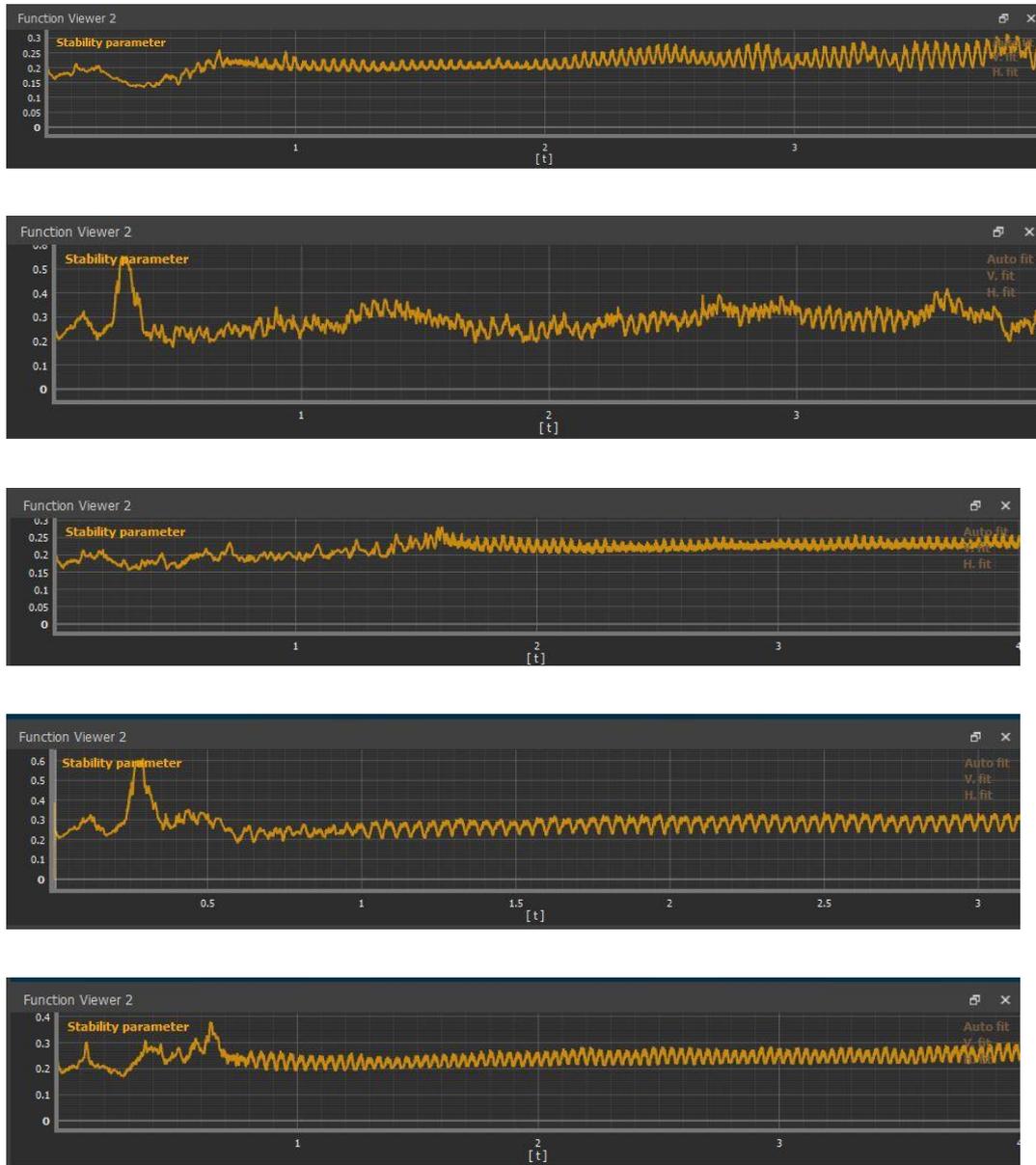


Ilustración 31. Gráficos del parámetro de estabilidad de diferentes configuraciones de RS-TRS, en orden descendente: 8 mm - 2 mm, 8 mm - 1 mm, 4 mm - 2 mm, 4 mm - 1 mm, 3 mm - 1,5 mm

En los gráficos anteriores puede apreciarse como en ninguna de las configuraciones RS-TRS utilizadas, el parámetro de estabilidad aporta valores considerablemente altos, excepto en las configuraciones “4 mm - 1 mm” y “8 mm - 1 mm”, en las que puntualmente alcanza un valor ligeramente superior

a 0,5 en la zona transitoria de la simulación. Por ello, en cuanto al parámetro de estabilidad, no se puede rechazar ninguna de estas simulaciones.

Una vez visto que las configuraciones anteriores pasan el filtro del parámetro de estabilidad, se ha realizado un análisis sobre la velocidad de rotación de la turbina en vacío. Para ello, se han extraído los resultados de la velocidad de rotación calculados por el programa XFlow y se ha calculado su media y la desviación estándar en Excel, desechando los resultados pertenecientes al tiempo transitorio. La turbina se considera estabilizada a partir del segundo 1, como se puede observar en la Ilustración 32.

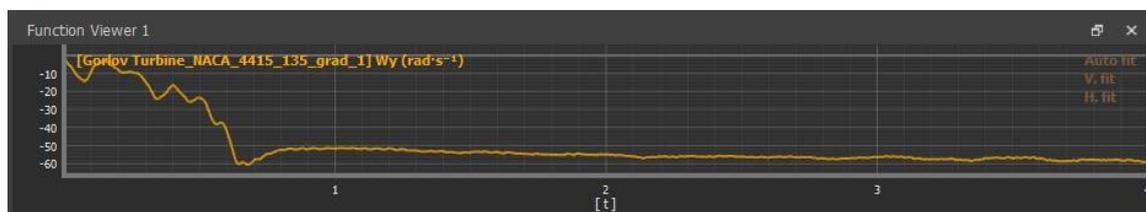


Ilustración 32. Velocidad angular de la turbina en vacío.

Una vez calculado la media y la desviación estándar de la velocidad de rotación de todas las simulaciones anteriormente comentadas (Tabla 1), se ha generado un gráfico representando la velocidad angular de rotación media frente al número de elementos de la simulación, así como la desviación estándar de cada simulación (Ilustración 33). Atendiendo a ésta y al tiempo que conlleva cada simulación, se ha tomado una decisión.

SIMULACIÓN		Nº ELEMENTOS	VELOCIDAD ANGULAR MEDIA (rad/s)	TIEMPO SIMULACIÓN
RS (mm)	TRS (mm)			
8	2	1.082.624	60,809	1d 09:15:03
4	2	1.837.056	60,726	2d 03:47:15
3	1,5	4.392.235	56,871	4d 09:23:03
8	1	7.596.544	50,158	15d 07:15:42
4	1	8.350.976	50,072	18d 08:35:21

Tabla 1. Configuraciones RS-TRS ordenadas de menor a mayor según el nº de elementos.

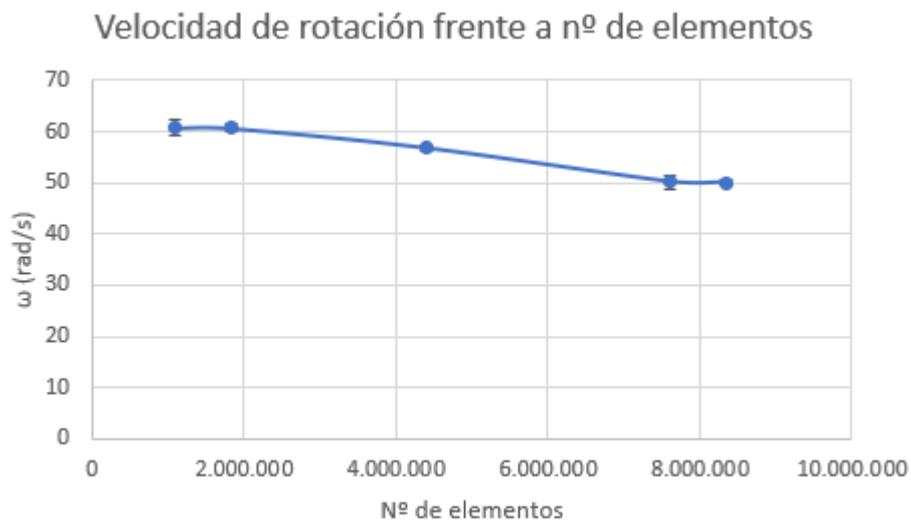


Ilustración 33. Curva de convergencia de la velocidad de rotación.

A partir de este gráfico se ha analizado la velocidad de rotación teniendo en cuenta el valor medio y su desviación frente al número de elementos. En el gráfico de la Ilustración 33 se puede observar cómo los puntos forman una curva decreciente que, conforme aumenta el número de elementos comienza a estabilizarse en 50 rad/s aproximadamente. Atendiendo a esto, lo ideal sería escoger unos valores de RS y TRS que aportasen dicho valor. El problema es que esto sucede a partir de la simulación que contiene más de 7 millones de elementos, lo cual conlleva un tiempo de cálculo para el ordenador de más de 15 días, por lo que sabiendo que se comete cierto error de precisión en los cálculos, se debe escoger una combinación de RS y TRS de las que aparecen en la Tabla 1 que se ajuste a un tiempo de cálculo razonable.

En cuanto a la desviación estándar de la velocidad de rotación, en el gráfico de la Ilustración 33 se puede observar que es mínimo, deduciendo así que una vez la turbina alcanza cierta velocidad y se estabiliza, la velocidad varía muy poco.

Por razones de tiempo de cálculo, se escoge la configuración de RS 3 mm y TRS 1,5 mm para las posteriores simulaciones, en la que la velocidad angular media de rotación de la turbina en vacío es 56,871 rad/s y la cual conlleva un tiempo de cálculo de unos 4 días.

4.2.- Comportamiento de la turbina según el ángulo de orientación de la pala.

En el presente apartado se trata de analizar el comportamiento en funcionamiento de los modelos de turbinas descritos en el capítulo 3 bajo la acción de un par externo impuesto en la dirección del eje de rotación de la turbina y en sentido opuesto al giro de ésta, provocado por el flujo de agua.

Dicho par de frenado es el par que ejercería el generador acoplado al eje de la turbina, el cual permite extraer energía mecánica de la turbina para posteriormente transformarla en energía eléctrica.

Si se introduce el par desde el momento inicial de la simulación la turbina no logra moverse, y por ello el par de frenado se introduce mediante una función escalón, siendo nulo hasta el momento en que la turbina logra alcanzar su velocidad de rotación máxima. En este momento se activa el par y comienza a frenar la turbina hasta que se estabiliza con una nueva velocidad de rotación.

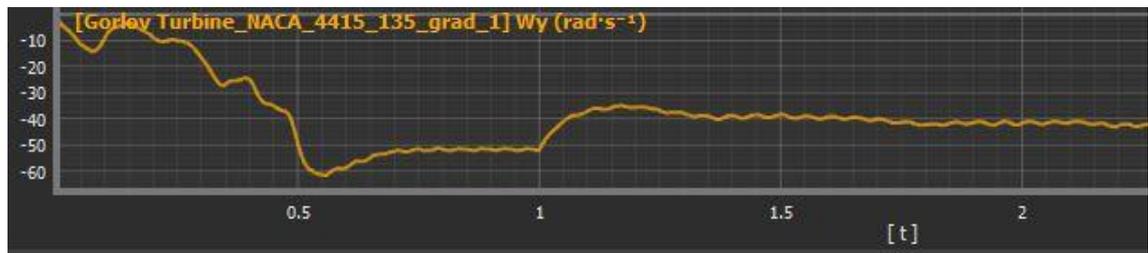


Ilustración 34. Gráfico de la velocidad de rotación de la turbina.

En la Ilustración 34 se puede apreciar como la turbina se estabiliza en el segundo 1 y después se activa el par frenándola hasta alcanzar una velocidad estable de unos 40 rad/s en el segundo 1,5.

Para poder decidir que orientación del perfil de la pala es mejor, se considera realizar una serie de simulaciones con cada modelo de turbina, variando el par de frenado en cada simulación, de manera que, una vez realizadas, con los resultados se pueda obtener la curva par- velocidad para cada modelo de turbina.

Se han probado diferentes pares, hasta ver uno que hiciese girar la turbina en sentido contrario al que gira cuando lo hace libre, por empuje del agua. De esta forma se ha obtenido el par de freno máximo que soporta cada modelo de turbina analizado.

Una vez realizadas las simulaciones, se han extraído los resultados de la velocidad de giro calculados en XFlow y se ha calculado su media mediante

una hoja de Excel. Y multiplicando el par de freno introducido con el valor medio de la velocidad de rotación, se ha obtenido la potencia extraíble de la turbina.

En la Tabla 2 se recogen los resultados de dichas simulaciones.

90 °			88 °			86 °		
Par (N·m)	W (rad/s)	Potencia (W)	Par (N·m)	W (rad/s)	Potencia (W)	Par (N·m)	W (rad/s)	Potencia (W)
0	81,106	0	0	87,323	0	0	77,701	0
0,018	55,069	0,991	0,016	65,896	1,054	0,012	63,103	0,756
0,02	52,107	1,042	0,018	62,462	1,124	0,015	59,903	0,899
0,023	47,469	1,092	0,019	60,947	1,158	0,016	58,036	0,928
0,0245	45,037	1,103	0,0205	58,734	1,204	0,018	53,5	0,963
0,026	41,837	1,088	0,022	56,073	1,234	0,02	49,273	0,986
			0,025	50,146	1,254	0,023	43,142	0,989

Tabla 2. Resultados de las simulaciones. Velocidad de rotación y potencia de la turbina.

Con los datos de la Tabla 2 se construyen los siguientes gráficos para visualizar mejor los resultados:

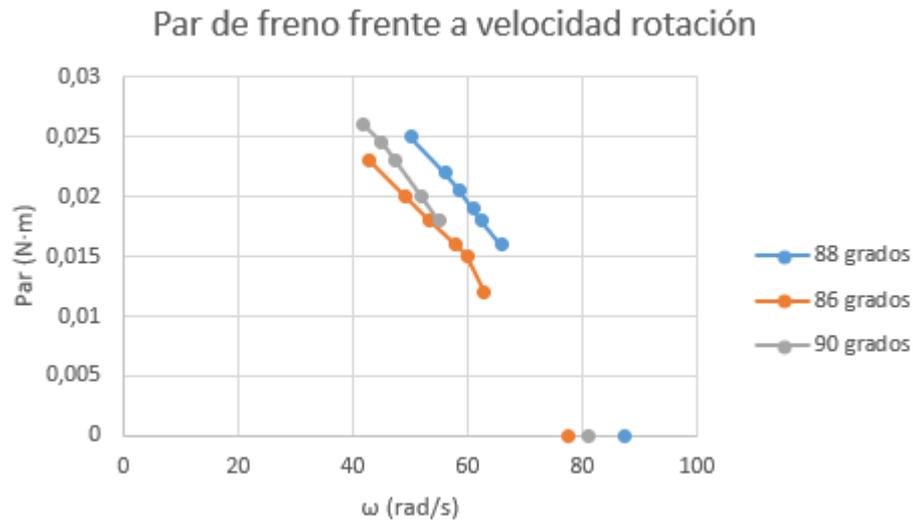


Ilustración 35. Gráfico Par Vs Velocidad de rotación.

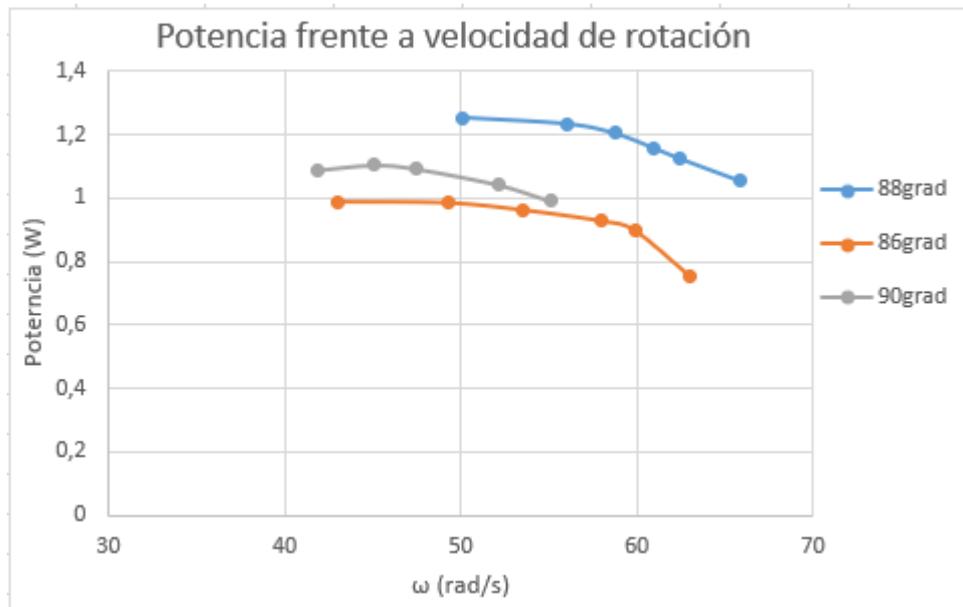


Ilustración 36. Gráfico de Potencia Vs Velocidad de rotación.

Del gráfico mostrado en la Ilustración 35, se pueden observar varias cosas.

La primera de ellas es la velocidad de la turbina cuando gira libre, sin par de freno. En el gráfico se puede apreciar que la que mayor velocidad alcanza es la turbina cuyas palas están orientadas con un ángulo de 88 grados (87,323 rad/s), seguida de la turbina cuyas palas están orientadas con un ángulo de 90 grados (81,106 rad/s) y, por último, la que menos velocidad alcanza, la

turbina cuyas palas están orientadas con un ángulo de 86 grados (77,701 rad/s).

Observando las curvas de par, se puede apreciar como la velocidad de rotación disminuye conforme aumenta el par de freno hasta un punto en el que, si aumentase el par, ésta dejaría de girar.

En cuanto al par máximo, se puede observar que la turbina de 90 grados soporta el máximo par (0,026 N·m), de entre los 3 modelos de turbina, seguida de la de 88 grados con un par de 0,025 N·m y por debajo queda la de 86 grados con un par de 0,023 N·m.

Sin embargo, en el gráfico de la Ilustración 36 se aprecia como a pesar de soportar más par que las otras dos, no es la que mayor potencia desarrolla. Se puede apreciar que la curva de potencia desarrollada perteneciente a la turbina de 88 grados se sitúa por encima de las otras dos curvas, teniendo el máximo en 1,254 W. Mientras que la curva más inferior pertenece a la de 86 grados.

5.- CONCLUSIONES

5.- CONCLUSIONES

Tras la realización de este Trabajo Fin de Grado, se ha conseguido, lo primero de todo, llevar a cabo una revisión bibliográfica del estado del arte sobre la tecnología hidrocínética en general, para ver que tipos de turbinas existen, clasificándolas según su modo de aplicación y el recurso empleado.

Como se pretendía imprimir en 3D la turbina para ensayarla en un canal real, se ha elegido por simplicidad, una turbina de eje vertical, ya que carecen de elementos móviles; y por eficiencia, la turbina hidrocínética gorlov.

Una vez elegido el tipo de turbina a rediseñar y el tipo de perfil de pala a utilizar (NACA 4415), se ha establecido como parámetro de diseño el ángulo de ataque de la pala.

Con esto, se han modelado mediante SolidWorks las distintas configuraciones de diseño según el parámetro de diseño establecido, y teniendo en cuenta las dimensiones del canal de ensayo.

Posteriormente se ha preparado el canal de simulación en XFlow con las dimensiones y condiciones de entorno y contorno oportunas, asemejándose a la realidad.

A continuación, se han realizado una serie de simulaciones previas para estudiar la convergencia de la velocidad angular de la turbina en vacío, y así determinar los tamaños de elemento del mallado y remallado oportunos, de manera que se obtenga un equilibrio aceptable entre precisión y tiempo de simulación. Los valores seleccionados han sido 3 mm para el RS (Resolved Scale) y 1,5 mm para el TRS (Target Resolved Scale) y la región de remallado.

Una vez establecidos los valores de RS y TRS, se han llevado a cabo una serie de simulaciones para cada configuración del modelo de turbina, variando el par de freno.

Por último, con los resultados de éstas, se ha construido el gráfico Par-Velocidad angular y Potencia- Velocidad y se ha visto la influencia del ángulo de orientación de las palas de la turbina en el par soportado y la potencia desarrollada.

6.- BIBLIOGRAFÍA

6.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Cardona Mancilla, J. Sierra del Río, E. Chica Arrieta y D. Hincapié Zuluaga, «Turbinas hidrocínéticas de eje horizontal: una revisión de la literatura,» *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 9, nº 3, p. 180, 2018.
- [2] E. Chica, F. Perez, A. Rubio-Clemente y S. Agudelo, «Design of a hydrokinetic turbine,» 2015.
- [3] J. Petrie, P. Diplas, M. Gutierrez y S. Nam, «Characterizing the mean flow field in rivers for resource and environmental impact assessments of hydrokinetic energy generation sites,» *Renewable Energy*, vol. 69, pp. 393-401, Septiembre 2014.
- [4] P. Romero- Gomez y M. C. Richmond, «Simulatin blade-strike on fish passing through marine hydrokinetic turbines,» *Renowable Energy*, vol. 71, pp. 401-413, Junio 2014.
- [5] M. J. Khan y G. Bhuyan, «Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review,» *Applied Energy*, pp. 1823-1835, 2009.
- [6] D. K. Okot, «Review of small hydropower technology,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 26, pp. 515-520, 2013.

- [7] A. H. Birjandi, Artist, *Effect of Flow and Fluid Structures on the Performance of Vertical River Hydrokinetic Turbines*. [Art]. University of Minisota, 2012.
- [8] A. Gorlov, Artist, *Helical Turbine and Fish Safety*. [Art]. Tidewalker Associates, 2010.
- [9] J. Armañanzas Goñi, Artist, *Diseño y simulación mediante CFD de una turbina hidrocínética de flujo cruzado*. [Art]. Universidad Pública de Navarra, 2020.

