

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

**FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA
PRODUCCION**

Validación numérica de una hélice toroidal para un sistema de extracción
energético empleando interacción fluidodinámica

**Proyecto Integrador
INGE-2765**

**Previo la obtención del Título de:
Ingenieros en Mecánica**

Presentado por:
Ponce Limones Ronald Yaret
Guerrero Fuentes Gabriel Andrés (L)

Guayaquil - Ecuador:
Año 2024

Dedicatoria

A **Dios**, por ser mi guía y fortaleza en cada momento de mi vida. Por darme la sabiduría, la paciencia y la perseverancia necesarias para afrontar los desafíos y alcanzar mis metas. Sin Su bendición y Su amor, este logro no habría sido posible.

A mi querida **familia**, por ser mi mayor apoyo en este camino. A mis padres, por su amor incondicional, sus sacrificios y su confianza en mí. Por enseñarme el valor del esfuerzo, la dedicación y la perseverancia. A cada uno de ellos, por su compañía, sus palabras de aliento y por motivarme a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

A todos ellos les dedico este trabajo, con profundo amor y gratitud, porque sin su apoyo inquebrantable, este sueño no se habría hecho realidad. (Ronald Yaret Ponce Limones)

Para mi familia que siempre ha dado su apoyo en incontables ocasiones durante mi vida, que con su apoyo he podido lograr este aprendizaje y encaminar este proyecto de vida.

(Gabriel Andrés Guerrero Fuentes)

Declaración Expresa

Nosotros Gabriel Andres Guerrero Fuentes y Ronald Yaret Ponce Limones acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.


La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 17 de Octubre del 2024.



Gabriel Andres Guerrero
Fuentes



Ronald Yaret Ponce
Limones

Evaluadores

Phd. Miguel Angel Quilambaqui Jara

Profesor de Materia Integradora

MSc. Carlos Andres Cuenca Cabrera

Tutor de proyecto integrador

Resumen

El presente documento analiza el diseño y simulación de una hélice de trayectoria toroidal que posee un perfil NACA 1412, usada para la extracción de energía hidro cinética en el río Quevedo. El objetivo es poder evaluar el rendimiento energético de la turbina a través del momento generado de la simulación considerando aspectos técnicos y económicos. Se desarrolló un modelo CAD en SolidWorks, dibujando la geometría del perfil haciendo uso de ecuaciones y un ángulo de ataque previamente optimizado. Se realizó un análisis del mallado e independencia de este, estableciendo una convergencia al cumplir una incertidumbre menor al 5%. Con condiciones de frontera iguales a las condiciones naturales de funcionamiento, la turbina puede generar 181 kWh por mes, abasteciendo un hogar promedio de la Costa ecuatoriana al mes. Sin embargo, al ser comparada con un modelo de trayectoria convencional y perfil NACA 4412 se observa que es menos eficiente. Finalmente, el análisis económico indica que la inversión inicial puede recuperarse en un año, mostrando que existe una viabilidad en el proyecto.

Palabras Clave: Hélice, momento, eficiente, turbina, perfil, energía.

Abstract

This document analyzes the design and simulation of a toroidal trajectory propeller with an NACA 1412 profile, used for hydrokinetic energy extraction in the Quevedo River. The objective is to evaluate the turbine's energy performance through the torque generated in the simulation, considering technical and economic aspects. A CAD model was developed in SolidWorks, drawing the profile geometry using equations and a previously optimized angle of attack. A mesh analysis and independence study were conducted, establishing convergence with an uncertainty below 5%. Under boundary conditions matching the natural operating conditions, the turbine can generate 181 kWh per month, supplying the average energy consumption of a household in the Ecuadorian coast. However, when compared to a conventional trajectory model with an NACA 4412 profile, it proves to be less efficient. Finally, the economic analysis indicates that the initial investment can be recovered within a year, demonstrating the project's feasibility.

Keywords: Propeller, torque, efficient, turbine, profile, energy.

Índice general

| | |
|--|------|
| Evaluadores..... | v |
| Resumen..... | vi |
| <i>Abstract</i> | vii |
| Índice general..... | viii |
| Índice de Figura | xiii |
| Índice de tablas | xiv |
| ÍNDICE DE PLANOS | xv |
| Capítulo 1..... | 1 |
| 1. Introducción..... | 2 |
| 1.1 Descripción del Problema..... | 3 |
| 1.2 Justificación del Problema | 4 |
| 1.3 Objetivos | 5 |
| 1.3.1 Objetivo general..... | 5 |
| 1.3.2 Objetivos específicos | 5 |
| 1.4 Marco teórico | 5 |
| 1.4.1. Matriz energética ecuatoriana | 5 |
| 1.4.2. Principios hidrodinámicos aplicados en las turbinas | 6 |
| 1.4.3 Análisis numérico para la generación de energía en un perfil | 7 |
| 1.4.4 Diseño y funcionamiento de Hélices | 10 |
| 1.4.5 Comparación y aplicaciones de tipos de Hélices..... | 13 |
| 1.4.6 Tipos de Perfiles Aerodinámicos (NACA) | 15 |
| 1.4.7 Interacción Fluidodinámica | 16 |
| Capítulo 2..... | 18 |
| 2. Metodología | 19 |
| 2.1 Diagrama de bloques del procedimiento de Diseño..... | 19 |
| 2.2 Procedimiento de validación del análisis numérico | 20 |

| | | |
|------------|--|----|
| 2.3 | Parámetros técnicos del río Quevedo | 22 |
| 2.4 | Definición de la morfología de los álabes | 23 |
| 2.4.1 | Perfil NACA 1412 | 24 |
| 2.4.2 | Características del perfil 1412 | 26 |
| 2.4.3. | Características del perfil NACA 4412 | 27 |
| 2.5 | Requisitos del diseño..... | 28 |
| 2.6 | Comparación entre hélice convencional y toroidal | 29 |
| 2.7 | Matriz Comparación de modelos de turbina | 30 |
| 2.8 | Diseño de solución | 31 |
| 2.8.1 | Selección del Modelo..... | 31 |
| 2.8.2 | Diseño del álabe | 31 |
| 2.8.3 | Selección del Perfil Aerodinámico | 31 |
| 2.8.4 | Ángulo de ataque..... | 31 |
| 2.8.5 | Selección del número de Aspas | 32 |
| 2.8.6 | Potencia mecánica requerida de la hélice | 32 |
| 2.8.7 | Diámetro de la hélice | 32 |
| 2.8.8 | Cuerda del alabe..... | 32 |
| 2.8.9 | Diseño del rotor..... | 33 |
| 2.9 | Análisis numéricos | 33 |
| 2.9.1 | Tipo de elemento..... | 33 |
| 2.9.2 | Volumen de control..... | 34 |
| 2.9.3 | Simulación computacional..... | 35 |
| 2.9.4 | Mallado | 36 |
| 2.9.5 | Malla dinámica..... | 37 |
| 2.9.6 | Independencia de malla..... | 38 |
| 2.9.7 | Cálculo de las iteraciones de la simulación | 38 |
| Capítulo 3 | | 41 |

| | |
|---|----|
| 3. Resultados y Análisis | 42 |
| 3.1 Selección de Modelo | 42 |
| 3.2 Diseño del Alabe | 42 |
| 3.3 Mallado y análisis de independencia del mallado | 43 |
| 3.4 Condiciones de frontera y cargas | 45 |
| 3.5 Iteraciones | 45 |
| 3.6 Potencia producida | 45 |
| 3.7 Análisis de la potencia generada | 47 |
| 3.8 Comparación de modelos | 49 |
| 3.9 Análisis económico | 50 |
| Capítulo 4..... | 52 |
| 4. Conclusiones y Recomendaciones | 53 |
| 4.1 Conclusiones | 53 |
| 4.2 Recomendaciones..... | 54 |
| Referencias..... | 55 |
| Apéndice A | 57 |
| 1. Apéndice A1..... | 57 |
| 2. Apéndice A.2..... | 58 |
| 3. Apéndice A.3..... | 59 |
| 3.1.1 <i>Apéndice A.3.1</i> | 59 |
| 4. Apéndice A.4..... | 60 |
| 4.1.1 <i>Apéndice A.4.1</i> | 60 |
| 5. Apéndice A.5..... | 61 |
| 5.1.1 <i>Apéndice A.5.1</i> | 61 |
| 6. Apéndice A.6..... | 62 |
| 6.1.1 <i>Apéndice A.6.1</i> | 62 |
| 7. Apéndice A.7..... | 63 |

| | | |
|--------|------------------------------|----|
| 7.1.1 | <i>Apéndice A.7.1</i> | 63 |
| 8. | Apéndice A.8..... | 64 |
| 8.1.1 | <i>Apéndice A.8.1</i> | 64 |
| 9. | Apéndice A.9..... | 65 |
| 9.1.1 | <i>Apéndice A.9.1</i> | 65 |
| 10. | Apéndice A.10..... | 66 |
| 10.1.1 | <i>Apéndice A.10.1</i> | 66 |
| 11. | Apéndice A.11..... | 67 |
| 11.1.1 | <i>Apéndice A.11.1</i> | 67 |
| 12. | Apéndice A.12..... | 68 |
| 13. | Apéndice A.13..... | 68 |
| 14. | Apéndice A.12..... | 69 |
| 15. | Apéndice A.15..... | 70 |

Abreviaturas

CFL Courant-Friedrichs-Lewy

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

NACA National Advisory Committee for Aeronautics

CFD Computational Fluid Dynamics

Índice de Figura

| | |
|--|----|
| Figura 1 Tipos de elementos tridimensionales usados para el mallado (Nitin S. Gokhale, 2008.) | 8 |
| Figura 2 Fuente Propia Hélice CAD 1 | 10 |
| Figura 3 Fuente Propia- Hélice Toroidal 1 | 12 |
| Figura 4 Procedimiento de diseño | 19 |
| Figura 5 Perfil de hélice toroidal | 26 |
| Figura 6 Fuente Propia- CAD en el software SolidWorks de una Hélice Toroidal..... | 26 |
| Figura 7 Fuente Propia-CAD en el software SolidWorks de una Hélice Convencional | 28 |
| Figura 8 Perfil de hélice convencional | 28 |
| Figura 9 Tipos de elementos usados para el mallado | 34 |
| Figura 10 Dimensiones requeridas para el volumen de control..... | 35 |
| Figura 11 Set up del workbench de ANSYS. | 36 |
| Figura 12 Mallado del dominio de la turbina toroidal | 36 |
| Figura 13 Vista lateral del dominio. | 37 |

Índice de tablas

| | | |
|-----------------|--|----|
| Tabla 1 | Ventajas y desventajas de las hélices toroidales | 14 |
| Tabla 2 | Procedimiento de diseño | 25 |
| Tabla 3 | Parámetros para la comparación de turbinas | 30 |
| Tabla 4 | Características de Hardware de una HP envy x360 | 35 |
| Tabla 5 | Parámetros del dominio de la malla..... | 39 |
| Tabla 6 | Parámetros de condiciones de frontera y step time..... | 40 |
| Tabla 7 | Set up de parámetros de mallado. | 43 |
| Tabla 8 | Parámetros para análisis de convergencia de mallado..... | 44 |
| Tabla 9 | Cifras de Diferentes tipos de mallas | 44 |
| Tabla 10 | Relación de datos, condiciones de fronteras e iteraciones..... | 46 |
| Tabla 11 | Relación condiciones de fronteras generada..... | 47 |
| Tabla 12 | Comparación de parámetros NACA 4412 convencional y NACA 1412 toroidal. . | 50 |
| Tabla 13 | Comparación económico de las hélices convencional y toroidal. | 51 |

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Implementación general del muelle

PLANO 2 Ubicación de ánodos en tablestacado frontal

PLANO 3 Ubicación de ánodos en tablestacado lateral norte y sur

Capítulo 1

1. **Introducción**

A estas alturas de la historia, la necesidad global en términos de energía sigue en aumento, por lo cual hay que buscar y promover su producción de manera sostenible e incorporar la demanda energética sin caer en la explotación ambiental. En particular, los combustibles fósiles han constituido la base de la inversión energética mundial. No obstante, existe una creciente preocupación sobre el cambio climático, la contaminación y el ciclo de vida de los recursos, lo que ha hecho que el interés por energías renovables, como lo indican el interamericano de desarrollo (Banco Interamericano de Desarrollo, 2015), sea cada vez más significativo. En este marco, la energía hidrocinética es una de las que se ofrece como una alternativa esperanzadora y que podría ser particularmente utilizada eficientemente por países como Ecuador, que cuentan con grandes recursos de agua y necesitan implementar soluciones energéticas sostenibles, mencionado por (Alarcón, 2023).

La energía hidro cinética, como menciona (Silva Jair, 2018) se adquiere de manera instantánea del movimiento de las corrientes acuáticas, evitando la creación de presas o la modificación significativa del flujo de los ríos. A diferencia de la energía hidroeléctrica convencional, esta tecnología no necesita infraestructuras de gran envergadura, lo que la hace una alternativa factible para sitios de acceso complicado, donde sus presupuestos para construir redes eléctricas no son suficientes para construir tales redes debido a sus costos elevados y la demanda energética, aunque es relativamente baja. Las comunidades de acceso complicado, que residen sin la posibilidad de tener acceso a las redes eléctricas tradicionales y, además, se apoyan en fuentes de energía no sustentables o deficientes, como los generadores de diésel, lo que restringe su crecimiento socioeconómico.

En Ecuador, las condiciones geográficas e hidrológicas de nuestra nación brindan un considerable potencial para la implementación de sistemas de generación de hidrocinética, especialmente en sus múltiples cuencas fluviales y sistemas de riego. En nuestro país existen

más de 2200 ríos que proporcionan una prueba o tabla de fuente de agua, que usualmente se encuentran en zonas rurales o comunidades aisladas que no se benefician de la red eléctrica del país. No obstante, pese a la gran cantidad de recursos disponibles, el uso de la energía hidrocinética en el país ha sido restringido hasta el presente, principalmente debido a la ausencia de proyectos y análisis que confirmen la factibilidad técnica y económica de las tecnologías existentes, mencionado por (César Octavio Quinaluisa Morán, 2019).

El proyecto plantea tratar esta cuestión y verificar numéricamente una hélice toroidal para un sistema de extracción de energía hidrocinética, diseñado para funcionar en ríos, en particular el "Río Quevedo" en la provincia de Los Ríos, Chile. La hélice toroidal constituye una innovación relevante en el sector energético, dado que su diseño hidrodinámico facilita una eficiencia superior en la transformación de la energía cinética del agua en energía eléctrica, en contraste con las hélices tradicionales. Además, este tipo de hélices posee la habilidad de funcionar eficientemente en corrientes de baja velocidad, lo cual es particularmente significativo en las condiciones habituales de los cuerpos de agua de Ecuador.

1.1 Descripción del Problema

Se propone implementar y evaluar una hélice toroidal en un sistema extractor de energía hidrocinética para ríos y sistemas de riego en Ecuador especialmente para el río Quevedo. El objetivo es validar el rendimiento, eficiencia y viabilidad de esta tecnología, comparándola con hélices convencionales. Se consideran aspectos como adaptabilidad al entorno, capacidad de generación en zonas no interconectadas y costos de implementación. El estudio busca determinar si esta solución puede contribuir efectivamente a la diversificación de la matriz energética del país, ofreciendo una alternativa renovable y sostenible para áreas rurales y de difícil acceso.

1.2 **Justificación del Problema**

Este problema se justifica por la urgente necesidad de desarrollar soluciones energéticas renovables y sostenibles adaptadas a las características geográficas e hidráulicas de Ecuador. La implementación de turbinas toroidales para la extracción de energía hidro cinética ofrece una oportunidad innovadora para diversificar la matriz energética del país y abordar los desafíos de electrificación en zonas rurales y no interconectadas. A través de un análisis numérico exhaustivo, se busca demostrar que estas turbinas pueden ser más eficientes que las hélices convencionales en los flujos de baja velocidad típicos de los ríos y canales de riego ecuatorianos, minimizando al mismo tiempo el impacto ambiental, mencionado por (Castro, 2022).

El uso de simulaciones avanzadas y modelos matemáticos permitirá optimizar el diseño teórico de la turbina, proporcionando información crucial sobre su rendimiento y viabilidad técnica. Este enfoque no solo reducirá costos asociados con pruebas físicas, sino que también acelerará el proceso de desarrollo, mencionado por (Portilla, 2018). El problema se alinea con los objetivos nacionales de energía limpia y desarrollo sostenible, potencialmente contribuyendo a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles y promoviendo la autosuficiencia energética en comunidades remotas. El análisis comparativo con sistemas convencionales sentará las bases para una posible revolución en la generación de energía hidro cinética en Ecuador, con implicaciones positivas para el desarrollo económico y la calidad de vida en zonas rurales, mencionado por (IQ Latino, 2015).

1.3 **Objetivos**

1.3.1 **Objetivo general**

Implementar un sistema de extracción de energía con hélice toroidal, usando interacción fluidodinámica para su aplicación en ríos y canales de riego en Ecuador.

1.3.2 **Objetivos específicos**

1. Diseñar y modelar un sistema de extracción de energía con hélice toroidal adaptado a las condiciones hidrodinámicas del río Quevedo.
2. Realizar un análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) para evaluar el rendimiento y la eficiencia del sistema de hélice toroidal en comparación con sistemas de hélices convencionales.
3. Determinar la viabilidad técnica y económica de la implementación del sistema de hélice toroidal en el contexto de generación de energía hidro cinética en Ecuador.

1.4 **Marco teórico**

1.4.1. **Matriz energética ecuatoriana**

La matriz energética de Ecuador se caracteriza por su gran dependencia de la energía hidroeléctrica, que representa el 92% de la generación total de energía del país. Por otro lado, la contribución de fuentes térmicas es del 7%, mientras que las fuentes no convencionales, como la solar, eólica y biomasa, representan casi el 1%, según los informes del ministerio de energía y Minas, 2022. Esta enorme dependencia de la hidroeléctrica permite al país mantener una mezcla energética de bajo carbono. Sin embargo, también hace que el país sea vulnerable a los impactos del cambio climático, como las sequías, que pueden socavar severamente el sistema de suministro de energía. Al mismo tiempo, si bien las fuentes de energía térmica ayudan a cubrir la escasez de las fuentes hidroeléctricas, también traen inmensas cargas

ambientales y económicas debido a las emisiones de CO₂ y la dependencia de los precios de las materias primas. La energía no tradicional en Ecuador es un área importante de oportunidad porque el país cuenta con diferentes regiones y recursos solares, eólicos y geotérmicos en las regiones costeras y andinas. Posteriormente, el Ministerio de Energía y Minas ha facilitado políticas específicas de diversificación fomentando la inversión en proyectos de energía renovable, (Ministerio de Energía y Minas, 2022).

1.4.2. Principios hidrodinámicos aplicados en las turbinas

Los principios asociados a la hidrodinámica mantienen una similitud con los principios establecidos para la aerodinámica, se debe de tomar en cuenta que la diferencia es el tipo de fluido que se usan en ambos campos de estudios. A partir de esto, podemos establecer como variables de interés para la obtención de una potencia de un fluido en un volumen de control se requiere determinar un flujo másico (\dot{m}) específico dependiente de las siguientes variables:

Ecuación de flujo:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho A_t V \quad (1,1)$$

Donde las variables que se emplean para poder determinar son ρ la densidad del agua, A_t el área que abarca la turbina, V la velocidad del agua. Para la obtención de la potencia de la turbina se tiene la siguiente relación:

Ecuación de potencia generada:

$$P_{generada} = \frac{1}{2} \dot{m} V^2 = \frac{1}{2} \rho A_t V^3 \quad (1,2)$$

Como se ha mencionado anteriormente, estas ecuaciones guardan relación con respecto a un volumen de control específico que debe ser reducido por un coeficiente de potencia, para lo cual se hace uso de la ley de Betz.

Ecuación de potencia de turbina:

$$P_{turbina} = \frac{1}{2} C_p \rho A_t V^3 \quad (1,3)$$

Para poder alcanzar la eficiencia máxima de la turbina según la ley de Betz se fija la constante $C_p = 0.59$.

1.4.3 Análisis numérico para la generación de energía en un perfil

Para el análisis numérico se va a emplear el método de volúmenes finitos para la resolución de la distribución de la energía en las hélices propuestas. Este marco teórico nos permite analizar con mayor detalle los siguientes ítems:

1.4.3.1 Condiciones de Frontera y Perfil de Entrada del Flujo

Para estudio de la turbina se toma en cuenta las condiciones proporcionadas por un flujo laminar que nos permite mantener una velocidad promedio y la temperatura promedio del río Quevedo. De esta forma no se toma en cuenta la energía cinética turbulenta y la disipación de la energía debido a este efecto.

1.4.3.2 Mallado

En dinámica de fluidos computacional, se considera el mallado como el proceso para de dividir un dominio de estudio (en este caso de una turbina) en pequeñas celdas o elementos. A estas celdas se les asigna puntos o nodos en las que se resolverán en los que se resolverán las ecuaciones de movimiento y de energía correspondientes.

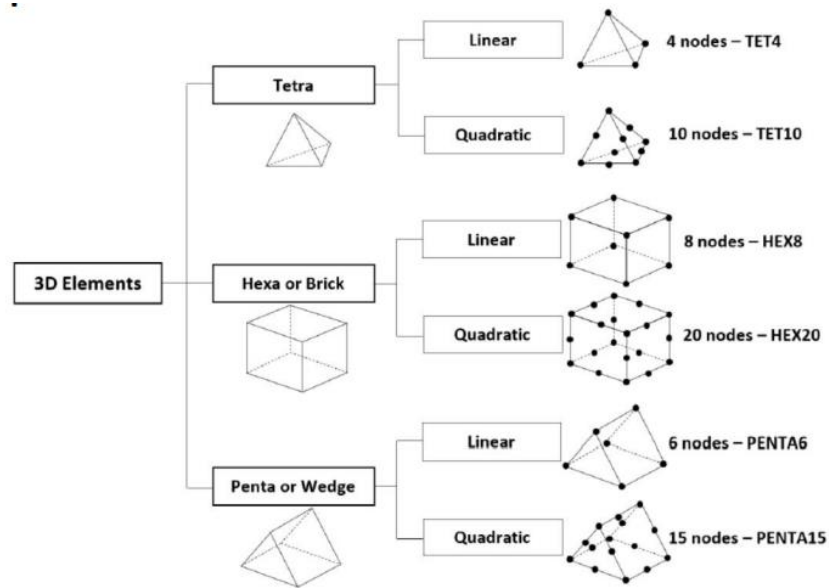
Se cuenta con dos tipos de mallado:

- **Mallado estructurado:** los elementos poseen formas hexaédricas (cuboides o en forma de ladrillo, son formas fáciles de calcular.
- **Mallado no estructurado:** este tipo de malla posee una forma más compleja y tiene formas irregulares como triángulos y tetraedros.

Para el estudio de la hélice toroidal se emplea un mallado estructurado tetraédrico cuadrático, para mejorar la precisión en la geometría del elemento debido al aumento en la cantidad de nodos.

Figura 1

Tipos de elementos tridimensionales usados para el mallado (Nitin S. Gokhale, 2008.)



1.4.3.3. Transferencia de Energía y Potencia Extraída.

Es importante calcular la potencia extraída del flujo por las palas de la turbina, que depende de la transferencia de energía desde el fluido hacia la turbina.

Para hacer el cálculo de los parámetros solicitados para conocer la factibilidad de la turbina requerida, el software Ansys realiza la resolución de las siguientes ecuaciones:

La primera ecuación para resolver es la conservación de la energía considerando las variaciones en la temperatura:

Ecuación de conservación de la energía

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho(E \cdot \nabla)E = -\nabla \cdot (p u) + \left(\frac{\partial(u \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v \tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w \tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w \tau_{zz})}{\partial z} \right) + \nabla \cdot (k \nabla T) + S_e \quad (1,4)$$

Donde ρ es la densidad, E es la energía interna y cinética del fluido, τ es la tensión producida por la velocidad, el término S es la contribución de la fuerza másica, u es la energía interna, T es la temperatura y el resto de constante para mantener la proporcionalidad del modelo.

La siguiente ecuación que se analiza en el software es la conservación de la masa, debido a él volumen de control creado para poder analizar la generación de energía, por consiguiente, se resuelve la siguiente ecuación:

Ecuación de conservación de masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1,5)$$

Finalmente se analiza la conservación de la cantidad de movimiento, la cual es importante para poder conocer la sumatoria de las fuerzas aplicadas a la superficie de estudio, en este caso la turbina:

Ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento en el espacio cartesiano:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho(v \cdot \nabla)v = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (1,6)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho(v \cdot \nabla)v = \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (1,7)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho(v \cdot \nabla)v = \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + S_{Mz} \quad (1,8)$$

1.4.3.4. Modelo de análisis

Se realiza un análisis en estado estacionario del río, debido a esto se establece que el número de Reynolds ($Re = \frac{\rho Dv}{\mu}$) es inferior a 2000. Se considera que el un caudal promedio y unas condiciones de perfil estable.

1.4.4 **Diseño y funcionamiento de Hélices**

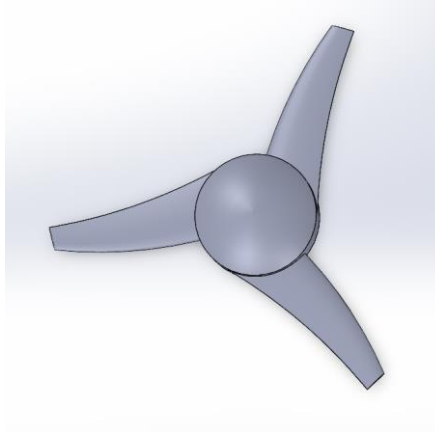
1.4.4.1 **Hélice Convencional.**

Las hélices tradicionales son aparatos de conversión de energía que convierten la energía cinética de un fluido, como el agua o el aire, en energía de impulsión o potencia mediante el movimiento regulado de un grupo de álabes. Su diseño mecánico se fundamenta en la rotación de los álabes alrededor de un eje central, creando diferencias de presión en sus superficies que impulsan el fluido en un rumbo determinado. Este procedimiento de transformación se basa en el principio de Bernoulli, que describe cómo el cambio en la velocidad del fluido a través de los álabes genera fuerzas de soporte y empuje, lo que permite su aplicación en usos industriales y energéticos debido a su eficacia en diversas velocidades de funcionamiento, mencionado por (Carlton, 2012).

La configuración técnica de una hélice tradicional implica una disposición radial de los álabes, en la que cada álabe se inclina en un ángulo exacto de paso para optimizar la transferencia de energía. Este ángulo y la forma curvada de los álabes se determinan de manera específica para mejorar el paso de energía desde el líquido hacia la hélice, reduciendo así la resistencia y las pérdidas de energía debido al arrastre. Esta disposición posibilita que las hélices tradicionales conserven un alto rendimiento en flujos de velocidad significativos, gracias a la sencillez de su estructura y su menor susceptibilidad a pérdidas provocadas por fenómenos como la cavitación. La cavitación, que ocurre cuando la presión del fluido cae por debajo de un umbral crítico formando burbujas de vapor, es un desafío en estas hélices; a altas velocidades, reduce su eficiencia y contribuye al desgaste de los álabes, aumentando así las necesidades de mantenimiento, mencionado por (Sarpkaya, 2010).

Figura 2

Fuente Propia Hélice CAD 1



1.4.4.2 Hélices Toroidales.

Las hélices toroidales representan un progreso en aparatos de transformación de energía mecánica, sobresaliendo por su geometría de anillo cerrado, un atributo que las distingue esencialmente de las hélices tradicionales. En este tipo de hélices, los álabes se agrupan en un diseño circular que genera un círculo constante alrededor del eje, lo que disminuye considerablemente la creación de vórtices en los extremos de los álabes. Esta configuración reduce las pérdidas energéticas habituales vinculadas a la creación de estos vórtices, posibilitando una transmisión más eficaz de la energía del líquido hacia la hélice. Por su estructura, las hélices toroidales resultan especialmente útiles en situaciones de flujo lento, como las presentes en ciertos cuerpos de agua, o en usos que demandan un funcionamiento silencioso y con baja vibración. El beneficio principal de las hélices toroidales radica en la disminución de ruido y vibración, dado que reducen los efectos de oscilación y resonancia en el fluido, lo cual también ayuda a disminuir el desgaste mecánico. Adicionalmente, la geometría toroidal hace que sean menos propensas a la cavitación en comparación con las hélices tradicionales, optimizando de esta manera su desempeño en situaciones de flujo regulado y prolongando su durabilidad en usos de baja velocidad, mencionado por (Tahsin Tezdogan, 2010).

Figura 3

Fuente Propia- Hélice Toroidal 1



Así mismo mencionado por (Mehemet Kanoglu, 2019), las propiedades técnicas de las hélices toroidales. Primero, debemos mencionar que la estructura toroidal o circular de estas hélices facilita una disminución en la creación de vórtices y en la cavitación, lo que incrementa la estabilidad del flujo y disminuye las vibraciones estructurales. Esta particularidad provoca que las hélices toroidales sean más silenciosas y menos susceptibles a desgastes anticipados, particularmente en flujos de baja velocidad.

Por otro lado, por su diseño, las hélices toroidales están diseñadas para funcionar en flujos de baja velocidad, en los que el bucle cerrado facilita la captura más eficaz de la energía del fluido. Esto las convierte en idóneas para usos como turbinas hidrocínéticas en ríos o canales de riego con corrientes moderadas.

Las hélices toroidales, al reducir las zonas de baja presión alrededor de los álabes, disminuyen considerablemente la cavitación, incrementando la eficacia del sistema y prolongando su duración. Este factor es esencial en aplicaciones donde los gastos de mantenimiento y la longevidad son cruciales.

1.4.5 Comparación y aplicaciones de tipos de Hélices

En el caso de Ecuador, la decisión sobre el uso de hélices convencionales o hélices toroidales para la generación de energía hidro cinética está ligada a las peculiaridades hidrodinámicas de sus fuentes hídricas, la disponibilidad de acceso a los recursos en las áreas rurales y la finalidad de implementar tecnologías energéticas sostenibles en comunidades de difícil acceso. Ecuador posee importantes recursos hídricos distribuidos en diversas cuencas y sistemas de irrigación, en especial en áreas rurales donde se tiene un acceso limitado a la red nacional de electricidad, mencionado por (Anthony Barzola, 2023). También, en la rama de la ingeniería, la posibilidad de usar una hélice convencional o una hélice toroidal está supeditada a las particularidades del flujo y a las necesidades de la colocación. Por ejemplo:

1.4.5.1 Hélices convencionales.

Se utilizan extensamente en sistemas de alta velocidad y bajo costo, como generadores de turbinas eólicas, motores marinos, ventiladores industriales y plantas hidroeléctricas con altas tasas de flujo de agua. Las hélices convencionales son más adecuadas para aplicaciones de alto rendimiento y en lugares donde hay fácil disponibilidad de piezas y repuestos.

Se caracterizan por su simplicidad en la construcción, facilidad de uso y eficacia en una amplia gama de velocidades, especialmente en condiciones de flujo moderado a alto. Tales hélices podrían utilizarse en Ecuador para sistemas de producción de energía en ríos con alta corriente y velocidad, porque pueden diseñarse para una adecuada conversión de energía sin cambios complejos en la construcción, mencionado por (Lukar Zagar, 2020).

1.4.5.2 Hélices toroidales.

Este tipo de hélice resulta perfecto para usos que demandan operaciones silenciosas y constantes en corrientes de baja velocidad, como en sistemas de producción de hidrocínética

en ríos y canales de riego. La disminución de la cavitación y la disminución del desgaste mecánico convierten a las hélices toroidales en una alternativa eficaz y duradera para usos en áreas remotas donde el mantenimiento es restringido. Se trata de una innovación tecnológica creada para incrementar la eficiencia en flujos de baja velocidad, disminuir el ruido y reducir la cavitación. Esto es especialmente importante para la aplicación de tecnologías hidrocínicas en zonas rurales de Ecuador con cuerpos de agua de bajo flujo. Como menciona (Rajat Prajapati, 2024) , dado que su diseño de anillo cerrado permite una reducción significativa de vórtices y, por ende, menor pérdida de energía, estas hélices ofrecen una alternativa prometedora en el contexto de la generación de energía renovable para comunidades ecuatorianas en zonas no interconectadas.

Tabla 1

Ventajas y desventajas de las hélices toroidales

| Aspecto | Ventajas | Desventajas |
|------------------------------------|---|--|
| Eficiencia | Alta eficiencia en flujos de baja velocidad, ideal para ríos de pendiente baja y sistemas de riego comunes en la costa y Amazonía del Ecuador. | Diseño más complejo y costoso, que puede dificultar su adopción en proyectos con presupuestos limitados. |
| Impacto ambiental | Reducción de ruido y vibración, lo que minimiza el impacto en comunidades rurales y ecosistemas acuáticos, contribuyendo a la conservación de la biodiversidad. | La configuración de anillo cerrado ocupa más espacio, lo que puede ser un inconveniente en canales de riego estrechos o ríos pequeños. |
| Durabilidad y mantenimiento | Menor desgaste por reducción de cavitación, lo que se traduce en menores costos de mantenimiento a largo plazo, ideal para áreas rurales con recursos técnicos limitados. | El diseño especializado puede requerir procesos de fabricación avanzados, menos accesibles en zonas rurales. |

1.4.6 Tipos de Perfiles Aerodinámicos (NACA)

Por lo general, un perfil aerodinámico se define como el segmento transversal de un ala o una superficie aerodinámica obtenida al recortarla con un plano que se encuentre paralelo a su cuerda. Su diseño y geometría se emplean para regular la circulación del aire y generar fuerzas aerodinámicas como la sustentación y la resistencia. Por otra parte, los perfiles pueden ser simétricos, lo que significa que tanto los extrados como los intrados son imágenes reflejas, generando sustentación únicamente bajo un ángulo de ataque. O asimétricos que se crean para garantizar una defensa sin tener un ángulo de ataque inicial, según (Galindo, 2006).

1.4.6.1 Perfiles NACA

La National Advisory Committee for Aeronautics elaboró una metodología para organizar y diseñar perfiles aerodinámicos mediante series específicas. Por ejemplo, se destacan las series de 4 dígitos que tenemos NACA 4412 (Convencional) y NACA 1412 (Toroidal) que indican propiedades geométricas como:

Primer dígito: dato de la máxima combadura como porcentaje de la cuerda.

Segundo dígito: lugar de la máxima combadura desde el borde de ataque en decimas de la cuerda. **Dos últimos dígitos:** medida del espesor máximo como porcentaje de la cuerda.

➤ **Perfiles simétricos NACA 4412:** Son perfiles donde la trayectoria de su curvatura coincide con la línea de la trayectoria de la cuerda, lo que significa que no poseen curvatura. Sin embargo, su diseño es esencial para aplicaciones que demandan estabilidad en ambas direcciones de flujo o cargas aerodinámicas homogéneas.

➤ **Perfiles asimétricos NACA 1412:** Algunos consideran que su geometría no es uniforme con relación a su línea de cuerda. En otras palabras, tanto la parte superior (extrados) como la inferior (intrados) poseen formas distintas. Esta asimetría posibilita la generación de sustentación incluso cuando el ángulo de ataque es cero o muy bajo, lo que los hace útiles para

aplicaciones que necesitan un elevado levantamiento sin la necesidad de modificar significativamente el ángulo de ataque.

1.4.7 Interacción Fluidodinámica

El término Interacción Fluidodinámica se refiere al estudio y estudio de las fuerzas que surgen de la interacción entre un fluido, ya sea líquido o gas, con las superficies que lo alojan o lo orientan, o sea, como las interacciones entre las partículas dentro del mismo fluido en movimiento. Este suceso es crucial en el diseño y estudio de sistemas de ingeniería en los que la conducta del fluido afecta directamente su desempeño, tal como en turbinas, hélices y sistemas de propulsión, canales de transmisión de fluidos, intercambiadores de calor y estructuras aerodinámicas, según (Martinez, 1991).

La Mecánica de Fluidos es una disciplina del saber dedicada a prever y detallar el comportamiento de los fluidos en movimiento y su interacción con objetos sólidos. Para analizar estas interacciones, emplean ecuaciones básicas de conservación, tales como la preservación de masa a través de la ecuación de continuidad; la preservación de la cantidad de movimiento a través de las ecuaciones de Navier Stokes y finalmente, la preservación de energía energética como la primera ley termodinámica. Estas ecuaciones son esenciales para solucionar cualquier tipo de interacción fluidodinámica, pero las ecuaciones de Navier Stokes son esenciales. Son instrumentos matemáticos elementales que describen cómo la velocidad, presión y viscosidad del fluido varían en relación con su ambiente, según (White, 2011).

Con relación a aparatos como turbinas y hélices, la interacción fluidodinámica facilita la transformación de la energía cinética del fluido en energía mecánica a través del movimiento regulado de álabes, que generan fuerzas de empuje o torsión. Estos efectos de interacción se potencian en ambientes de alta velocidad o flujo turbulento, donde se producen fenómenos como la cavitación y la separación del flujo, que impactan de manera proporcional la eficacia

del aparato. En usos aeronáuticos y marítimos, el análisis de la interacción fluidodinámica resulta perfecto para mejorar el desempeño aerodinámico, reduciendo el arrastre e incrementando la sustentación. Esto se logra adaptando la geometría de los perfiles al movimiento del fluido para optimizar la transferencia de energía, según (Kundu, 2015) .

Para entender la complejidad de estos sistemas, en la ingeniería se utilizan modelos numéricos como la Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD). Esta técnica posibilita la simulación de los efectos fluidodinámicos en diferentes condiciones de flujo, definiendo el comportamiento de los fluidos y las superficies de contacto en circunstancias reales. Este estudio permite la creación de sistemas más eficaces, anticipando los impactos de la interacción fluidodinámica en diversas aplicaciones, desde la mejora de hélices en ambientes acuáticos hasta la creación de perfiles aerodinámicos en el sector aeronáutico, mencionado por (Jack P. Holman, 2015).

Capítulo 2

2. Metodología

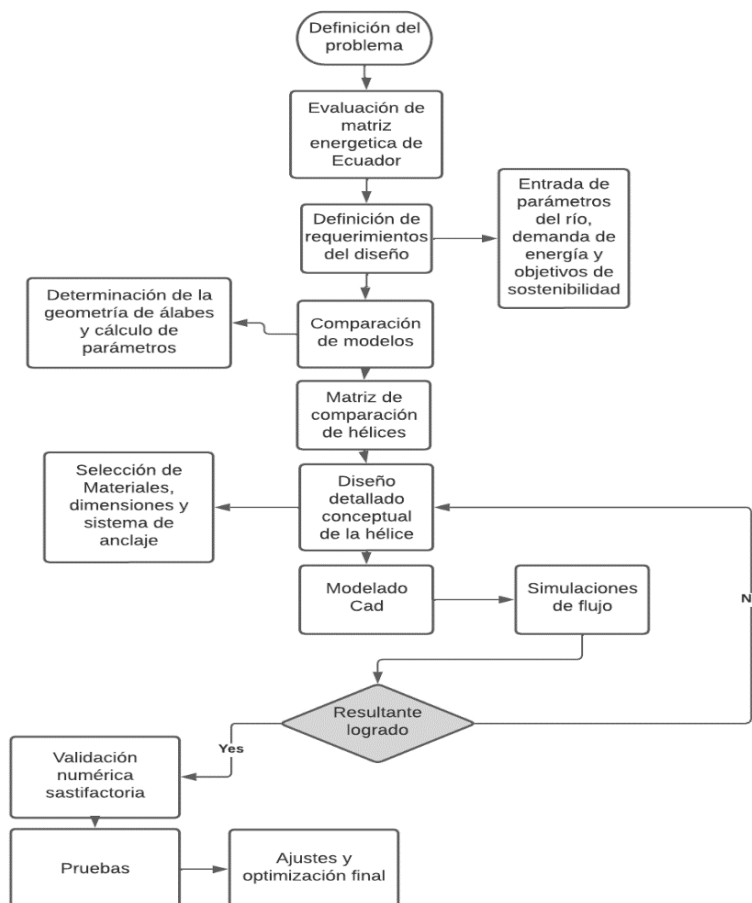
En este capítulo se desarrolló la metodología empleada para poder realizar una correcta selección de la turbina basado en el rendimiento energético. El procedimiento se muestra en a continuación en el cual mostramos como se realiza la obtención de la mejor validación basándonos en el análisis numérico.

2.1 Diagrama de bloques del procedimiento de Diseño

En este apartado, se plantea un resumen de un diagrama referente al procedimiento que se llevó a cabo para el diseño de la hélice toroidal. El procedimiento de diseño se orientó en el proyecto integrado de (Anthony Barzola, 2023)

Figura 4

Procedimiento de diseño



2.2 Procedimiento de validación del análisis numérico

Para llevar a cabo un proceso de validación numérica confiable sobre la hélice toroidal, fueron necesarias varias etapas previas a su certificación. Estos procesos están dentro de la comparación de resultados y simulaciones con cantidades teóricas de literatura acerca de las hélices hidrocínéticas. De esta manera, se describe la implementación de análisis y validación que se tiene por objetivo.

- En primer lugar, la definición como tal de las condiciones de frontera y los parámetros de entrada fueron realizados a partir de datos hidrodinámicos correspondientes a las masas de aguas de Ecuador en las que la hélice toroidal operaría. De esa manera se obtuvo la velocidad promedio del flujo, la densidad del agua, las revoluciones por minuto (rpm) y las propiedades del material de construcción. Para los ríos y canales de bajo caudal de Ecuador se configuraron condiciones de frontera, en especial a la entrada y salida, que permitieran mínimos flujos laminares. De esta forma se aseguró que el modelo CFD fuera adecuado a condiciones locales de operación.
- La segunda parte se centra en la precisión, el análisis numérico para la malla de los diferentes modelos y la selección del método apropiado para la resolución se realizó utilizando el método de volúmenes finitos con Ansys Fluent, que es competente en la resolución de problemas de dinámica de fluidos, conservación de masa, momento y energía, así como en la solución de geometrías toroidales y convencionales complejas. Para la parte de diseño, se implementó el algoritmo utilizando mallas no estructuradas alrededor de las palas del tornillo toroidal junto con el aumento de la precisión de la simulación en las regiones de gradientes extremos en velocidad y presión. En este proceso, fue posible cumplir con algunos de los importantes requisitos técnicos como

las dimensiones de las palas y la tasa de revolución para garantizar una eficiencia óptima en flujos de baja velocidad.

- El tercer punto se apoya en hacer una comparación con la ley de Betz al notar que la eficiencia de conversión energética del modelo junto con los datos obtenidos se evaluó en comparación con el límite teórico establecido por Betz, quien postuló la máxima eficiencia teórica de conversión de energía cinética mecánica en sistemas hidrodinámicos. El análisis comparativo permitió corroborar si la hélice alcanzaba niveles de eficiencia cercanos al límite teórico en situaciones óptimas, justificando la efectividad del diseño en el apresamiento de energía de flujos de baja velocidad.
- En otra etapa, se realizaron simulaciones bajo diferentes velocidades de flujo y un ángulo de ataque para corroborar la valoración del rendimiento de la hélice toroidal en distintos contextos. Este modelo de análisis facilitó la observación de la consistencia del modelo en un espectro extenso de condiciones operativas. Se examinaron los valores basándose en la variación de eficiencia y potencia producida, corroborando de esta manera la solidez del diseño y su capacidad para adaptarse a los flujos habituales de cuerpos de agua en Ecuador.
- Finalmente, la etapa crucial es la validación del análisis comparativo con investigaciones previas de hélices convencionales y toroidales, centrada en el estudio de la disminución de cavitación, la eficacia de conversión y el efecto social o medioambiental. Al cerciorarse que el rendimiento de la hélice toroidal era superior al de las hélices convencionales en condiciones de poca velocidad, se demostró la validez del análisis numérico y la viabilidad de la hélice toroidal como alternativa sostenible y eficiente.

2.3 Parámetros técnicos del río Quevedo

El río Quevedo, situado en la región costera de Ecuador, es el principal agente beneficioso que a su vez posee propiedades hidrológicas que lo convierten en eficaz para el proyecto de energía hidrocinética. La información estadística, como las condiciones de flujo del río, contribuye a adquirir datos esenciales, como la presión, temperatura, caudal y profundidad, todos estos elementos esenciales para la puesta en marcha de una turbina hidrocinética. Esta parte se fundamentó en la tesis de (Bismark, 2024).

- **Presión:** el río Quevedo su presión tiene dos factores que dependen para determinar cálculos hidráulicos, como es la profundidad y densidad del agua promedio. También se explica en la medida de la presión atmosférica y de la profundidad media usando ciertos principios de hidrostática que permiten estimaciones sobre la magnitud de presiones que las estructuras sumergidas deben cargar.
- **Temperatura:** Este es un factor importante ya que incide en la eficiencia de la densidad y viscosidad del agua, provocando un déficit en la eficiencia energética de la turbina. La temperatura en el lugar de geo registro suele estar en un rango moderado, dato curioso. En la región, el agua tiene una temperatura promedio de 20 °C, dato que sostienen los especialistas, por eso llega a ser crucial para el equilibrio del sistema porque genera cambios bruscos en la viscosidad del agua. Este agente resulta ideal para mantener la sustentabilidad en el sistema, más aún cuando se trata de turbinas, lo que hace que la estructura permanezca insensible a las variaciones de la densidad del fluido.
- **Caudal:** Aunque el río Quevedo posee un caudal promedio, este fluctúa de acuerdo con las condiciones y temperaturas de la región, evidenciando un valor de caudal promedio de $200 \frac{m^3}{s}$. Este flujo es crucial para la producción de energía en sistemas de capacidad baja y media; así como para el diseño y elección del mecanismo. Además, el río emite

una corriente continua y constante, lo que evidencia una mejora en la supervisión del caudal medio anual y en la determinación de los parámetros operativos apropiados para incrementar la producción de energía.

- **Velocidad del flujo:** Se observa que, al calcular la velocidad media en la sección del río, se obtiene 3.01 m/s, lo que asegura una base relevante para dicho diseño y mejora la obtención de energía en este tipo de corrientes. Es importante recordar que también hay velocidades superiores e inferiores a la velocidad media, como a 4 m/s y 2 m/s.
- **Nivel de agua:** En la red de medición de Quevedo, se registró un registro de alrededor de 3 metros de altura promedio, un detalle valioso para establecer las dimensiones. En diversas áreas del río con niveles de agua apropiados, la implementación podría desarrollarse eficazmente en el cauce del río.
- **Revoluciones por minuto del sistema:** el río Quevedo tiene condiciones de uso para funcionar de manera óptima, por lo que existe un rango ideal para aprovechar la energía cinética del agua sin comprometer a la estructura, es decir, para que el río Quevedo cumpla con condiciones óptimas existe una velocidad angular que es de 287 rpm de promedio. Y para cumplir con condiciones máximas y mínimas, el río se define con los datos de 350 rpm y 250 rpm.

2.4 Definición de la morfología de los álabes

Acorde a las variables definidas en la ley de Betz, se seleccionó el perfil hidrodinámico que generara el mayor valor para la obtención de la potencia requerida. Resultado de esto obtenemos el perfil hidrodinámico NACA 4412 el cual sigue una trayectoria convencional característico de las turbinas. Para el caso del perfil hidrodinámico NACA 1412 sigue una trayectoria toroidal

2.4.1 Perfil NACA 1412

Perfil Asimétrico

- [1] Primer dígito indica el máximo valor de la curvatura en conexión con el porcentaje de la longitud de la cuerda (10%).
- [4] Segundo Dígito representa la ubicación de la máxima curvatura en decimos de la longitud de la cuerda con un valor del 40% desde el borde de ataque.
- [12] últimos dígitos se refieren el espesor máximo como un valor porcentual de la cuerda (12%).
- Desarrollado con el objetivo de mejorar el coeficiente de sustentabilidad con grados moderados de resistencia, optimizando la interacción con el viento en usos de producción de energía eólica.

Las ecuaciones para poder definir la morfología para definir los perfiles NACA 1412 y NACA 4412 se muestran a continuación:

Ecuaciones de para definición de factor $\lambda_{r,i}$

$$\lambda_{r,i} = \lambda \left(\frac{r_i}{R} \right) \quad (2,9)$$

Ecuaciones de para definición de factor φ_i

$$\varphi_i = \left(\frac{2}{3} \right) \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_{r,i}} \right) \quad (2,10)$$

Ecuaciones de para definición de factor c_i

$$c_i = \frac{8\pi r_i}{BC_{l,design,i}} (1 - \cos(\varphi_i)) \quad (2,11)$$

Ecuaciones de para definición de factor $\theta_{T,i}$

$$\theta_{T,i} = \theta_{p,i} - \theta_{p,0} \quad (2,12)$$

Ecuaciones de para definición de factor φ_i

$$\varphi_i = \theta_{p,i} + \alpha_{design,i} \quad (2,13)$$

Donde r_i es el radio de cada elemento respecto al centro del rotor, $\lambda_{r,i}$ es la velocidad específica local, φ_i es el ángulo relativo entre la cuerda del álabe y la velocidad relativa del viento, c_i es la cuerda del álabe, $\theta_{r,i}$ es el ángulo de giro del álabe, $\theta_{p,i}$ ángulo de inclinación entre la cuerda del álabe y el plano de giro del rotor, y $\theta_{p,0}$ ángulo de inclinación en la punta del rotor.

Para facilitar la manufactura de la hélice, se realizó fue linealizado los valores de la cuerda y el ángulo de giro con las ecuaciones (14) y (15).

Ecuaciones de para definición de factor c_i

$$c_i = a_1 r_i + b_1 \quad (2,14)$$

Ecuaciones de para definición de factor $\theta_{r,i}$

$$\theta_{r,i} = a_2 (R + r_i) \quad (2,15)$$

Nota. Donde a_1, a_2 y b_1 son los coeficientes que linealizan los valores de cuerda y ángulo de giro respecto al radio local de cada elemento.

Tabla 2

Procedimiento de diseño

| Parámetro | Símbolo | Valor |
|-------------------------------------|----------------|--------------|
| Número de Reynolds | R_e | 1000000 |
| Ángulo de ataque | α | 15° |
| Coefficiente de sustentación | C_l | 0.8030 |
| Coefficiente de arrastre | C_d | 0.00920 |

Nota: Basado en esto datos se determina la simbología la hélice en 60 divisiones.

2.4.2 Características del perfil 1412

- **Curvatura máxima:** 1% de la longitud de la cuerda (valor bajo, casi plano).
- **Ubicación:** al 40% desde el borde de ataque.
- **Valor de espesor máximo:** 12% de la cuerda.
- La utilización de este perfil se basa en configuraciones que requieren baja sustentabilidad y alta estabilidad, como en drones de pequeña escala o turbinas con diseño bidireccional.

Figura 5

Perfil de hélice toroidal

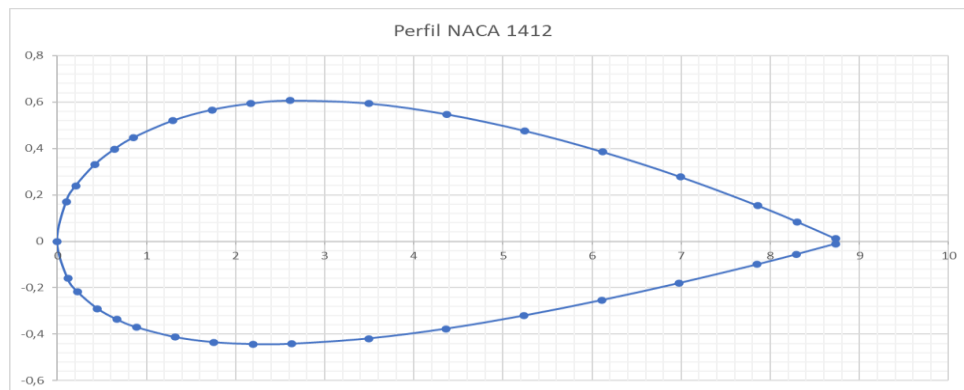
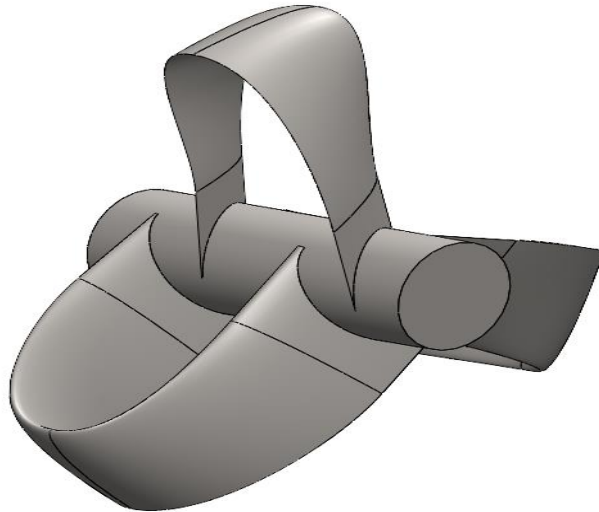


Figura 6

Fuente Propia- CAD en el software SolidWorks de una Hélice Toroidal



2.4.3. Características del perfil NACA 4412

- **Curvatura máxima:** El perfil asimétrico con una curvatura máxima del 4% de la longitud de la cuerda.
- **Ubicación:** al 40% desde el borde de ataque.
- **Valor del espesor máximo:** 12% de la cuerda.
- Se optimiza el diseño del perfil para generar un mayor grado de soporte en comparación con perfiles simétricos. El uso del perfil es óptimo para entornos que valoran la transformación eficaz de energía cinética a mecánica, como sucede en turbinas hidrocinéticas y aerodinámicas.

Figura 7

Fuente Propia-CAD en el software SolidWorks de una Hélice Convencional

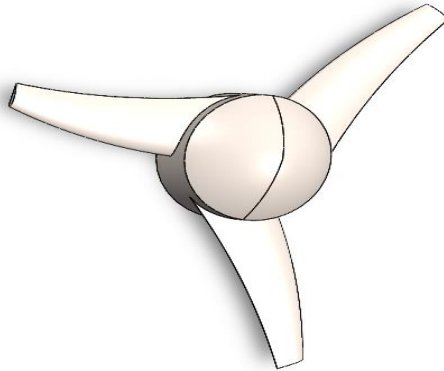
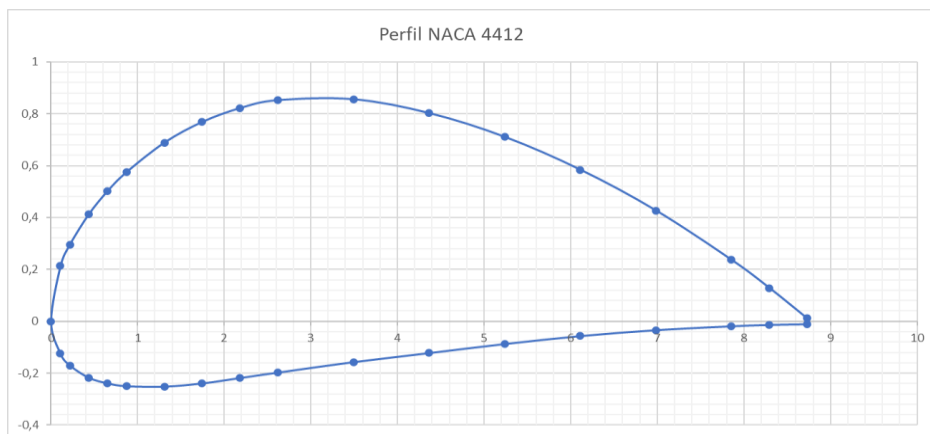


Figura 8

Perfil de hélice convencional



2.5 Requisitos del diseño

La hélice toroidal de un sistema hidro cinético tiene necesidades esenciales para garantizar su eficiencia y sostenibilidad del sistema. Así que conlleva los siguientes requerimientos:

- **Eficiencia en Conversión energética:** la hélice necesita ser capaz de transformar la mayor parte de la energía cinética del flujo de agua en energía mecánica. Esto conlleva perfeccionar la geometría y aumentar la captación de flujo en corrientes habituales del río.

- **Durabilidad:** dado que la hélice estará constantemente en contacto con agua, los materiales requeridos para su fabricación deben ser resistentes a los elementos externos que puedan causar deterioro o modificaciones en la aleación, como por ejemplo, un acero inoxidable AISI 316. También se contempla la utilización de fabricación aditiva para la producción de la turbina, empleando polímeros de tipo PLA (ácido poliláctico).
- **Adaptabilidad a Caudales bajos:** el dispositivo (la hélice) debe gestionarse en corrientes moderadas y velocidades bajas, aspectos que son característicos del río Quevedo. De igual forma, esto conduce a un diseño optimizado para una velocidad reducida y un consumo energético reducido.
- **Facilidad de Mantenimiento y Accesibilidad:** el modelo de la hélice debe ser flexible y que un operador pueda realizar un mantenimiento sencillo para comunidades rurales, utilizando componentes asequibles y de coste reducido.
- **Viabilidad Técnica y Económica:** La hélice debe ser accesible y evidenciar su eficacia en cuanto a retorno de inversión, siendo un respaldo a la sostenibilidad energética en áreas de limitado recurso energético.

2.6 Comparación entre hélice convencional y toroidal

Entre los factores considerados para seleccionar la turbina más apropiada para la producción de energía en el río Quevedo, se emplearon los siguientes parámetros:

- **Potencia nominal:** a medida que aumenta la salida de potencia de la turbina, aumenta la posibilidad de su uso frecuente y la variedad de sistemas en los que puede ser utilizada.
- **Diámetro del rotor:** Es importante considerar que el tamaño del rotor en la turbina tiene un impacto directo en la producción de potencia. Este es un elemento que se tomó

en cuenta y se contrastó con los dos modelos de turbinas de perfil 4412 y 1412. Además del espacio que ocupa en el acuífero, lo que se refleja en su adaptabilidad, esto se refleja en su versatilidad.

- **Adaptabilidad:** La curva de potencia producida por las turbinas, influenciada por la velocidad del fluido producido, es un elemento que considerar al seleccionar la turbina, gracias a la sencillez de predicción que resulta al conocer la relación entre la velocidad del fluido y la potencia producida.
- **Seguridad:** Es importante considerar la seguridad de la estabilidad y la longevidad del diseño. Se tomó en cuenta el bajo riesgo de operar con animales presentes en ambos casos.
- **Costo:** Para el diseño de la turbina, se evaluó el costo de la edificación en vínculo al peso del material empleado para su instalación.

2.7 Matriz Comparación de modelos de turbina

Tabla 3

Parámetros para la comparación de turbinas

| Nº | Parámetros | Porcentaje |
|----|------------------|------------|
| 1 | Potencia Nominal | 45% |
| 2 | Adaptabilidad | 15% |
| 3 | Costo | 20% |
| 4 | Seguridad | 5% |
| | Total | 100% |

2.8 **Diseño de solución**

2.8.1 **Selección del Modelo**

El modelo seleccionó la hélice toroidal por su habilidad para incrementar la eficiencia energética en situaciones de caudal moderado, con una velocidad previamente registrada en el río Quevedo. A diferencia de los modelos tradicionales de hélices, la geometría de anillo de la hélice toroidal facilita una mayor obtención de energía cinética al reducir las pérdidas en las puntas de los alabes y minimizar la cavitación.

2.8.2 **Diseño del álabe**

Este diseño se optimizó para la captura de flujo en situaciones de baja velocidad, con una longitud media de la cuerda de 0.15 m y un perfil aerodinámico perfeccionado para disminuir el arrastre. La geometría del alabe garantiza un ángulo constante de entrada de flujo, mejorando así el desempeño global.

2.8.3 **Selección del Perfil Aerodinámico**

El perfil Naca 1412 fue optado por su bajo coeficiente de arrastre y alta sustentación en ángulos de ataque reducidos. Este perfil proporcionar una relación de sustentación/arrastre crucial para velocidades entre 3.01 m/s. Las pruebas iniciales de CFD con este perfil Naca 1412 mostraron un coeficiente de potencia (C_p) del 0.59, lo que involucra una eficiencia de conversión de energía adecuada para la aplicación.

2.8.4 **Ángulo de ataque**

El ángulo de ataque que se llevó a cabo es el 15° para las simulaciones de flujo y a la comparación de rendimiento entre las hélices. Además, aportó una relación crucial de sustentación de arrastre para las velocidades de flujo proyectadas, aumentando la eficiencia sin comprender la estabilidad.

2.8.5 Selección del número de Aspas

Se decidió por un modelo de diseño de tres aspas, dado que este número balancea la eficiencia con la estabilidad estructural y minimiza las pérdidas por vórtices en las puntas de los alabes. Este diseño aporta una distribución estandarizada de las cargas en el rotor, ocasionando un giro equilibrado a velocidades variables. (Bismark, 2024)

2.8.6 Potencia mecánica requerida de la hélice

Se demostró calculando en función del caudal y la densidad de energía existente en el río, utilizando la ecuación de potencia hidrodinámica y considerando la eficiencia del sistema en un 40-50% del límite teórico. Dando como definición el tamaño y configuración del rotor y el generador.

2.8.7 Diámetro de la hélice

Radio externo: fue comprobado a partir de la potencia requerida y las limitaciones del río, resultando en un diámetro de aproximadamente 0.4 metros. Datos más detallados fueron fijados en 0.25m.

Radio interno: se diseñó para prevenir la cavitación y alcanzar un flujo uniforme alrededor del rotor. Dato más detallado fue de 0.15m. Simulaciones con radios mayores indicaron una pérdida de eficiencia debido a la menor velocidad de rotación requerida.

2.8.8 Cuerda del alabe

El dato de la longitud de la cuerda crucial fue determinado en 0.12 m en el borde de ataque, limitando gradualmente hacia el borde de salida para disminuir el arrastre. Esta estructura permitió un flujo laminar alrededor de los alabes, agrandando la captación de energía en la hélice toroidal.

2.8.9 **Diseño del rotor**

El diseño del rotor al principio fue diseñado para soportar cargas dinámicas, transmitiendo la energía generada al sistema de transmisión. Se utilizó un material de alta resistencia y bajo peso, como el acero inoxidable marino, así fortaleciendo durabilidad en condiciones acuáticas en los tres álabes que distribuye equitativamente las fuerzas en el rotor. Las simulaciones de fatiga mostraron que el rotor sostiene su integridad estructural después de 10000 ciclos de operación constante.

2.9 **Análisis numéricos**

En esta sección para el análisis numérico, se detalla las especificaciones necesarias para un análisis exhaustivo necesario en la Hélice toroidal (Madier, 2020):




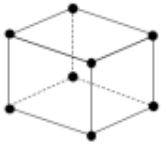

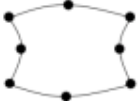

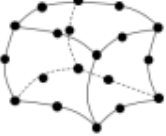
2.9.1 **Tipo de elemento**

En el análisis numérico en usos hidrocineéticos, los elementos simbolizan segmentos discretos de una geometría compleja, empleados en simulaciones computacionales fundamentadas en el método de elementos finitos (FEM). Por ende, en componentes estructurales como los álabes de la hélice toroidal, se requiere el uso de elementos curvilíneos que facilitan la modelación de la geometría no tradicional crucial para reducir fenómenos como la cavitación. Es posible que sean tridimensionales como los tetraédricos debido a su alta eficacia al realizar la simulación.

En otra parte, para los elementos fluidodinámicos: se basa en el análisis del flujo de fluidos, que se muestran por medios de celdas de malla que facilita modelar la interacción fluido-estructura.

Figura 9

Tipos de elementos usados para el mallado

| | Line element | Shell element | Tetrahedral element | Brick element |
|-----------------------------------|---|---|---|---|
| Linear (1 st order) |  |  |  |  |
| Quadratic (2 nd order) |  |  |  |  |

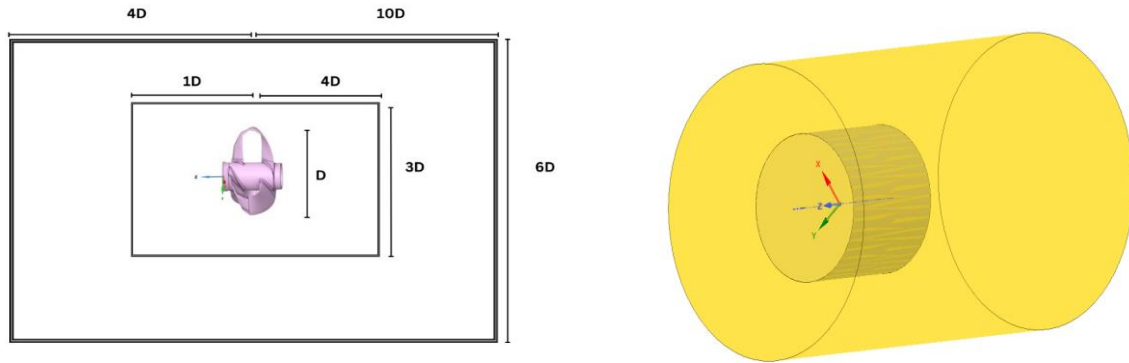
2.9.2 Volumen de control

Se refiere al dominio físico que encapsula el flujo del fluido alrededor y dentro de la turbina (hélice Toroidal). Este concepto es de gran ayuda en simulaciones fluidodinámicas (CFD) como, por ejemplo:

- Espacio físico tridimensional que en este caso la turbina y el flujo circundante están recludos, permitiendo estudiar variables como la distribución de presión, velocidad y turbulencia.
- Dando que el volumen de control incluye el área de interacción de las corrientes de agua o aire con los componentes.
- En parámetros claves: se establecen límites de entrada y salida de flujo, además, de las paredes del dominio que delimitan la interacción del fluido con el entorno.
- Para saber el tamaño del volumen de control primero se determina según las condiciones de operación, asegurando que las fronteras no interfieran con la dinámica del flujo, dando así una adecuada elección garantizando resultados precisos y minimiza errores en la simulación.

Figura 10

Dimensiones requeridas para el volumen de control.



Nota. El valor D representa el diámetro de la turbina, el cual es 40 cm.

La figura 10 muestra las dimensiones relacionadas al dominio geométrico de la hélice toroidal siguiendo las prácticas recomendadas para análisis CFD (Nakashima, 2020) .

2.9.3 Simulación computacional

Las simulaciones de CFD correspondientes se realizaron utilizando un modelo laminar para valorar el desempeño bajo condiciones de flujo realistas. Así pues, los resultados obtenidos indicaron que el sistema posee un C_p de 0.59 en circunstancias apropiadas, en consonancia con los cálculos teóricos. Adicionalmente, el programa especializado (ANSYS) facilita la integración del análisis fluido-estructura (FSI), proporcionando la relación entre las fuerzas producidas por el flujo y las tensiones provocadas en la estructura. De esta manera, permite iteraciones rápidas y económicas al identificar configuraciones que incrementan la eficiencia energética y la durabilidad estructural.

Tabla 4

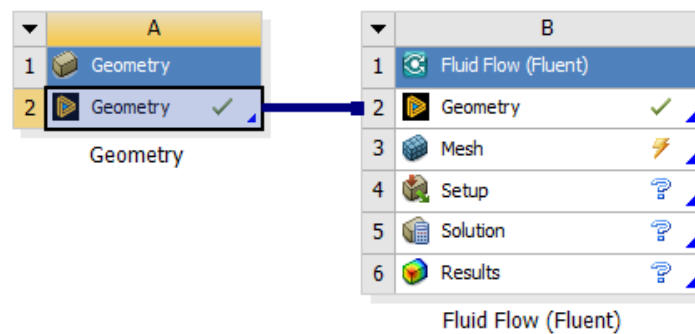
Características de Hardware de una HP envy x360

| Marca | Modelo | RAM | Tarjeta de vídeo | Procesador | Tipo de almacenamiento |
|-------|--------|------|------------------|------------|------------------------|
| Core | I5 | 8 Gb | - | 1135G7 | 3 TB SSD |

Nota: Capacidades computacionales para las respectivas simulaciones en el software y elementos infinitos.

Figura 11

Set up del workbench de ANSYS.



2.9.4 Mallado

Se empleó un mallado denso estructurado en los alabes, con un refinamiento en la superficie para capturar con exactitud la dinámica del flujo. La cantidad total de elementos fue inferior a 200 mil, lo que aseguró una resolución apropiada en las zonas con mayor fluctuación de velocidad y presión. En relación con la geometría del componente, se optó por una malla tetraédrica para el encofrado de la turbina y por un elemento hexaédrico para el encofrado del volumen de control.

Figura 12

Mallado del dominio de la turbina toroidal

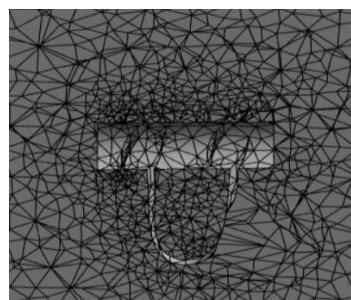
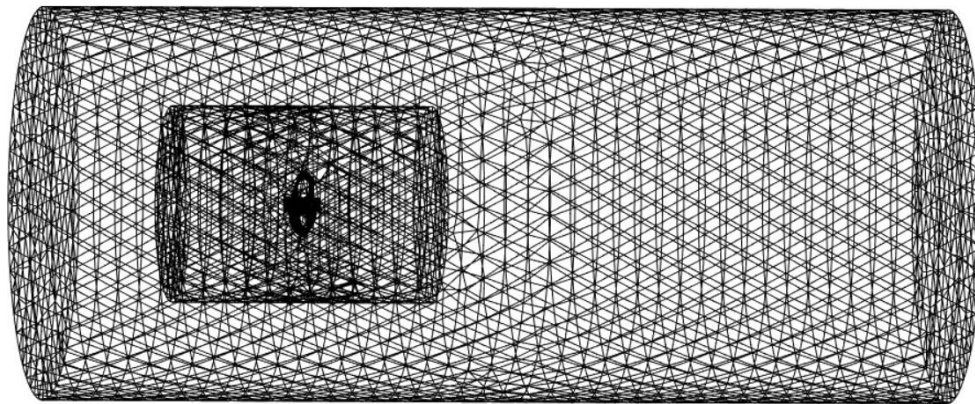


Figura 13

Vista lateral del dominio.



2.9.5 Malla dinámica

Es un método empleado en la computación de fluidos (CFD) para modelar problemas donde las geometrías y condiciones de frontera varían con el paso del tiempo, facilitando de esta manera el ajuste para ajustarse a los movimientos o deformaciones de las superficies o volúmenes de investigación.

Para el análisis numérico se usaron dos métodos para mantener el control de la calidad de la malla dinámica:

2.9.5.1 Métodos de suavizado (smoothing)

El suavizado se usa para mover los nodos internos de la malla con la finalidad de absorber los movimientos y deformaciones del contorno, manteniendo el número de nodos y sus conexiones. Se aplican diversas formas geométricas como son triangulares, tetraédricos, hexaédricos, prismas y poliédricos, tanto en 2D como en 3D.

2.9.5.2 Métodos de Remeshing (Remeshing Methods)

Este método permite recrear la malla cuando las deformaciones o el skewness exceden ciertos valores. Esto es fundamental para problemas con grandes movimientos relativos en los contornos.

2.9.6 Independencia de malla

Un concepto fundamental para el análisis numérico el cual se refiere al punto de convergencia de malla en que los resultados obtenidos no dependen del tamaño del elemento. Se tuvo un estudio de independencia de malla para confirmar que los resultados fueran consistentes. Con un malla de medio millón de elementos, las variaciones en el C_p fueron menores al 1% lo que valida la precisión del análisis numérico.

Se requiere una independencia de malla debido a las siguientes razones:

- **Optimización de recursos:** Permite usar una malla lo suficientemente refinada para obtener resultados precisos sin sobrecargar innecesariamente los recursos computacionales.
- **Precisión:** Garantiza que los resultados sean representativos de la solución física del problema y no estén influenciados por limitaciones numéricas debido a una malla demasiado gruesa.
- **Validación de resultados:** Asegura que las conclusiones del análisis numérico sean válidas independientemente de las condiciones de discretización espacial.

2.9.7 Cálculo de las iteraciones de la simulación

De acuerdo con el número de Courant, se obtiene una relación entre el tamaño mínimo del elemento (h [m]), la velocidad del fluido (U [$\frac{m}{s}$]) y el step time (Δt [s]). Estas variables se utilizan para calcular el resto de los parámetros para establecer la generación de momento:

$$CFL = \frac{U \Delta t}{h} \quad (2,16)$$

Tabla 5

Parámetros del dominio de la malla

| Datos de malla y dominio | |
|---------------------------------|-----|
| h, mm | 0,1 |
| U, m/s | 3 |
| CFL | 1 |

En lo que respecto al cálculo de iteraciones tenemos al número de Courant, se obtiene una relación entre el tamaño mínimo del elemento (h [m]), la velocidad del fluido (U [ms]) y el step time (Δt [s]). Estas variables se utilizan para calcular el resto de los parámetros, a partir del step time, con la finalidad de establecer la generación de momento.

Posteriormente se fijan los valores de revoluciones por minutos requeridos, el número de vueltas y el número de iteraciones por vuelta. Para calcular el valor de un período completo se usa la relación:

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2,17)$$

Para la obtención del período estable, multiplicamos el primer período por el número de vueltas fijado:

$$T_{estable} = n \frac{2\pi}{\omega} \quad (2,18)$$

Luego de esto se calcula la primera iteración, el cual es un cociente entre T_1 y Δt .

$$Iteration\ 1 = \frac{T_1}{\Delta t} \quad (2,19)$$

Con la finalidad de obtener todas las iteraciones, multiplicamos el número de vueltas por las iteraciones del primer cálculo.

$$\text{Iteration 4} = n \text{ iteration 1} \quad (2, 20)$$

Finalmente tenemos los datos guardados, que es la relación entre la iteración 1 y las iteraciones por vuelta

$$\text{Save data} = \frac{\text{iteration 1}}{\frac{\text{iteraciones}}{\text{vuelta}}} \quad (2, 21)$$

Tabla 6

Parámetros de condiciones de frontera y step time.

| Datos de condiciones de frontera y step time | |
|---|---------|
| Revoluciones por minuto [rpm] | 250,00 |
| Radianes por segundo [rad/s] | 26,1799 |
| Primer período, (1 T) [s] | 0,24 |
| Número de vueltas | 4 |
| Cuarto período, (4 T) [s] | 0,96 |
| iteraciones/vuelta | 40 |
| time/1 iteración, [s/iteración] | 0,006 |
| step time [s] | 0,00003 |
| iteraciones (1T) | 7200 |
| iteraciones (4T) | 28800 |
| save data, iteraciones | 180 |

Capítulo 3

3. Resultados y Análisis

Este capítulo presenta un análisis de los resultados obtenidos a lo largo del proceso de diseño y simulación de la hélice toroidal con perfil NACA 1412, presentado esquemáticamente en el apéndice 2, optimizada para la extracción de energía hidrocínética en flujos laminares característicos del río Quevedo. A través de herramientas avanzadas de simulaciones computacional, se incluyen parámetros clave como evaluaciones técnicas y económicas que muestran las capacidades del perfil y sus beneficios. Los resultados clave como potencia generada, torque, y velocidad de rotación son factores a tomar en cuenta. Además, se realiza un análisis comparativo con modelos tradicionales complementado con el análisis de gráficos y tablas que resumen los datos más relevantes para facilitar su interpretación.

3.1 Selección de Modelo

El modelo adecuado para este análisis computacional es el perfil 1412, combinado con una geometría toroidal, fue determinado por sus propiedades hidrodinámicas favorables y su capacidad para operar eficientemente en condiciones de flujo laminar de baja velocidad basado en (Bismark, 2024).

El perfil hidrodinámico como se menciona es un perfil asimétrico que el espesor máximo de la cuerda es del 12%, dando una curvatura de 10%, situada al 40% desde el borde de ataque. Dando como ventaja reducción significativa de vórtices en los extremos de los álabes. Con la justificación de la selección el modelo fue preferido frente a alternativas como el perfil NACA 4412.

3.2 Diseño del Alabe

El desarrollo del diseño del CAD fue por medio del software SolidWorks, considerando factores como el perfil NACA 1412 con su trayectoria el diámetro de la turbina y finalmente la región sólida.

La metodología de los álabes al generar el perfil se trazó la geometría de dicho perfil mediante ecuaciones estándar, sin embargo, para los datos del perfil tanto los estrados e intradós se los recolectó mediante la página AIRFOILTOOLS. Ajustando los parámetros para optimizar la captura de flujo en el rango de velocidades objetivo. Garantizando la simetría entre los álabes y así reduciendo vibraciones.

La forma de la hélice toroidal fue adaptándose, curvando hacia el centro para formar un anillo cerrado. Esto mejora la estabilidad del flujo y reduce las zonas de separación. Para lo siguiente, optimizando el ángulo de ataque que fue torsionado para mantener un eficaz ángulo de ataque a lo largo de su longitud. Dando un ángulo promedio seleccionado de 15°, basado en pruebas de simulación iniciales.

3.3 Mallado y análisis de independencia del mallado

Durante la ejecución del análisis de la generación de energía mecánica de la turbina, primero se hizo el estudio del mallado de la turbina. Para esto se usaron tres tipos de malla especificadas en la Tabla 9, cuyas configuraciones base se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7

Set up de parámetros de mallado.

| | |
|---------------------------|----------------------|
| Display | |
| Display style | Use geometry setting |
| Defaults | |
| Physics Preference | CFD |
| Solver Preference | Fluent |
| Element order | Quadratic |
| Element size | 150.0 mm |

Como variable crítica se emplea el momento (Tabla 8) para determinar la variación de este al modificar el tamaño de malla y se establece un criterio de convergencia no mayor al 5% del momento (Madier, 2020) para establecer la convergencia. Se usaron 3 tamaños de malla distintos debido a la capacidad computacional requerida para procesar la información, con las condiciones de 2m/s y 350 rpm. El mallado de la turbina mantiene una interfase cuyo tamaño de elemento global es de 150 mm, con un mallado local en la turbina de 25mm en el mallado intermedio.

Tabla 8

Parámetros para análisis de convergencia de mallado

| Datos de convergencia | Momento | Error porcentual |
|-----------------------|---------|------------------|
| Gruesa | 21,237 | - |
| Intermedia | 21,079 | 0,747 |
| Fina | 20,485 | 2,817 |

Tabla 9

Cifras de Diferentes tipos de mallas

| | Gruesa | Intermedia | Fina |
|------------------------------------|---------------|-------------------|-------------|
| | Malla 1 | Malla 2 | Malla 3 |
| Element Size Global | 155 | 150 | 150 |
| Element Size Turbina | 30 | 25 | 15 |
| Minimun Edge Length (h, mm) | 0.10294 | 0.10294 | 0.10294 |
| Nodes | 14535 | 121286 | 189577 |
| Elements | 75505 | 84624 | 134335 |

3.4 Condiciones de frontera y cargas

Para el análisis fluidodinámico realizado se crean las siguientes condiciones para poder obtener los resultados de potencia:

- Las velocidades de fluido de entrada del fluido varían entre 2, 3 y 4 m/s.
- El modelo de fluido es laminar con agua a temperatura de 23 grados Celsius.
- Las revoluciones por minuto que se usan son 250, 287 y 350.

3.5 Iteraciones

Para llevar a cabo las simulaciones se realiza la siguiente parametrización para poder obtener los datos de momento en función de las iteraciones. Como criterios para la simulación establecidos que fueron tomados en cuenta adicionales a las condiciones de frontera mencionas previamente son el step time y las iteraciones por vuelta que nos permiten calcular los períodos presentados en la sección siguiente:

3.6 Potencia producida

Para realizar la función de potencia se realiza un análisis estadístico según los resultados de las iteraciones obtenidas de los valores de momento en función del tiempo. Para el primer análisis de fluidodinámico se realizó con las siguientes condiciones dinámicas:

$$P = M \omega \quad (3,18)$$

Tabla 10*Relación de datos, condiciones de fronteras e iteraciones.*

| DATOS MALLA Y DOMINIO | | | | | | | | |
|------------------------------|----------------|-----------------|---------------------|-------------|-------|-------|-------|-----------------------------|
| h, mm | 0,1 | | | | | | | |
| CFL | 1 | | | | | | | |
| it/vuelta | 40 | | | | | | | |
| v (m/s) | RPM, vel_an | STEP TIME, s | Save data, it | iteraciones | | | | Tiempos de simulación |
| | | | | 1T | 2T | 3T | 4T | |
| 2 | 250 | 0,00005 | 120 | 4800 | 9600 | 14400 | 19200 | 24 horas |
| | 287 | | 104 | 4182 | 8364 | 12546 | 16728 | 28 horas |
| | 350 | | 85 | 3429 | 6858 | 10287 | 13716 | 23 horas |
| 3 | 250 | 0,00003 | 180 | 7200 | 14400 | 21600 | 28800 | 20 horas |
| | 287 | | 156 | 6272 | 12544 | 18816 | 25088 | 28 horas |
| | 350 | | 128 | 5143 | 10286 | 15429 | 20572 | 26 horas |
| 4 | 250 | 0,000025 | 240 | 9600 | 19200 | 28800 | 38400 | 35 horas |
| | 287 | | 209 | 8363 | 16726 | 25089 | 33452 | 38 horas |
| | 350 | | 171 | 6858 | 13716 | 20574 | 27432 | 40 horas |

3.7 Análisis de la potencia generada

Para analizar la potencia generada, se parte de las condiciones de frontera aplicadas en la sección correspondiente. Luego de esto se analizan las simulaciones realizando variación tanto en la velocidad del flujo de agua como también en las revoluciones por minuto de la turbina. De esta forma se obtiene la siguiente tabla de datos de presiones de velocidades y energías generadas:

Tabla 11

Relación condiciones de fronteras generada.

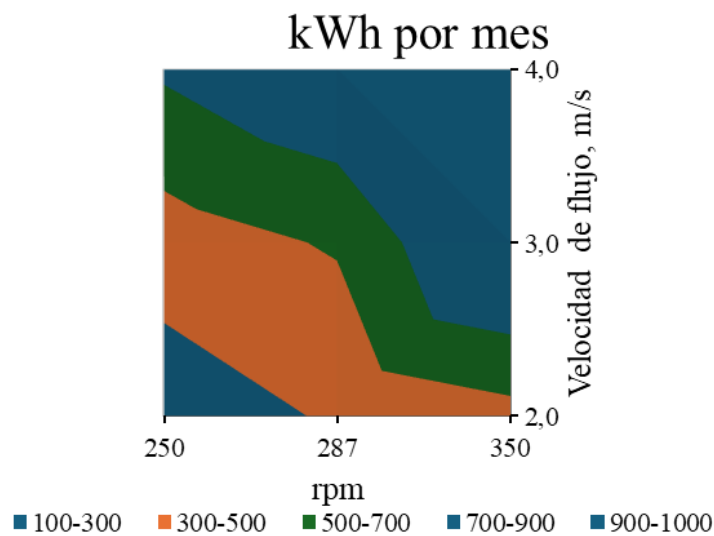
| v (m/s) | RPM | Momento Promedio (Nm) | Potencia generada (kW h mes) |
|----------------|------------|------------------------------|---|
| 2 | 250 | 14,65 | 181,21 |
| | 287 | 23,14 | 325,46 |
| | 350 | 21,07 | 435,69 |
| 3 | 250 | 32,87 | 402,27 |
| | 287 | 36,99 | 520,29 |
| | 350 | 43,23 | 999,42 |
| 4 | 250 | 59,52 | 729,25 |
| | 287 | 64,92 | 913,01 |
| | 350 | 59,15 | 831,86 |

El diseño genera la energía suficiente para poder suministrar 181.21 kWh por mes de energía como mínimo. Considerando que el consumo energético promedio por mes de un hogar en la costa es de 130 kWh, por lo que se puede abastecer a un hogar con una correcta transformación de energía mecánica a eléctrica, asumiendo que podemos tener una eficiencia máxima en la conversión de energía mecánica a eléctrica del 65% (Kim, 2018).

Se debe de considerar que existen un período de 2 a 3 vueltas donde no hay una estabilidad en el momento desarrollado a través del tiempo. Debido a esto se debe obtener un promedio del momento para el cálculo de la potencia. El valor pico generado en los momentos tiene que ser considerado para los equipos que dependan energéticamente de la turbina.

Figura 15

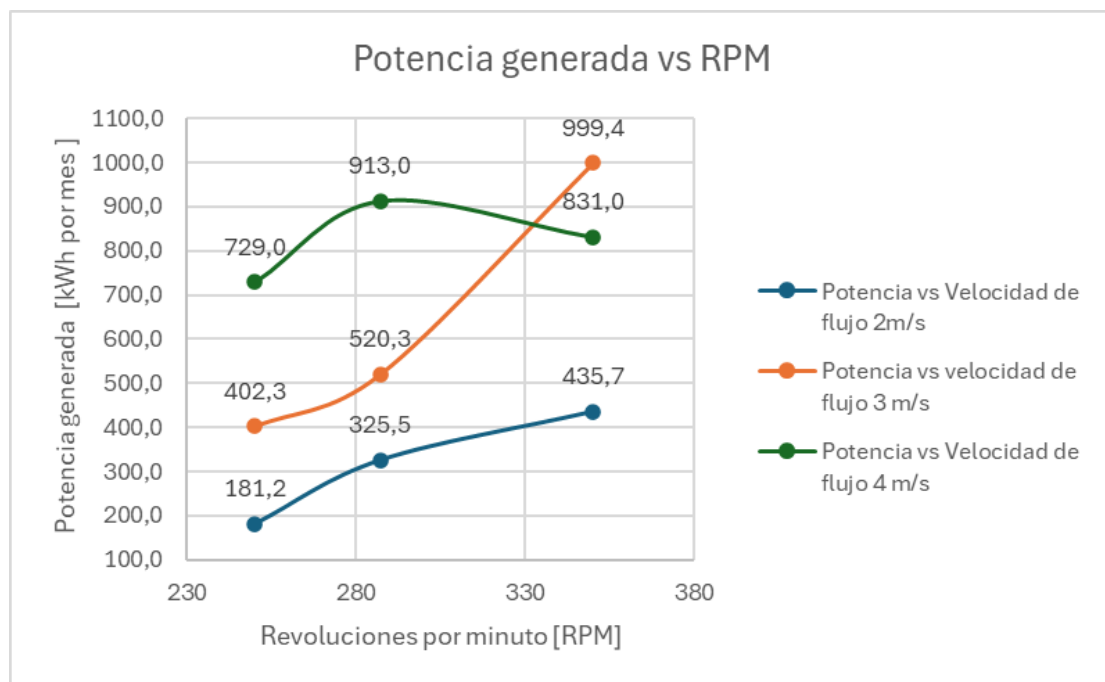
Gráfico kWh por mes generados en función de la velocidad del flujo y las revoluciones por minuto.



En la figura 16 se muestra la variación de la potencia generada por mes a partir de la variación de las revoluciones por minuto requeridas, se observa que el máxima generación de energía se genera a 350 rpm con una velocidad de flujo de 3 m/s produciendo 999.4 Kwh por mes, una característica del comportamiento de la turbina a esta velocidad de flujo es que su potencia máxima es alcanzada a su máximo rpm simulado lo cual puede indicar que la energía producida aún puede seguir aumentando. En contraste a las otras velocidades donde es alcanzado el punto a 287 rpm lo que indica su punto de máxima eficiencia.

Figura 16

Gráfico kWh por mes generados en función de las revoluciones por minuto.



3.8 Comparación de modelos

Realizando la comparación con una turbina de trayectoria convencional de perfil 4412 usando datos obtenidos por (Bismark, 2024) y la turbina de trayectoria toroidal de perfil 1412. Se obtuvo la siguiente tabla de resultados en el cual se usa como criterio la generación de potencia para establecer el desempeño. Se establecen las condiciones de frontera adecuadas (velocidad de flujo y revoluciones por minuto), las cuales sirven para determinar que el perfil NACA 4412 genera más energía en ambas condiciones que la turbina toroidal 1412. Lo que permite inferir que existe una pérdida de energía mayor en este tipo de sistemas al tener el mismo diámetro. Para el primero caso, genera la turbina de trayectoria convencional un 67% más potencia que la turbina de trayectoria toroidal, para el caso de mayor eficiencia de turbina de trayectoria toroidal esta brecha se reduce a un 34% con respecto a la potencia generada por la otra trayectoria.

Tabla 12

Comparación de parámetros NACA 4412 convencional y NACA 1412 toroidal.

| Parámetros | NACA 4412 Convencional | NACA 1412 Toroidal |
|--|-------------------------------|---------------------------|
| Potencia generada en el punto de mayor eficiencia para el perfil NACA 4412 | 3400 W a 3 m/s a 287 rpm | 1111 W a 3m/s 287 rpm |
| Potencia generada en el punto de mayor eficiencia para el perfil NACA 1412 | 3250 W a 3m/s a 350 rpm | 2135 W a 3m/s 350 rpm |

3.9 Análisis económico

El análisis de costos de la presente investigación se enfoca en el análisis de diseño y producción de la hélice toroidal, en diversos factores asociados a la realización de las simulaciones y el desarrollo del proyecto, asegurando una inversión de los medios financieros haciendo un manejo integro en cada aspecto del proyecto. Por lo que los costos se basan en el tiempo de uso (consumo eléctrico), los softwares en los que se realizó los análisis de convergencia, creación del modelo geométrico del dominio del flujo, diseño del CAD de la hélice y la creación del mesh; y además los equipos donde la validación numérica de la hélice toroidal se llevó a cabo la ejecución. El precio total del proyecto está detallado en la tabla del Apéndice A en donde se obtuvo un valor de \$651.

Asumiendo que la turbina toroidal funciona a 350 rpm y 3 m/s nosotros tenemos una generación de energía de 520 kWh al mes de acuerdo con la Tabla 11. Haciendo uso de la

siguiente relación y el costo total de la manufactura de la turbina toroidal proporcionado por (Bismark, 2024) de \$2618 tenemos el precio del kWh:

$$\text{Costo por kWh} = \frac{\text{Costo total del proyecto}}{\text{Energía total generada en años del proyecto}}$$

$$\text{Costo por kWh} = \frac{\$2618 + \$652}{12 \text{ meses (520 kWh por mes)}} = \$0.52$$

Considerando que el retorno de inversión posee la siguiente forma L

$$\text{ROI} = \frac{\text{Costo de la turbina}}{\text{Ahorro Anual}} = \frac{\$2618 + \$652}{12(520 \text{ kWh por mes})(\$0.52)} = 1 \text{ año}$$

Tabla 13

Comparación económico de las hélices convencional y toroidal.

| Datos | Hélice toroidal | Hélice convencional |
|-------------------------|------------------------|----------------------------|
| Horas laborables | 8 | 8 |
| Potencia En kWh | 529 | 624 |
| Costo al mes | \$ 52 | \$63 |
| Total, por año | \$ 624 (4 HOGARES) | \$756 (4 HOGARES) |

Este análisis de comparación explica que la hélice toroidal consume menos potencia que la Convencional por lo que se indica que es la opción más viable y más economía en términos de costo de kWh, es decir, por la Potencia generada de las dos Turbinas la Toroidal es la más indicada para el consumo energético en comunidades vulnerables. Pero hablando de su diseño las turbinas hidro cinéticas el valor de kWh es de \$0.35 lo cual no son tan asequible monetariamente por su alto valor de kWh.

Capítulo 4

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

Tras realizar el análisis numérico respecto al modelo propuesto se obtuvieron las siguientes conclusiones:

El diseño toroidal de la turbina usando el perfil NACA 1412 demostró ser una solución adecuada en los flujos laminares de baja velocidad debido a la reducción de vórtices en los extremos de los álabes, cumpliendo el objetivo de optimizar la conversión de energía.

Los resultados de la simulación validan una generación de un mínimo de 181,21 kWh por mes de energía en unas condiciones de 2m/s y 250 rpm, suficiente para abastecer el consumo promedio de un hogar en la costa. Satisfaciendo a la contribución de generación de energía renovable a pequeña escala.

Existe una relación positiva entre la velocidad del flujo, los rpm y la potencia generada, lo cual lo hace versátil a diversas situaciones. La mayor generación de energía es lograda a una velocidad de flujo de 3 m/s y 350 rpm, cabe mencionar que existe una reducción en la generación de energía a partir de 4 m/s y 287 rpm, el cual experimenta una caída cuando el rpm llega a 350 rpm.

Se identificó que el momento durante las primeras vueltas no es representativo para considerarlo en la estimación de la potencia debido a la falta de estabilidad. El cálculo de la potencia debe basarse en un promedio estable, lo que asegura la precisión de los resultados obtenidos.

El estudio revela que la hélice toroidal es más factible y asequible que la tradicional, con un costo por kWh de \$0.52 y un rendimiento de la inversión de un año. A pesar de que la hélice convencional produce más potencia, la toroidal disminuye el consumo y los gastos

anuales, resultando perfecto para comunidades en situación de vulnerabilidad. En comparación con las turbinas hidrocinéticas, proporciona una opción más asequible y sustentable con una inversión y costos de operación más reducidos.

4.2 Recomendaciones

Tras culminar lo planificado en la propuesta, se plantean las siguientes recomendaciones:

Es recomendable realizar pruebas experimentales manteniendo las condiciones controladas para validar los resultados numéricos obtenidos y realizar en análisis de su comportamiento bajo esas condiciones.

Se sugiere realizar una evaluación del desempeño del diseño toroidal de la turbina en un rango más amplio de velocidades de flujo, incluyendo situaciones donde existen turbulencias, para identificar límites operativos y potenciales ajustes en el diseño.

Finalmente se recomienda analizar variaciones al diseño toroidal, como combinaciones con el diseño toroidal, realizar combinaciones en los perfiles NACA, para identificar mejores en la generación de energía.

Referencias

- Alarcón, I. (2023). *El hidrógeno verde potenciaría la construcción de hidroeléctricas en Ecuador*. Climate Tracker Latam. -<https://climatetrackerlatam.org/historias/el-hidrogeno-verde-potenciaría-a-las-hidroelectricas-en-ecuador/>.
- Anthony Barzola, B. C. (2023). *Diseño y Simulación fluido-estructura hidrocínética de flujo axial*. Guayaquil: Facultad de Ingeniería en Mecánica y ciencias de la Producción.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2015). *Estudio de viabilidad de turbinas hidrocínéticas en ríos de Perú, Ecuador y Brasil para generación de energía sin represas*. Copyright © 2024 - WordPress Theme by Creative Themes-<https://iqlatino.org/turbinas-hidrocineticas-energia/>.
- Bismark, D. M. (2024). *Desarrollo de un prototipo de Turbina Hidrocínética para la Extracción de Energía en Canales de Ríos y Sistemas de Riego*. Escuela Superior Politécnica del litoral-Facultad de ingeniería en mecánica y Ciencias de la Producción.
- Carlton, J. (2012). *Marine Propellers and Propulsion*. Copyright © 2007, John Carlton. Published by Elsevier Ltd. All right reserved.
- Castro, T. (2022). *Evaluación de Factibilidad de Micro Generación de Electricidad a través de Centrales Hidrocínéticas en Ríos*. Universidad Politécnica Salesiana.
- César Octavio Quinaluisa Morán, K. V. (2019). *Energía hídrica en el Ecuador*. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i2.6.560>.
- Galindo, D. R. (2006). *Diseño De perfiles Aerodinamica*. México: esis de Ingeniería Aeronáutica, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional.
- Huppert, H. E. (2006). *Journal of Fluid Mechanic*. © 1990 Cambridge University Press. Professor C. P. Caulfield Dept of Applied Mathematics and Theoretical.
- IQ Latino. (2015). *¿Solución energética para poblaciones en América Latina?* Copyright © 2024 - WordPress Theme by Creative Themes.
- Jack P. Holman, J. R. (2015). *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. McGraw-Hill. Copyright 1995 by Mcgraw-Hill, INC.
- Killen, T. j. (2023). *Panorama del sector energético privado en Ecuador y el papel de China*. © 2024 Copyright Conservation news. Mongabay is a U.S.-based non-profit conservation and environmental science news platform. Our EIN or tax ID is 45-3714703.
- Kim, D. (2018). Wind Turbine Generator Efficiency Based on Powertrain Combination and Annual Power Generation Prediction. *mdpi*.

- Kundu, P. K. (2015). *Fluid Mechanics (6th ed.)*. Academic Press.
- Lukar Zagar, M. J. (2020). *Comparison and Analysis of Toroidal and Classic Propellers*. Laboratory for Neuromechanics and Biorobotics, Department of Automation, Biocybernetics and Robotics, Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia.
- Madier, D. (2020). *Practical Finite Element Analysis for Mechanical Engineers*. Canada: © 2020 Dominique Madier. All Rights Reserved.
- Martinez, A. L. (1991). *Fluidodinamica*. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid, pp. 83-110. ISBN 84-87125-13-1.
- Mehemet Kanoglu, Y. A. (2019). *Fundamentals and Applications of Renewable Energy*. McGraw Hill; 1er edición (5 Junio 2019).
- Ministerio de Energía y Minas. (2022). *Ministerio de Energía y Minas*. Obtenido de <https://www.rekursosyenergia.gob.ec/ecuador-consolida-la-produccion-electrica-a-partir-de-fuentes-renovables/#:~:text=Bajo%20este%20precepto%2C%20es%20importante,%2C%20g eotermia%2C%20entre%20otras>).
- Nakashima, T. (2020, Febrero 5). *The Journal of Engineering*. Retrieved from Reasearch Gate: https://www.researchgate.net/publication/346617266_Active_aerodynamics_control_of_simplified_vehicle_body_in_a_crosswind_condition
- Portilla, C. (2018). *Diseño mecánico de una turbina hidrocínética para generación de energía en la Estación de Biodiversidad del Tiputini*. Universidad San Francisco de Quito .
- Rajat Prajapati, B. P. (2024). *Comparing Toroidal Propeller Performance with Different Blade Numbers at Different RPM: CFD Analysis and Evaluation*. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT) Volume 13, Issue 04 (April 2024).
- Sarpkaya, T. ' (2010). *Wavw Forces on Offshore Structures*. Van Nostrand Reinhold.
- Silva Jair, L. J. (2018). Diseño y simulación de turbina hidrocínética destinada al río Santiago de la provincia de Morona Santiago. *Proyecto Integradir*, pág. 123.
- Tahsin Tezdogan, J. R. (2010). *Hydrodynamic Performance and Noise Reduction of Toroidal Marine Propellers*. Ocean Engineering, 37(2-3), 187-194.
- White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics (7th ed.)*. Copyright © 2011 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Apéndice A

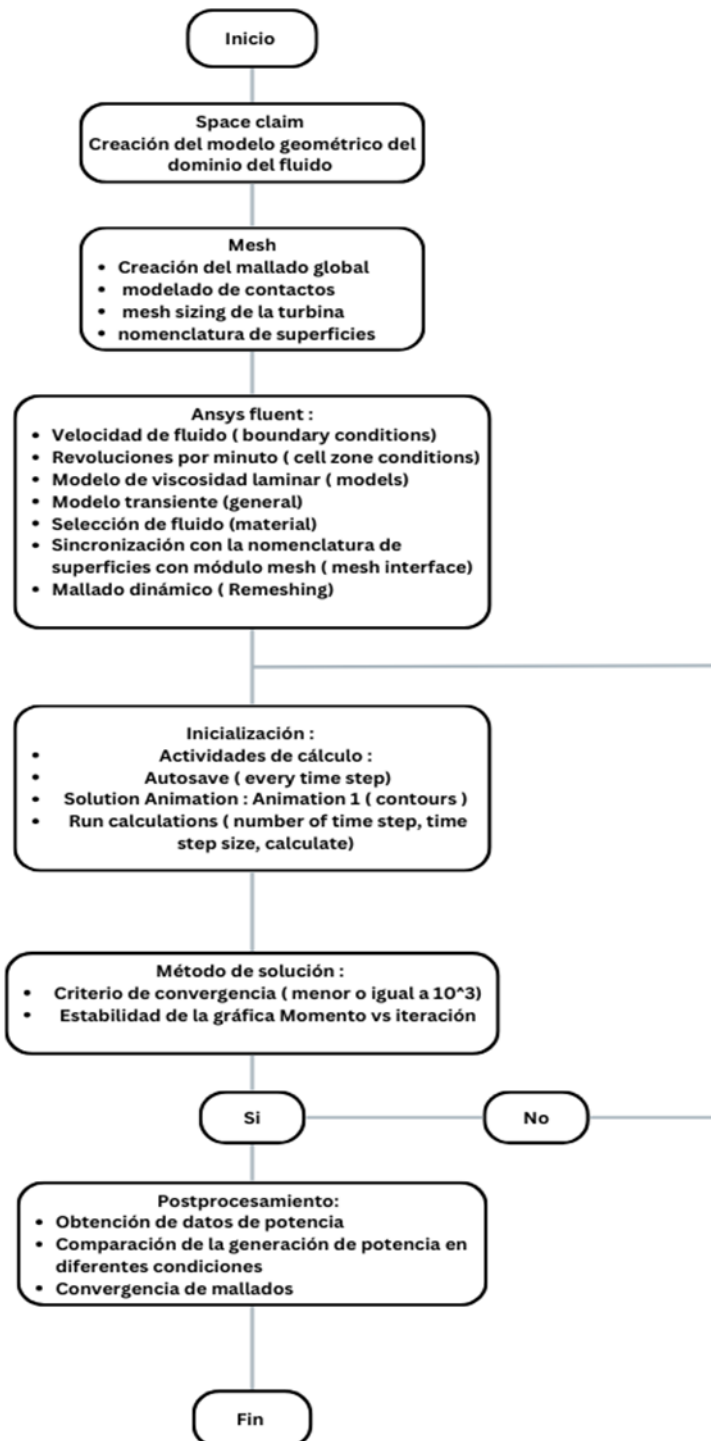
1. Apéndice A1

Parámetro de costos

| Componente | Descripción | Cantidad | Precio | Tiempo |
|---------------------------|--------------------|-----------------|---------------|---------------|
| Consumo energético | Simulación | 9 | \$50 | 56 horas |
| | Prueba y error | 10 | \$33 | 336 horas |
| | Space claim | 1 | \$ 17 | 168 horas |
| | Mesh | 4 | \$17 | 168 horas |
| | Set Up | 15 | \$17 | 168 horas |
| | Diseño del CAD | | \$17 | 168 horas |
| | | | | Total: \$151 |
| Solidworks | Licencia | 2 | \$100 | |
| Recursos externos | Disco Duro | 1 | \$100 | |
| Ansys fluent | Gratis | Gratis | Gratis | Gratis |
| Mano de obra | | | \$300 | |
| Total | | | \$651 | |

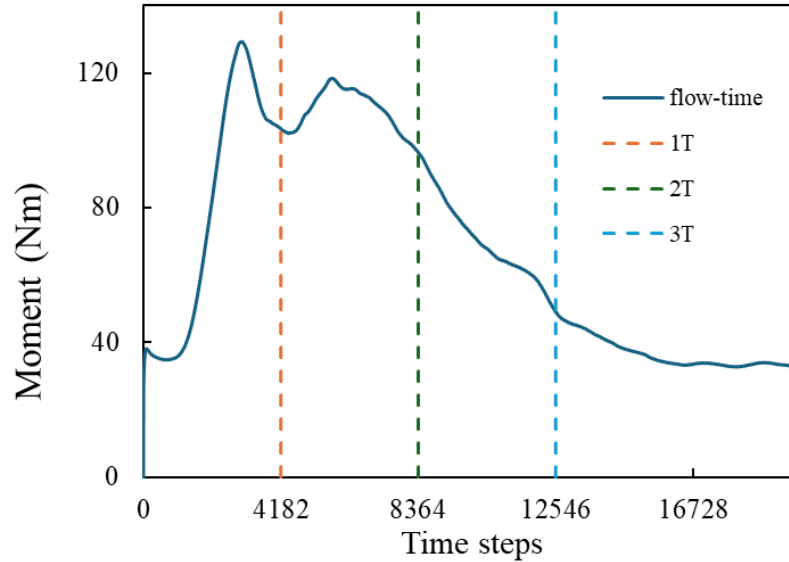
2. Apéndice A.2.

Set up de la simulación en ANSYS



3. Apéndice A.3

Momento generado a 3m/s a 250 rpm



3.1.1 Apéndice A.3.1

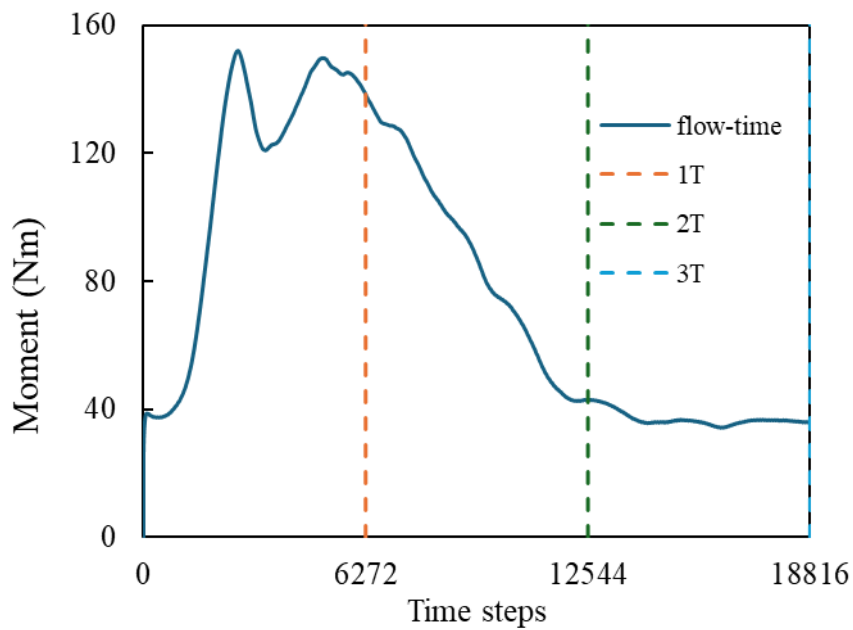
Cálculo de iteraciones de 3 m/s con 250 rpm al momento de ejecutar la simulación.

| DATOS MALLA Y DOMINIO | |
|-----------------------|-----|
| h, mm | 0.1 |
| U, m/s | 3 |
| CFL | 1 |

| DATOS PROBLEMA Y SIMULACION | |
|-----------------------------|----------|
| vel_ang, RPM | 250.00 |
| vel_ang, rad/s | 26.18 |
| 1T, s | 0.24 |
| 2T, s | 0.48 |
| it/vuelta | 40 |
| time/1it, s/it | 0.006 |
| step time, s | 3.33E-05 |
| iteraciones (1T) | 7200 |
| iteraciones (4T) | 28800 |
| save data, it | 180 |

4. Apéndice A.4

Momento generado a 3m/s a 287 rpm



4.1.1 Apéndice A.4.1

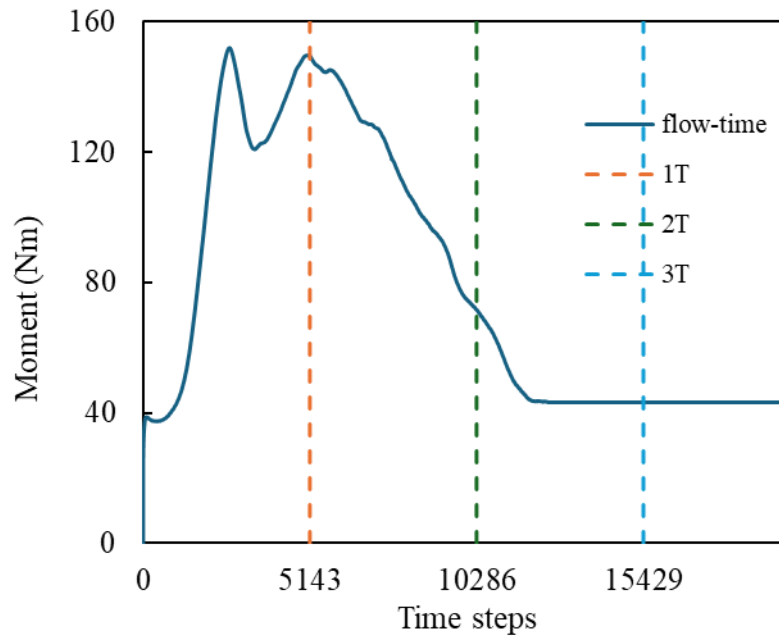
Cálculo de iteraciones de 3 m/s con 287 rpm al momento de ejecutar la simulación.

| DATOS MALLA Y DOMINIO | |
|-----------------------|-----|
| h, mm | 0.1 |
| U, m/s | 3 |
| CFL | 1 |

| DATOS PROBLEMA Y SIMULACION | |
|-----------------------------|------------|
| vel_ang, RPM | 287.00 |
| vel_ang, rad/s | 30.0545697 |
| 1T, s | 0.20905923 |
| 2T, s | 0.41811847 |
| it/vuelta | 40 |
| time/1it, s/it | 0.00522648 |
| step time, s | 3.3333E-05 |
| iteraciones (1T) | 6272 |
| iteraciones (4T) | 25088 |
| save data, it | 156 |

5. Apéndice A.5

Momento generado a 3m/s a 350 rpm



5.1.1 Apéndice A.5.1

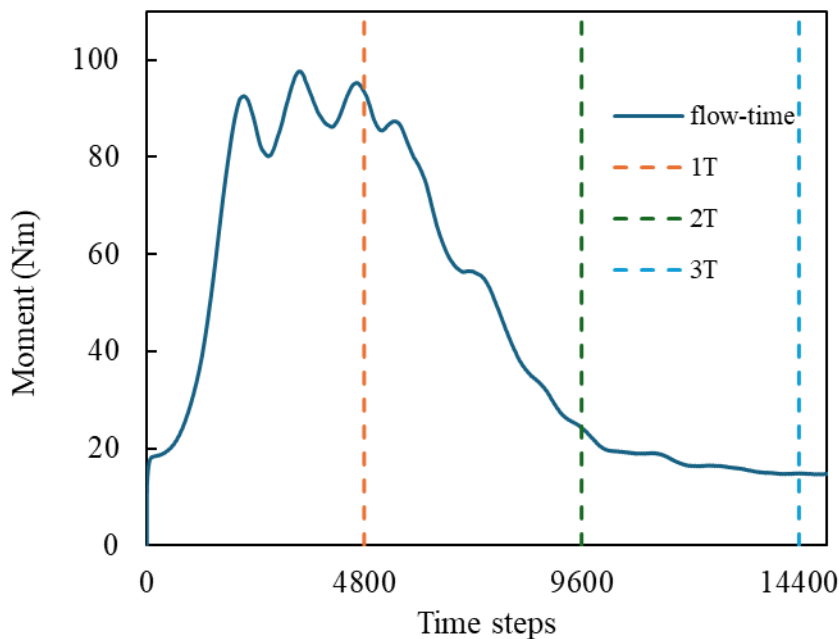
Cálculo de iteraciones de 3 m/s con 350 rpm al momento de ejecutar la simulación.

| DATOS MALLA Y DOMINIO | |
|-----------------------|-----|
| h, mm | 0.1 |
| U, m/s | 3 |
| CFL | 1 |

| DATOS PROBLEMA Y SIMULACION | |
|-----------------------------|------------|
| vel_ang, RPM | 350.00 |
| vel_ang, rad/s | 36.6519143 |
| 1T, s | 0.17142857 |
| 2T, s | 0.34285714 |
| it/vuelta | 40 |
| time/lit, s/it | 0.00428571 |
| step time, s | 3.3333E-05 |
| iteraciones (1T) | 5143 |
| iteraciones (4T) | 20572 |

6. Apéndice A.6

Momento generado a 2m/s a 250 rpm



6.1.1 Apéndice A.6.1

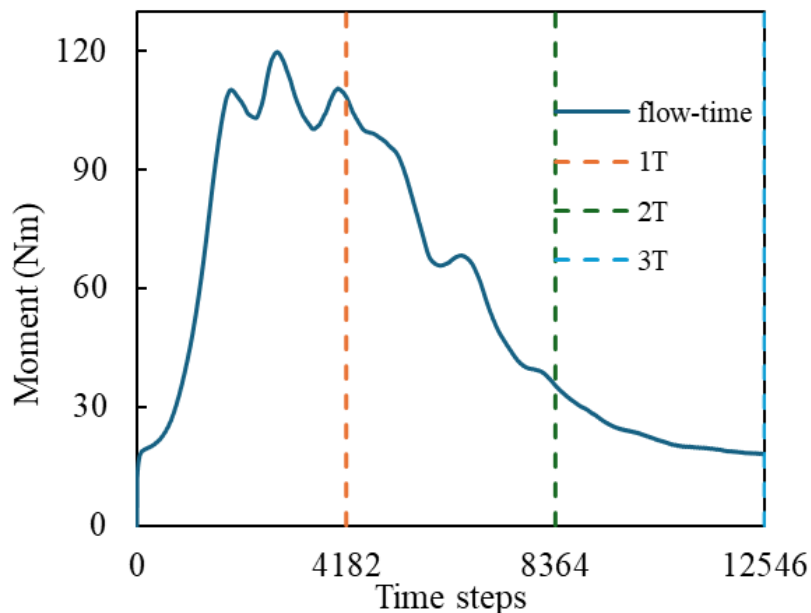
Cálculo de iteraciones de 2 m/s con 250 rpm al momento de ejecutar la simulación.

| DATOS MALLA Y DOMINIO | |
|-----------------------|-----|
| h, mm | 0.1 |
| U, m/s | 2 |
| CFL | 1 |

| DATOS PROBLEMA Y SIMULACION | |
|-----------------------------|------------|
| vel_ang, RPM | 250.00 |
| vel_ang, rad/s | 26.1799388 |
| 1T, s | 0.24 |
| 2T, s | 0.48 |
| it/vuelta | 40 |
| time/1it, s/it | 0.006 |
| step time, s | 0.00005 |
| iteraciones (1T) | 4800 |
| iteraciones (4T) | 19200 |

7. Apéndice A.7

Momento generado a 2m/s a 287 rpm



7.1.1 Apéndice A.7.1

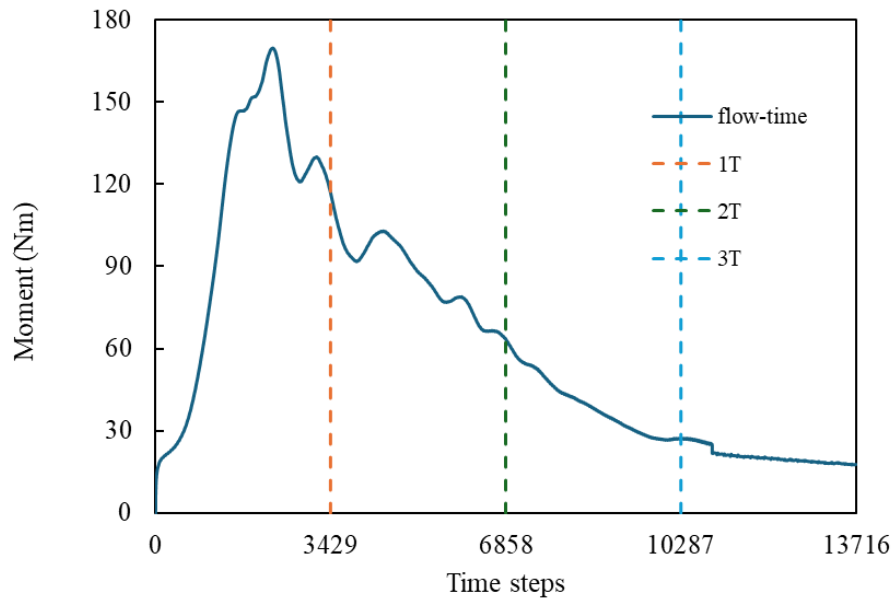
Cálculo de iteraciones de 2 m/s con 287 rpm al momento de ejecutar la simulación.

| DATOS MALLA Y DOMINIO | |
|-----------------------|-----|
| h, mm | 0.1 |
| U, m/s | 2 |
| CFL | 1 |

| DATOS PROBLEMA Y SIMULACION | |
|-----------------------------|------------|
| vel_ang, RPM | 287.00 |
| vel_ang, rad/s | 30.0545697 |
| 1T, s | 0.20905923 |
| 2T, s | 0.41811847 |
| it/vuelta | 40 |
| time/1it, s/it | 0.00522648 |
| step time, s | 0.00005 |
| iteraciones (1T) | 4182 |
| iteraciones (4T) | 16728 |
| save data, it | 104 |

8. Apéndice A.8

Momento generado a 2m/s a 350 rpm



8.1.1 Apéndice A.8.1

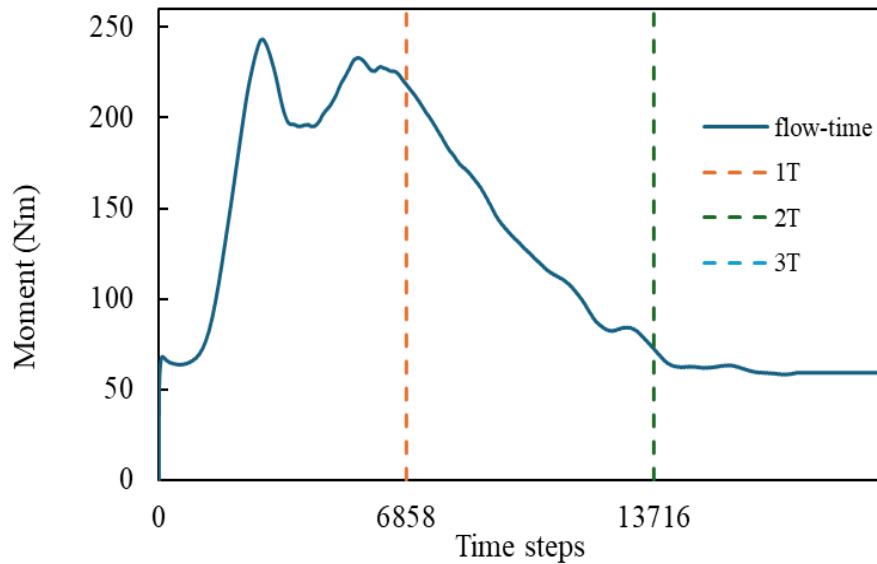
Cálculo de iteraciones de 2 m/s con 350 rpm al momento de ejecutar la simulación.

| DATOS MALLA Y DOMINIO | |
|-----------------------|-----|
| h, mm | 0.1 |
| U, m/s | 2 |
| CFL | 1 |

| DATOS PROBLEMA Y SIMULACION | |
|-----------------------------|------------|
| vel_ang, RPM | 350.00 |
| vel_ang, rad/s | 36.6519143 |
| 1T, s | 0.17142857 |
| 2T, s | 0.34285714 |
| it/vuelta | 40 |
| time/1it, s/it | 0.00428571 |
| step time, s | 0.00005 |
| iteraciones (1T) | 3429 |
| iteraciones (4T) | 13716 |
| save data, it | 85 |

9. Apéndice A.9

Momento generado a 4m/s a 350 rpm



9.1.1 Apéndice A.9.1

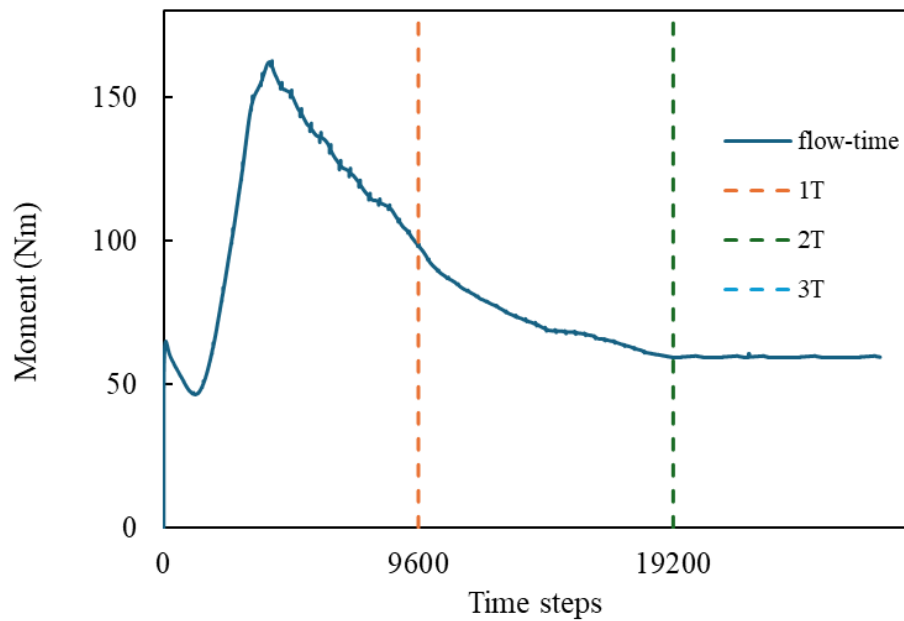
Cálculo de iteraciones de 4 m/s con 350 rpm al momento de ejecutar la simulación.

| DATOS MALLA Y DOMINIO | |
|------------------------------|-----|
| h, mm | 0.1 |
| U, m/s | 4 |
| CFL | 1 |

| DATOS PROBLEMA Y SIMULACION | |
|------------------------------------|------------|
| vel_ang, RPM | 350.00 |
| vel_ang, rad/s | 36.6519143 |
| 1T, s | 0.17142857 |
| 2T, s | 0.34285714 |
| it/vuelta | 40 |
| time/lit, s/it | 0.00428571 |
| step time, s | 0.000025 |
| iteraciones (1T) | 6858 |
| iteraciones (4T) | 27432 |
| save data, it | 171 |

10. Apéndice A.10

Momento generado a 4m/s a 250 rpm



10.1.1 Apéndice A.10.1

Cálculo de iteraciones de 4 m/s con 250 rpm al momento de ejecutar la simulación.

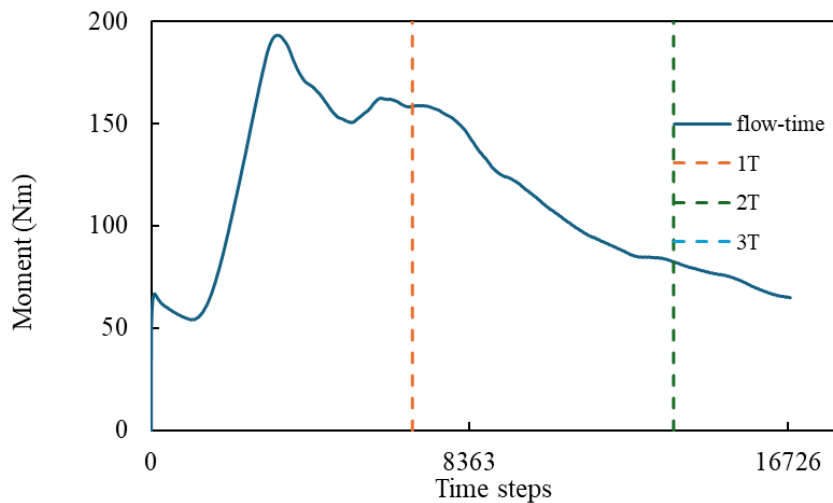
| DATOS MALLA Y DOMINIO | |
|-----------------------|-----|
| h, mm | 0.1 |
| U, m/s | 4 |
| CFL | 1 |

| DATOS PROBLEMA Y SIMULACION | |
|-----------------------------|------------|
| vel_ang, RPM | 250.00 |
| vel_ang, rad/s | 26.1799388 |
| 1T, s | 0.24 |
| 2T, s | 0.48 |
| it/vuelta | 40 |
| time/1it, s/it | 0.006 |
| step time, s | 0.000025 |
| iteraciones (1T) | 9600 |

| | |
|-------------------------|-------|
| iteraciones (4T) | 38400 |
| save data, it | 240 |

11. Apéndice A.11

Momento generado a 4m/s a 287 rpm



11.1.1 Apéndice A.11.1

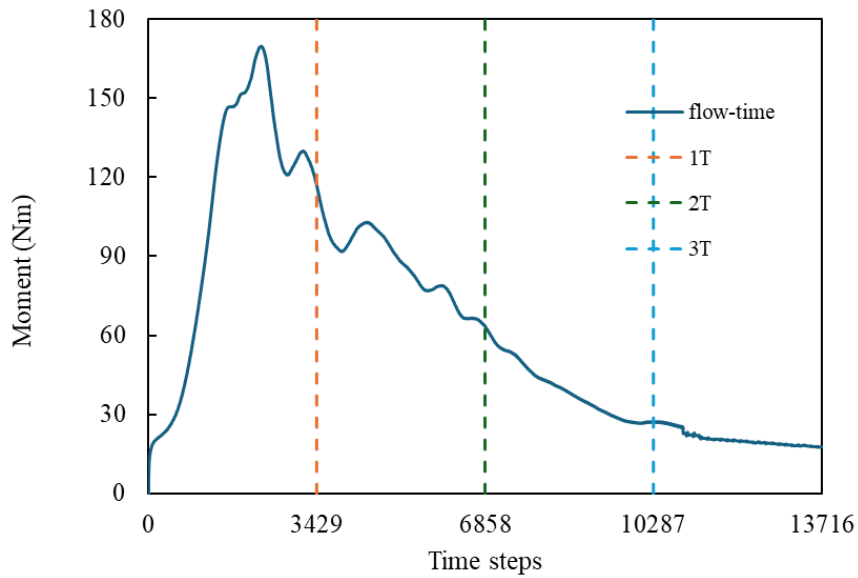
Cálculo de iteraciones de 4 m/s con 287 rpm al momento de ejecutar la simulación.

| DATOS MALLA Y DOMINIO | |
|------------------------------|-----|
| h, mm | 0.1 |
| U, m/s | 4 |
| CFL | 1 |

| DATOS PROBLEMA Y SIMULACION | |
|------------------------------------|------------|
| vel_ang, RPM | 287.00 |
| vel_ang, rad/s | 30.0545697 |
| 1T, s | 0.20905923 |
| 2T, s | 0.41811847 |
| it/vuelta | 40 |
| time/1it, s/it | 0.00522648 |
| step time, s | 0.000025 |
| iteraciones (1T) | 8363 |
| iteraciones (4T) | 33452 |
| save data, it | 209 |

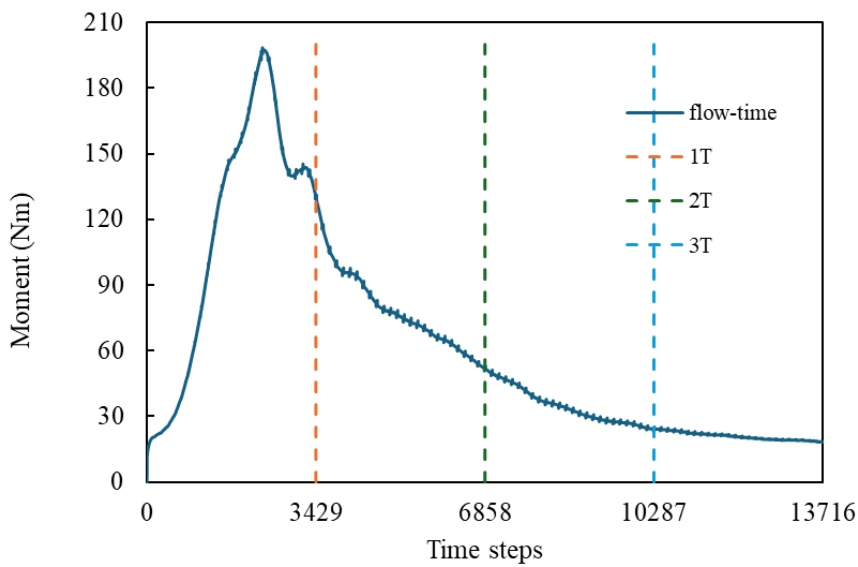
12. Apéndice A.12

Diagrama de momento vs iteración en malla intermedia.



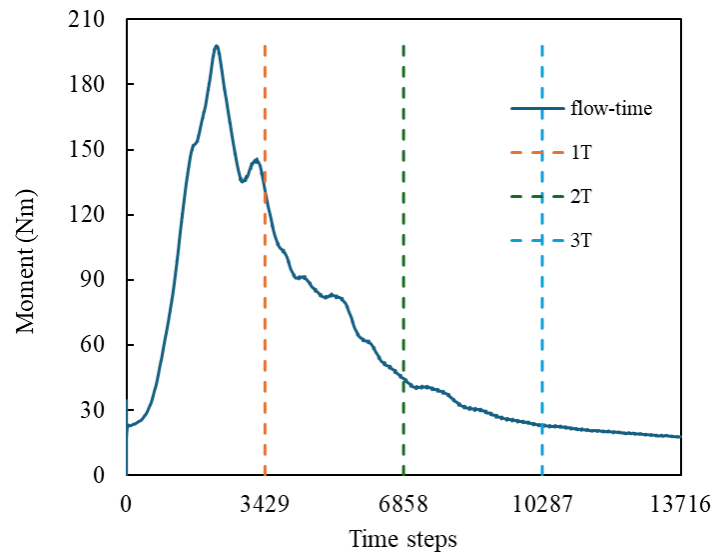
13. Apéndice A.13

Diagrama de momento vs iteración en malla gruesa. Total, de horas (16 horas)



14. Apéndice A.12

Diagrama de momento vs iteración en malla fina. Total, de horas (20 horas)



15. Apéndice A.15

Potencia genera por 8 horas promedio.

| v (m/s) | RPM | Potencia generada (kW h/mes) | Potencia generada (kW h/hora) | Potencia generada (kW h a 8 horas) |
|----------------|------------|---|--|---|
| | 250 | 181,21 | 0,252 | 2,016 |
| 2 | 287 | 325,46 | 0,452 | 3,616 |
| | 350 | 435,69 | 0,605 | 4,84 |
| | 250 | 402,27 | 0,559 | 4,472 |
| 3 | 287 | 520,29 | 0,723 | 5,784 |
| | 350 | 999,42 | 1,387 | 11,096 |
| | 250 | 729,25 | 1,013 | 8,104 |
| 4 | 287 | 913,01 | 1,268 | 10,144 |
| | 350 | 831,86 | 1,156 | 9,248 |