



Desarrollo de una turbina Oscilante bioinspirada

Andrés Saldarriaga Gutiérrez

Trabajo de investigación para obtener el título de Magíster en Ingeniería - énfasis energía

Director: Dr. Edwin Chica Arrieta edwin.chica@udea.edu.co

Director: Dr. Felipe Andrés Obando Vega felipe.obando@udea.edu.co

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Referencia

- [1] A. Saldarriaga Gutierrez y E. L. Chica Arrieta, y F. A. Obando Vega “Desarrollo de una turbina Oscilante bioinspirada”, Tesis de maestría, Maestría en Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.

Estilo IEEE (2020)



Maestría en Ingeniería, Cohorte II.

Grupo de Investigación Energía Alternativa.

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Este espacio en el papel es para todas aquellas personas que caminaron conmigo, en silencio, con una voz de aliento, con un gesto o con largas horas de trabajo y compañía. Es para mi familia, mis padres Rocío y Orlando, que con una bendición y un mantra cada mañana me despedían: "¡Mijo, métale la ficha!". También es para mi hermana Nataly y mi novia Valentina. Quiero agradecer a los profesores del grupo de investigación Edwin, Felipe, Sergio y Laura, por su apoyo, consejo, corrección y aliento a mi progreso. A mis parceros de voleibol, los más fieles compañeros de vida, a mis compañeros del grupo GEA, por hacer el aguante.

Este espacio de amor y agradecimiento en el papel también es para la Universidad de Antioquia, mi universidad, mi alma mater, mi alma. Un espacio que, más que ladrillos naranjas y cemento, está hecho de personas. ¡Viva la Universidad!

Tesis: Desarrollo de una turbina Oscilante bioinspirada

Autor: Andrés Saldarriaga Gutiérrez

Índice

1. Resumen	7
2. Introducción	8
3. Justificación del proyecto	11
4. Marco teórico	12
4.1. Energías alternativas	12
4.2. Sistemas de generación hidrodinámicos	12
4.2.1. Sistemas de generación oscilantes	13
4.3. Turbinas flapping foil	17
4.3.1. Parámetros ambientales	18
4.3.2. Parámetros geométricos	19
4.3.3. Parámetros cinemáticos	20
4.3.4. Parámetros de rendimiento	21
4.4. Biomimetismo	23
4.5. Ciclo de vida	23
4.6. Recurso hídrico de Colombia	24
4.7. Diversidad en Colombia	25
4.8. Fauna acuática Colombiana	25
4.9. Locomoción de los peces	25
4.10. Análisis computacional de fluidos (CFD)	26
4.11. Flujo óptico	27
5. Estado del arte	28
6. Diseño de turbinas oscilantes	49
6.1. Diseño de turbina base	49
6.2. Diseño bioinspirado	51
7. Simulación CFD	59
7.1. Independencia de la malla	61
7.2. Independencia temporal	63
7.3. Resultados y análisis	64
8. Experimentación	67
8.1. Sistema de medición	68
8.2. Medición con visión artificial	68
8.3. Medición con sensores	70
8.4. Resultados y Análisis	71

Índice de figuras

1. Demanda global de energía	8
2. Mapa zonas no interconectadas de Colombia	9
3. Matriz eléctrica de Colombia	10
4. Estructura de un sistema hidrocínético de generación	12
5. Clasificación de los sistemas de Generación hidrocínéticos	13
6. Clasificación de las turbinas oscilantes	14
7. Esquema de un sistema sometido a galope transversal	15
8. Esquema de un sistema sometido a galope torsional	16
9. Esquema de un perfil aerodinámico inestable	16
10. Esquema de una turbina flapping foil	18
11. Esquema 3D de un perfil de turbina flapping foil	19
12. Esquema de una turbina flapping foil	20
13. Atlas de ríos en Colombia	24
14. Gráfica de contorno de vorticidad	30
15. Esquema de la turbina estudiada por Su et al. [70]	31
16. Esquema de turbina oscilante propuesto por Wang and Ng [42]	32
17. Configuración experimental propuesta por Duarte et al. [72]	33
18. Modelo de prueba turbina oscilante propuesto por Zhao et al. [73]	33
19. Esquema de la configuración experimental propuesto por Liu et al. [74]	34
20. Representación esquemática de una lámina de membrana oscilante	35
21. Esquema de la instalación de una turbina oscilante por Kim et al. [76]	36
22. Dominio computacional de un álabe batiente usado por Wang et al. [77]	37
23. Representación volumétrica del campo de vorticidad para una serie de pruebas de álabes en confinamiento por Villeneuve et al. [78]	38
24. Representación volumétrica de la corriente en la estela de la turbina oscilante por Villeneuve et al. [79]	39
25. Esquema del hidropiano de semiactivo impulsado por el brazo oscilante investigado por Zhou et al. [80]	40
26. Esquema de un hidropiano de aleteo semiactivo impulsado por el brazo oscilante investigado por Jiang et al. [81]	40
27. Diagrama esquemático del movimiento oscilante del flap del borde de salida estudiado por Zhou et al. [82]	41
28. Dominio computacional para una aleta caudal investigado por Xie et al. [83]	42
29. Ilustración de las formas de aleta caudal consideradas por Krishnadas et al. [84]	43
30. Modelos de aletas caudales estudiadas por Xiong [85]	43
31. Sección de un hidroala flexible bioinspirado estudiada por Hoerner et al. [86]	44
32. Geometrías estudiadas por Ramamurti et al. [87]	44
33. Geometrías estudiadas por Lima Rodríguez [89]	45
34. Esquema prototipo robótico acuatico bioinspirado, estudiado por Xie et al. [90]	46
35. Resumen gráfico del trabajo desarrollado por Hashem and Zhu [88]	46
36. Dominio computacional y modelo de turbina bioinspirada en las aletas de las ballenas, proveniente del trabajo de Wang et al. [91]	47
37. Canal hidrodinámico universidad de Antioquia	49
38. Álabe de la turbina base. Elaboración propia.	51
39. Recopilación de imágenes de especies de peces migrante en Colombia - 1	52
40. Recopilación de imágenes de especies de peces migrante en Colombia - 2	53
41. Recopilación de imágenes de especies de peces migrante en Colombia - 3	54
42. Recopilación de imágenes de especies de peces migrante en Colombia - 4	55
43. Fotografía <i>Prochilodus Magdalenae</i>	56
44. Silueta cola de bocachico	57
45. Modelos Basados en la relación de aspecto AR	57
46. Modelos Basados en el área	58

47. Modelos con relación de aspecto y área próximos al modelo base	58
48. Dominio computacional canal hidraulico	59
49. Esquema de la malla computacional	60
50. Esquema de la malla computacional	60
51. Convergencia de la malla para la simulación CFD	63
52. Independencia temporal	64
53. Fuerza por ciclo de los modelos A,B,C,D,F	65
54. Fuerza por ciclo de los modelos A,E,F	66
55. Montaje experimental	67
56. Perfil de los álabes	67
57. Vista de planta del montaje experimental	68
58. Sistema de visión artificial	69
59. Mascara de seguimiento y de binarización del color azul	69
60. Mecanismo y turbina con sistema de medición con acelerómetro	70
61. Montaje con tope para movimiento semi activo	71
62. Modelo A vs modelo A libre	72
63. Modelo B vs modelo B libre	72
64. Modelo C vs modelo C libre	73
65. Modelo D vs modelo D libre	73
66. Modelo F vs modelo F libre	74
67. Modelo A vs modelo A libre con acelerómetro	75
68. Modelo B vs modelo B libre con acelerómetro	76
69. Modelo C vs modelo C libre con acelerómetro	76
70. Modelo D vs modelo D libre con acelerómetro	77
71. Modelo F vs modelo F libre con acelerómetro	77

Índice de tablas

1. Densidad de potencial por tecnología	17
2. Parámetros experimentales reportados en la literatura	28
3. Parámetros en Simulaciones reportados en la literatura	28
4. Parámetros de diseño modelo base	50
5. Parámetros para análisis CFD	61
6. Parámetros Independencia del mallado	62
7. Independencia de mallado	62
8. Parámetros de independencia temporal	64
9. Independencia temporal	64
10. Resultados de la eficiencia para todos los modelo	66
11. Pesos de componentes del sistema	70
12. Peso del sistema según sistema de medición	71
13. Potencia por ciclo para cada modelo movimiento tipo 2	74
14. Potencia por ciclo para cada modelo en condiciones de flujo libre, movimiento tipo 3	74
15. Potencia por ciclo y eficiencia para cada modelo con movimiento tipo 2 semiactivo	78
16. Potencia por ciclo y eficiencia para cada modelo en condiciones de movimiento tipo 3 pasivo	78

1. Resumen

La demanda de energía a nivel mundial mantiene una tendencia al alza. Al mismo tiempo, el calentamiento global pone en crisis la estabilidad del medio ambiente. Por tanto, toma importancia el desarrollo de fuentes renovables de bajo impacto ambiental como la energía solar y la energía eólica. Aunque no es la única tecnología renovable no convencional, los sistemas hidrocineéticos están llamando la atención de la industria y la academia dado que presentan ventajas sobre los sistemas de generación solares y eólicos, principalmente una menor intermitencia en la operación, lo que genera un flujo confiable de energía.

Colombia posee sus desafíos propios en materia de generación de energía y cobertura; estos sistemas pueden jugar un papel crucial para garantizar la diversificación de la canasta energética nacional a la vez que aumenta la cobertura de las zonas no interconectadas (ZNI). Colombia tiene un gran potencial para la creación de sistemas hidrocineéticos, dado la gran cantidad de afluentes que posee el territorio nacional. Dentro de los sistemas de generación hidrocineéticos, se comienzan a destacar un tipo de turbinas denominadas turbinas oscilantes, las cuales presentan una ventaja sobre otros tipos de turbinas, particularmente su rango de operación a bajas velocidades del fluido, además poseen una geometría de fácil construcción. Pero su principal ventaja es el aprovechamiento de afluentes de baja profundidad, cualidades que las vuelven óptimas para expandir la cobertura de la red nacional disminuyendo el número de zonas sin suministro eléctrico.

Las turbinas oscilantes permiten la incorporación de características biomiméticas o bioinspiradas, dado que la fauna acuática usa los mismos fenómenos hidrodinámicos que estos tipos de turbinas, para ganar energía del medio que habitan. Colombia también es uno de los lugares con mayor diversidad del planeta y sus ríos están llenos de peces con adaptaciones particulares para su vida en las corrientes, por tanto, en este documento se propone el estudio y diseño de una turbina de tipo oscilantes bioinspirada en la fauna acuática nacional, buscando diversificar los sistemas de generación con los que cuenta el país.

Se colocaron a prueba seis geometrías de turbinas oscilantes, flapping foil. Cinco geometrías con características bioinspiradas en el "bocachico" (*Prochilodus magdalena*), un pez nativo de Colombia conocido por realizar grandes recorridos durante las migraciones, cuyos comportamientos alimenticios tienen semejanza con las condiciones de operación de las turbinas oscilantes. Estas cinco geometrías se compararon con un modelo generado con base a la literatura, que mantiene una relación con el área longitudinal o con la relación de aspecto, con los modelos bioinspirados. La evaluación se centró en dos características: el borde de ataque y el borde de fuga.

Para determinar la influencia de estas características, se llevaron a cabo simulaciones CFD en Ansys Fluent. Además, se realizaron pruebas experimentales con las seis geometrías usando dos métodos. En el primero se usó un acelerómetro para lograr determinar la fuerza que experimentaban los álabes durante su desplazamiento senoidal. El segundo método utilizado es el análisis por visión artificial, con el cual se rastreó el desplazamiento del modelo, recreando la trayectoria descrita por cada modelo, a la vez que por medio de los cambios de velocidad se determinó la fuerza y rendimiento de los modelos. Se concluyó que el tipo de movimiento influye significativamente en el rendimiento de las turbinas. Se determinó que los modelos con borde de ataque requieren un sistema de control semiactivo para lograr valores representativos de potencia. Mientras tanto, los modelos con borde de fuga presentan un comportamiento más versátil frente al tipo de movimiento.

Palabras clave: Energía renovable, Sistemas hidrocineéticos, Turbinas oscilantes, Biomimetismo, *Prochilodus magdalena*, Simulaciones CFD, Visión artificial.

2. Introducción

La demanda energética a nivel mundial mantiene una tendencia creciente, como lo señala la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), debido al constante crecimiento de la población mundial [1, 2]. Esto se evidencia en la Figura 1, donde se detalla el crecimiento en el tiempo de la demanda de energía y las principales fuentes para satisfacerla. Al aumento de la demanda energética se suma la creciente necesidad de implementar fuentes de energía renovables, buscando la denominada transición energética, la cual procura reemplazar las energías provenientes de fuentes fósiles, como el carbón y el petróleo, para mitigar los efectos del cambio climático [3].

Para enfrentar estos desafíos ambientales y energéticos, gran parte de la comunidad internacional se han comprometido en diferentes escenarios como el Acuerdo de París o la COP26 para reducir la emisión de gases de efecto invernadero, además de encontrar nuevas fuentes de generación de energía sostenibles [4, 5]. En el panorama nacional, las políticas de desarrollo energético del país se encuentran direccionadas al cumplimiento de los compromisos adquiridos internacionalmente, pero también buscando superar dificultades propias del país como la seguridad energética y el abastecimiento confiables, además de reducir las zonas no interconectadas de la red eléctrica nacional, las denominadas ZNI las cuales son regiones del país con suministro nulo o parcial de electricidad [6, 7].

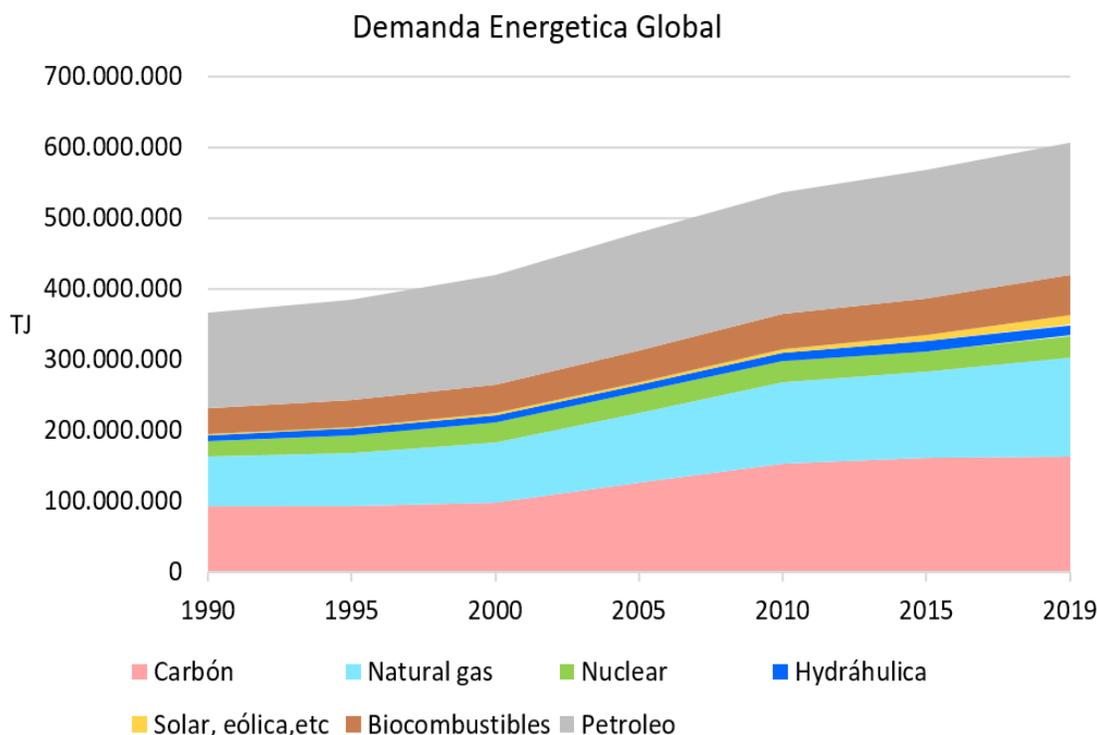


Figura 1: Demanda global de energía [8].

Zonas no interconectadas

La falta de conexión eléctrica en las ZNI sigue siendo un obstáculo importante para garantizar el acceso a servicios públicos domiciliarios en muchas partes del país. Esta realidad es un reflejo de la complejidad del desafío de mejorar la seguridad energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mientras se brinda un servicio adecuado a todos los habitantes, incluyendo aquellos en áreas periféricas o remotas del país [8].

Aproximadamente el 52% del territorio nacional no está conectado eléctricamente, lo que significa que hay un área de 1.141.748 km² de zonas no interconectadas en el país. Estas zonas incluyen las capitales de departamentos como San Andrés y Providencia, Amazonas, Vichada, Vaupés y Guainía. Se encuentran en áreas perimetrales del país, como la Amazonía, Chocó y parte de los llanos orientales, y tienen una baja densidad demográfica. A pesar de su riqueza en biodiversidad y recursos naturales, y su presencia de pueblos ancestrales, estas zonas también han sido afectadas por grupos fuera de la ley. Por lo tanto, proporcionar servicios públicos domiciliarios y garantizar el acceso a estos servicios para sus habitantes es un desafío especialmente complejo [8], esto se puede evidenciar en la Figura 2 donde se muestra la distribución y un estimado de la cantidad de localidades que se encuentran sin conexión a la red nacional.

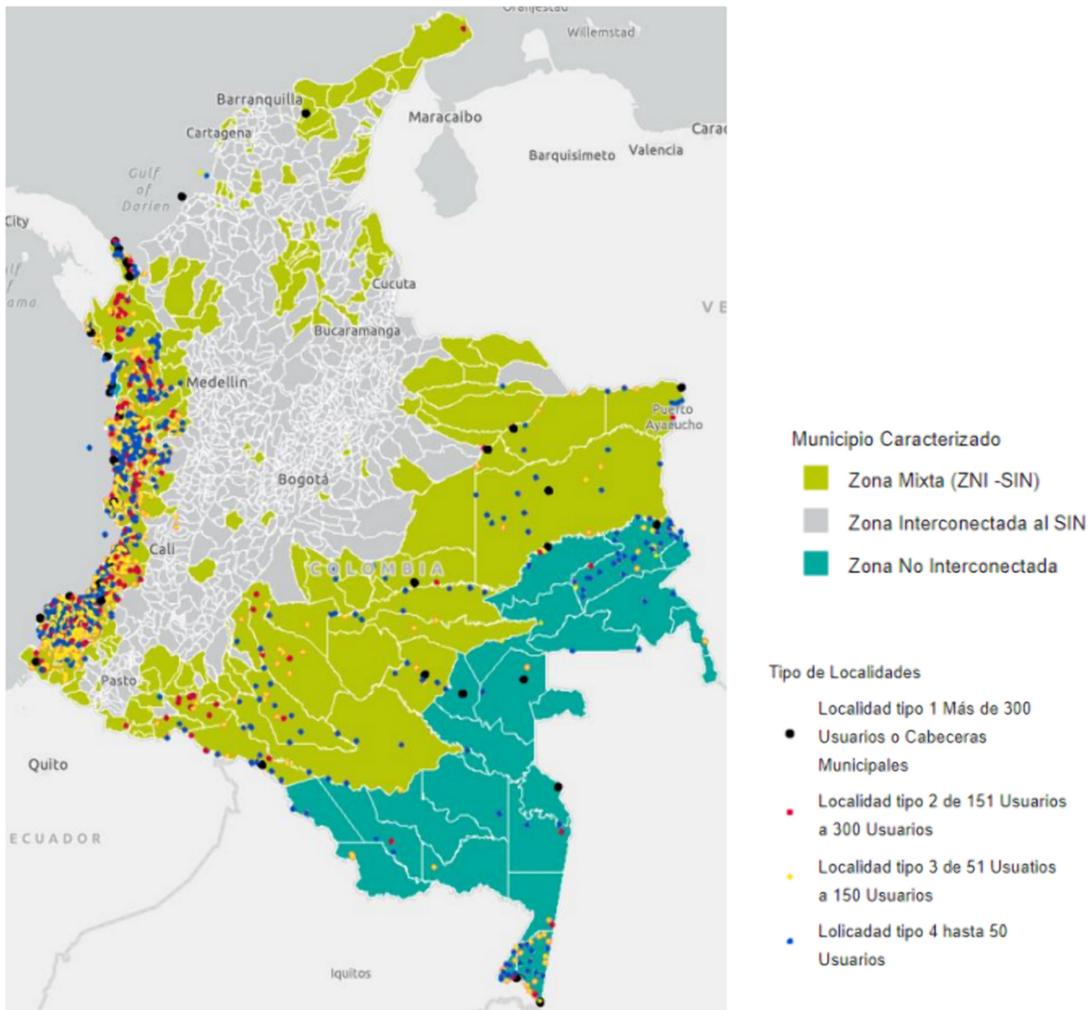


Figura 2: Mapa zonas no interconectadas de Colombia [8].

Matriz energética de Colombia

Colombia plantea en su plan energético nacional (PEN) a 2050 [6], diversificar la canasta energética nacional la cual está constituida en un 68,3% por centrales hidráulicas convencionales, las cuales extraen la energía de los embalses, distribuidos en el territorio nacional y respaldan el suministro en centrales térmicas que consumen gas o carbón, extrayendo energía a partir de los ciclos termodinámico. Dichas plantas representan un porcentaje del 30,7%, en la matriz energética. El porcentaje restante corresponde a fuentes de energías no convencionales como parques eólicos, plantas solares y térmicas alimentadas por combustibles fósiles y biomasa [6],[7].

En la Figura 3 se puede observar la distribución de la matriz eléctrica de Colombia a 2021, descrita anteriormente. Se resalta la baja participación de fuentes renovables como el sol y el viento. Pero esta participación a pesar de ser baja representa un cambio en la política energética del país, cambio impulsado por la Ley 1715 de 2014. La cual regula la generación de electricidad a partir de fuentes renovables no convencionales (FENC) abriendo la posibilidad de implementar proyectos energéticos no convencionales en el territorio nacional [6, 7, 9].

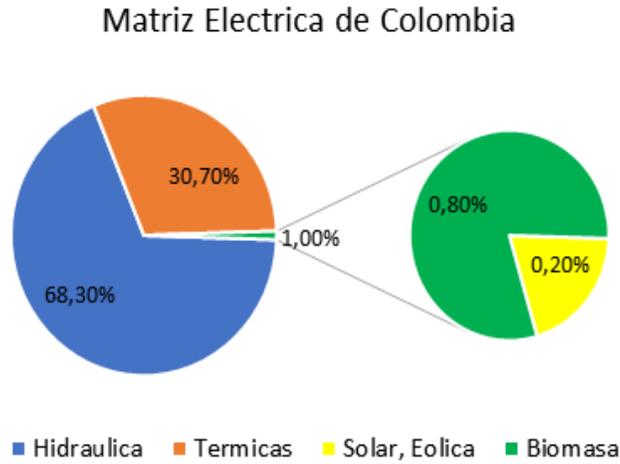


Figura 3: Matriz eléctrica de Colombia [7].

Es por esto que buscando enfrentar los desafíos internacionales y nacionales para la producción de energía sostenible proveniente de fuente de energía amigables con el medio ambiente, toma importancia el estudio de los diferentes recursos energéticos.

3. Justificación del proyecto

Colombia tiene una amplia gama de recursos energéticos que pueden ser aprovechados, incluyendo radiación solar, corrientes eólicas, hídricas y marinas. El país también cuenta con agencias nacionales encargadas de clasificar muchos de estos recursos, generando mapas de densidad de energía y disponibilidad del recursos. Como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) el cual posee aplicativos y bases de datos del recurso energético solar y eólico entre otros [7, 9, 10, 11, 12, 13]. Estas bases de datos permiten dimensionar los sistemas de generación, dependiendo de la disponibilidad de recursos energético.

Entre los recursos energéticos de Colombia, se destaca el recurso hídrico debido a la gran cantidad de afluentes del país [12]. Tradicionalmente, Colombia ha utilizado sus ríos para construir embalses, los cuales producen aproximadamente el 68 % de la energía eléctrica del país [6]. Los ríos también pueden ser utilizados por sistemas hidrocínicos para generar electricidad, estos sistemas aprovechan la velocidad del agua mediante una turbina que convierte la energía cinética del agua en energía rotacional, la cual se transforma en corriente eléctrica a través de un generador eléctrico [14].

En comparación con otras tecnologías de aprovechamiento hídrico, como las centrales hidráulicas, los sistemas hidrocínicos presentan ventajas, ya que no requieren de una caída pronunciada de agua para generar electricidad. Siendo instaladas directamente en el afluente. Las centrales hidráulicas requieren la construcción de presas y embalses, lo que puede requerir grandes inversiones y causar impactos ambientales y sociales [15]. En contraste los sistemas hidrocínicos, al no requerir embalse representan una inversión económica más baja. Además son sistemas de fácil montaje y transporte, dado que pueden ser modulares. Aunque la potencia de generación es más baja, esto se puede compensar con arreglos matriciales de turbinas [15, 16]. La modularidad y portabilidad de los sistemas de generación hidrocínicos los convierte en una gran alternativa para hacer frente las ZNI, ya que los sistemas pueden ser diseñados, simulados por herramientas CFD y construidos en las grandes urbes, pero desplegados fácilmente en las regiones no interconectadas de la red eléctrica [7, 8]. además de convertirse en una oportunidad de desarrollo económico [16, 17, 18].

El aprovechamiento del recurso hidrocínico plantea algunos desafíos, particularmente en el desarrollo de sistemas más eficientes, configuraciones de turbinas múltiples para el aprovechamiento energético, además de estudios de impacto ambiental sobre los ríos y cuerpos de agua [19, 20]. Otros desafíos son la baja profundidad de algunos afluentes y las bajas velocidades de flujo [21]. En estos campos de investigación, herramientas como la simulación de fluido por medio de CFD y el análisis del recurso energético, juegan un papel crucial, para el desarrollo de sistemas de recolección de energía novedosos como las turbinas hidrocínicas, cuya variedad de modelos puede ayudar a solventar los desafíos mencionados.

4. Marco teórico

En esta sección, se explorarán los aspectos teóricos fundamentales para el desarrollo de turbinas oscilantes, abordando una recopilación de conceptos esenciales para comprender su funcionamiento y diseño, por tanto es crucial abordar conceptos teóricos relacionados con las energías renovables, los principios de generación de energía y la mecánica de fluidos. Además, se realizará una detallada clasificación de las turbinas hidrocineéticas, con un énfasis particular en la rama de las turbinas oscilantes.

4.1. Energías alternativas

Las energías renovables son aquellas que se obtienen a partir de recursos naturales inagotables, como la luz del sol, el viento, la biomasa y el agua. Estas formas de energía son consideradas renovables porque no agotan los recursos y no producen emisiones contaminantes que puedan dañar el medio ambiente [22]. El uso de las energías renovables está en constante crecimiento a nivel mundial debido a la preocupación por el cambio climático y la necesidad de encontrar fuentes de energía más sostenibles. Cada vez más países están adoptando políticas y tecnologías que fomenten el uso de energías renovables y se están invirtiendo grandes sumas de dinero en investigación y desarrollo para mejorar la eficiencia y la capacidad de producción de estas fuentes de energía. Además, la reducción de costos y la mejora de la tecnología están haciendo que sea cada vez más atractivo utilizar energías renovables para satisfacer la demanda energética [22, 23]

4.2. Sistemas de generación hidrodinámicos

Las turbinas hidrocineéticas son máquinas que aprovechan la energía cinética de corrientes de agua en ríos, canales artificiales, mareas y corrientes oceánicas [24]. Transforman parte de esta energía del agua en energía mecánica, que luego se convierte en electricidad mediante un generador eléctrico [25]. En la Figura 4 se presenta un resumen gráfico de los componentes de una sistema hidrocineético. La cantidad de energía que se puede extraer de una turbina hidrocineética está limitada por el Límite de Betz, que establece una eficiencia máxima aproximada del 59% [26]. Este límite se basa en la Teoría del Disco Actuador, que afirma que la energía del fluido está determinada por el área transversal a su desplazamiento, estableciendo una relación entre el área, la velocidad y las propiedades del fluido [27].



Figura 4: Estructura de un sistema hidrocineético de generación. Elaboración propia basado en W.I Ibrahim [19].

Clasificación de los sistemas hidrocineéticos

Los sistemas de generación hidrocineéticos se clasifican en dos tipos. Por un lado, están los sistemas tipo turbina, los cuales transforman la energía de la corriente a partir de la rotación de sus álabes, dichos sistemas se subdividen en turbinas de eje horizontal y de eje vertical como se muestra en la Figura 5. Adicional a

esta subdivisión están las turbinas de flujo cruzado y las turbinas de vórtice gravitacional, estas dos últimas están llamando la atención de la comunidad académica, dado que su principio de transformación de energía es de igual forma la rotación de los álabes alrededor de un eje que mueve el generador eléctrico, con mayor eficiencia [19].



Figura 5: Clasificación de los sistemas de Generación hidrocineéticos [19, 28].

4.2.1. Sistemas de generación oscilantes

El segundo tipo de turbina son las turbinas oscilantes o también denominadas (Non-Turbine), ya que no realiza movimientos rotatorios, el mecanismo de transformación de la energía hidrocineética, se realiza a partir de movimientos periódicos, generados por fenómenos hidrodinámicos y no por rotaciones de 360° , como ocurre en los sistemas verticales y horizontales tipo turbina [28]. Los fenómenos hidrodinámicos son principalmente cuatro, Aleteo (Flutter), Galope (Galloping), Zarandeo (Buffeting), inducción por vórtices (Vortex induce vibration) (VIV), por sus siglas en inglés. Estos fenómenos son estudiados desde los orígenes de la aviación, dado que su descubrimiento se dio a partir de los desarrollos de aeronaves, pero están presentes en diferentes áreas de la ingeniería, como la construcción de estructuras civiles, dado que estos fenómenos pueden inducir fuerza sobre las estructuras [19, 28, 29, 30]. En el desarrollo de sistemas hidrocineéticos oscilantes, los fenómenos son utilizados para extraer energía de la corriente de agua, usando la estructura oscilante como sumidero de energía [19, 28] pero es común que en una turbina oscilante se presenten varios de estos fenómenos. A continuación, se detalla los fenómenos hidrodinámicos antes mencionados.

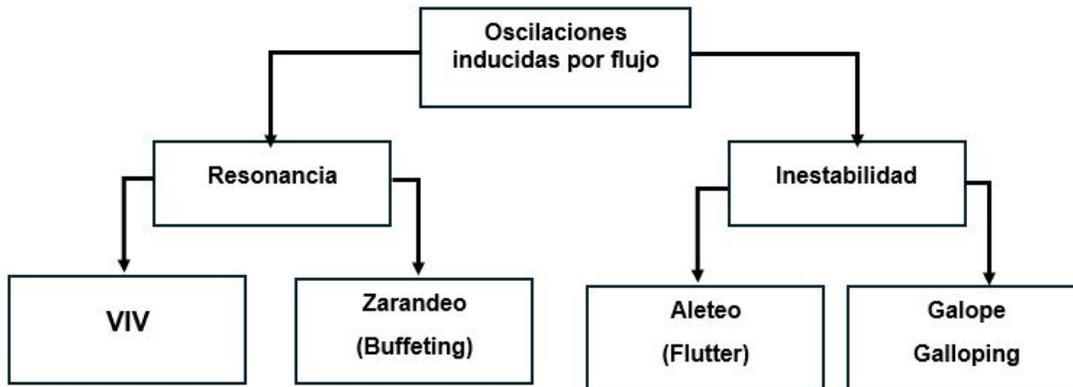


Figura 6: Clasificación de los sistemas de Generación hidrocinéticos oscilantes [31].

En la Figura 6 se presenta una expansión de la clasificación de las turbinas oscilantes basada en el tipo de fenómeno hidrodinámico en el que operan. En la rama izquierda, se encuentra el fenómeno de resonancia, que induce movimiento o energía a los cuerpos a partir del desprendimiento de vórtices o la interacción con vórtices generados aguas arriba. Este fenómeno se produce cuando la frecuencia natural de la estructura se encuentra en resonancia con la frecuencia de los vortices, lo que resulta en una amplificación del movimiento [31].

En la rama derecha de la Figura 6 se ilustran las turbinas cuyo funcionamiento se basa en la interacción inestable de un objeto con el fluido. Este principio de funcionamiento está especialmente asociado con la forma de los objetos y el ángulo de ataque en relación con la corriente del fluido [31]. A continuación se describen en detalle los fenómenos mencionados anteriormente que emplean las turbinas oscilantes.

Vibraciones inducidas por vórtices (VIV)

La inducción de vibraciones por vórtices se genera gracias a la diferencia de presión que experimenta un fluido al pasar sobre la superficie de un objeto, el cual bifurca el flujo, generando vórtices que se desprende de forma alterna y periódica. Estos desprendimientos inducen las vibraciones por medio de la interacción de las fuerzas viscosas [28, 32]. La frecuencia de desprendimiento está asociada a la velocidad del fluido, dado que los aumentos de velocidad generan una mayor frecuencia de desprendimiento. Cuando la velocidad de desprendimiento de vórtices, se aproxima a la frecuencia natural del cuerpo, los vórtices inducirán en el cuerpo la resonancia y el cuerpo comenzara a absorber energía del fluido por el desprendimiento de los vórtices. Estos sistemas no requieren de una geometría compleja, por tanto la manufactura de los álabes es simple, siendo en la mayoría de los casos cilindros. Su principal desafío se encuentra en el sistema de adsorción de energía, dado que se requieren de materiales piezoeléctricos, que por lo general son costosos o están aun en desarrollo. [28].

Buffeting o Zarandeo

El buffeting o zarandeo está asociado con los fenómenos de inducción de movimiento por vórtices (VIM), los cuales generan resonancia en cuerpos y estructuras. A diferencia del fenómeno anterior, La resonancia de buffeting puede ser causada tanto por la turbulencia del fluido como por la estela de un objeto aguas arriba [28]. Este fenómeno de resonancia inducida es aprovechado por los peces para moverse contra la corriente, utilizando las estelas de cuerpos que se encuentran aguas arriba para obtener energía de las corrientes que fluyen en dirección opuesta [33]. Además, el desprendimiento de fluido de la superficie también interviene en el zarandeo, generando fuerzas en el cuerpo que provocan el aumento de las oscilaciones [29].

El buffeting se caracteriza por generar oscilaciones con frecuencias que van desde 0,1 Hz hasta 60 Hz, y genera oscilaciones de menor amplitud que el fenómeno de inducción de vibraciones por vórtices (VIV). Estas dos características lo hacen un excelente candidato para la extracción de energía, sin embargo la necesidad de generación de perturbaciones aguas arriba, implica la construcción e instalación de una estructura extra, lo que dificulta su implementación [28].

Galloping o Galope

El galope de un cuerpo en un flujo se considera una inestabilidad dinámica que se produce debido a la elasticidad del sistema o cuerpo, lo que permite que gane energía a partir de pequeñas perturbaciones generadas por la corriente. El galope solo se produce en un grado de libertad, lo que da lugar a dos variaciones: el galope transversal y el galope torsional [27, 34].

Galope transversal: Como su nombre indica, genera oscilaciones transversales al paso del fluido. Estas oscilaciones se fortalecen o disminuyen dependiendo de la cantidad de energía transferida desde el fluido al cuerpo. Este fenómeno produce oscilaciones con una frecuencia menor que la inducción por vórtices de Kármán, por lo tanto, no se considera un fenómeno de resonancia. Este fenómeno está estrechamente relacionado con la velocidad del fluido; a mayor velocidad, mayor es la probabilidad de que se produzca el galope. Además, existe un límite inferior de velocidad, conocido como velocidad crítica, que está relacionado con la amplitud del movimiento [35]. En la Figura 7, se puede ver el esquema que describe la interacción de un cuerpo galopante transversal en un fluido en movimiento, así como las variables principales que rigen el fenómeno.

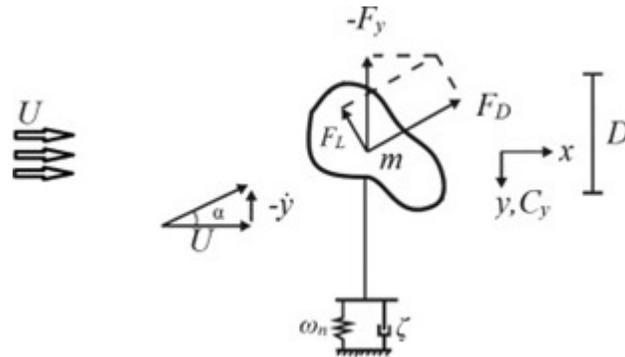


Figura 7: Esquema de un sistema sometido a galope transversal. U representa la velocidad del fluido, ω_n es la constante de elasticidad, α es el ángulo con respecto al fluido, m representa la masa del cuerpo, ξ es la constante de amortiguamiento, F_L fuerza de elevación, F_D fuerza de arrastre y D es el desplazamiento transversal. [28].

El galope torsional, se trata de una inestabilidad que genera un movimiento oscilatorio alrededor de un eje, conocido por su potencial destructivo, como ocurrió con el colapso del puente de Tacoma Narrows [36]. Sin embargo, también es un fenómeno que se puede controlar para extraer energía de una corriente [30]. Mientras que para el galope transversal, la velocidad vertical es el factor crítico, en los galopes torsionales, la velocidad angular y el desplazamiento angular son los más importantes, como se aprecia en la Figura 8. La inestabilidad se asocia con fenómenos hidrodinámicos de desfase, en particular, entre el movimiento angular relativo del cuerpo y las fuerzas hidrodinámicas (sustentación y arrastre), este fenómeno se denomina como memoria fluida [27]. El desfase es el responsable de las oscilaciones y la absorción de energía en el galope torsional [28]. Se resalta que en el galope torsional se pueden encontrar rastros de otros fenómenos hidrodinámicos, esto debido a la interacción de la superficie con el fluido, además de la interacción con turbulencia del propio flujo. el galope también presenta los mismos desafíos que los sistemas VIV, los cuales depende de materiales especiales para la generación de electricidad [36].

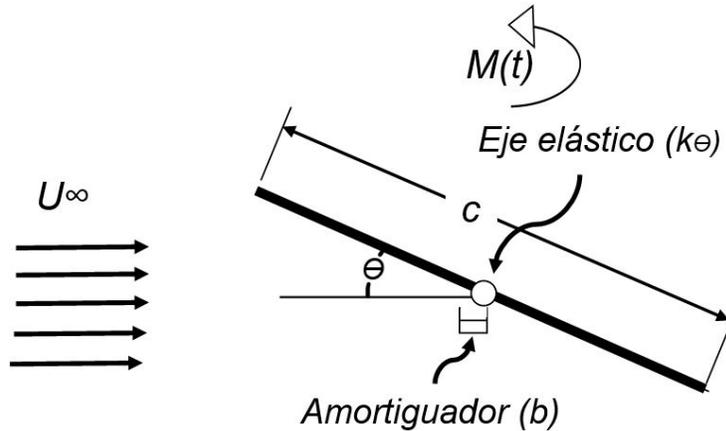


Figura 8: Esquema de un sistema sometido a galope torsional U es velocidad del fluido, b es la constante de amortiguamiento, $M(t)$ representa el momento angular, C es la longitud de la cuerda y θ es ángulo de ataque [28].

Flutter o Aleteo

Es una oscilación auto-regulada causada por la inestabilidad generada en la interacción entre el fluido y la estructura de la turbina. La estructura de la turbina tiene propiedades elásticas y de amortiguamiento. Este tipo de sistema posee dos grados de libertad: rotación y translación, como se muestra en la Figura 9. Estos grados de libertad están restringidos en torsión y flexión vertical, permitiendo solo el desplazamiento en forma vertical y un cabeceo o giro parcial del perfil [28, 30].

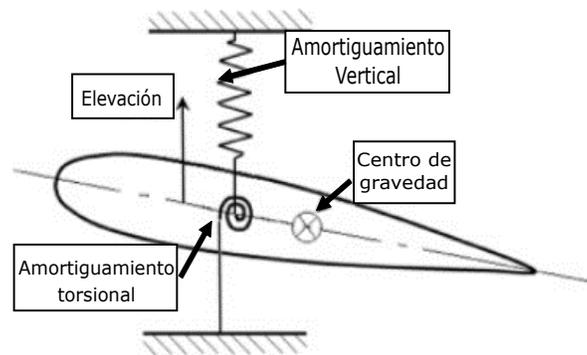


Figura 9: Esquema de un perfil aerodinámico inestable. [28].

Los diferentes fenómenos hidrodinámicos presentan un panorama amplio de posibilidades para el desarrollo de sistemas oscilantes de generación eléctrica, que puedan operar bajo las condiciones del recurso hidrocínético nacional.

Los sistemas de generación oscilante son diversos debido a la variedad de fenómenos hidrodinámicos presentes en las corrientes de agua, como se mostró anteriormente. Por tanto, es necesario establecer criterios claros para el desarrollo de turbinas oscilantes capaces de operar en las condiciones nacionales, con el fin de fomentar la diversificación de la matriz energética y mejorar la generación en zonas no interconectadas.

Por tanto, se presentan dos parámetros relevantes para la selección del fenómeno a estudiar basados en la potencia teórica definida por la Ecuación (I). Dichos parámetros de selección parten de la potencia específica de cada tecnología, es decir, la potencia generada por unidad de área de barrida y por unidad de volumen barrido [28].

$$P = \frac{1}{2}\rho AU^3 \quad (1)$$

Donde: P : potencia teórica, ρ : densidad del fluido, A : área barrida, U : velocidad característica del flujo.

La Tabla 1 presenta los valores de potencia barrida por unidad de área y de volumen para cada tipo de fenómeno hidrodinámico. Se establece que la tecnología con mayor densidad de energía en área y volumen es el Flutter o Aleteo, tanto simple como en configuraciones duales, seguido por el Buffeting. Tecnologías como VIV (Vortex-Induced Vibration), galope torsional y transversal requieren materiales especiales, como los piezoeléctricos, para la conversión de energía, los cuales son costosos y todavía están en desarrollo. En contraste, el Buffeting y el Flutter pueden ser aprovechados con mecanismos convencionales de transformación de energía [28].

Aunque el buffeting o sacudida es una tecnología de interés, la necesidad de construir una estructura aguas arriba para generar los vórtices necesarios implica costos adicionales y una mayor intervención en el río durante la implementación [29]. Por tanto, no es una opción viable para cumplir los objetivos planteados.

Tabla 1: Densidad de potencial por tecnología [28].

Fenómeno	Potencia/Área (W/m ²)	Potencia/Volumen barrido (W/m ³)
VIV	2,715	3,626
Flutter dual	3,577	3,466
Flutter single	3,401	4,021
Torcional galopping	0,631	1,311
Transverse galopping	2,044	3,378
Buffeting	3,033	3,224

Dentro de las turbinas que pueden utilizar el fenómeno de flutter se destaca la turbina flapping foil o hoja batiente, la cual genera electricidad principalmente por medio del fenómeno de flutter o aleteo, el cual genera un desplazamiento lineal del álabe, que es convertido en rotación y posteriormente en electricidad. Además, reporta los valores más altos de densidad de energía por área y volumen barrido, lo que permite aprovechar de forma mas eficiente las corrientes de agua [28], convirtiéndose en la mejor candidata para el desarrollo de una turbina oscilante que cumpla los objetivos trazados en este trabajo.

4.3. Turbinas flapping foil

Los sistemas de generación flapping foil son una configuración particular de los sistemas oscilantes utilizados para generar electricidad por medio de la transformación de la energía hidrocínética de un fluido. Estos sistemas se componen de un álabe con dos grados de libertad, que le permiten realizar movimiento transversal y de rotación parcial, sobre un eje donde el perfil pivota, este movimiento se denomina llamados cabeceo. Gracias a esto, los sistemas flapping foil son capaces de utilizar varios de los fenómenos hidrodinámicos antes mencionados, como el aleteo y el galope [35]. En la Figura 10 se esquematiza los movimientos que realiza una turbina flapping foil.

El desarrollo de los sistemas flapping foil está ligado a las investigaciones bioinspiradas, Dado que los desplazamientos del perfil hidrodinámico dentro del fluido guarda grandes semejanza con la forma de la cola de los peces y sus movimientos en el agua. Además que los perfiles se someten a las mismas condiciones en que los peces se desplazan por una corriente [37, 38].

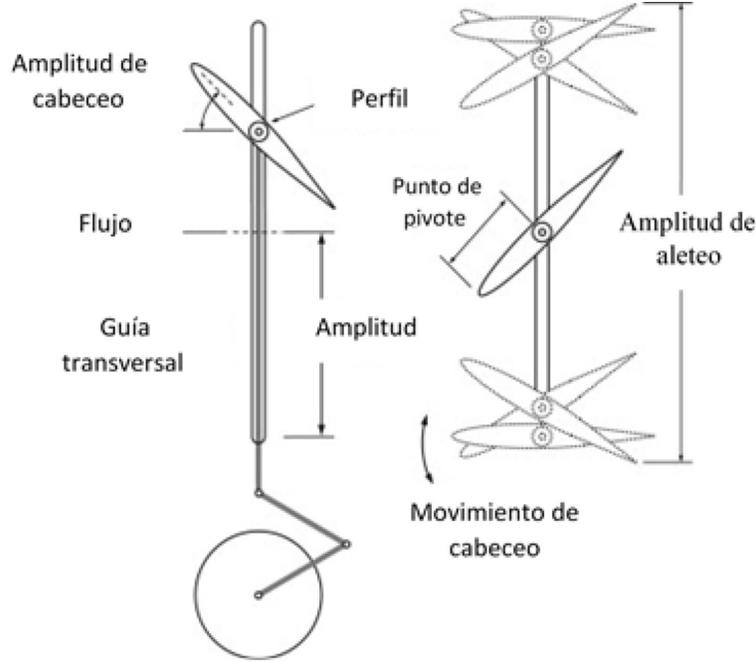


Figura 10: Esquema de una turbina flapping foil. [28].

Los parámetros que rigen el movimiento de un perfil batiente en un fluido se pueden dividir en cuatro tipos: parámetros ambientales, geométricos, cinemáticos y parámetros de rendimiento.

4.3.1. Parámetros ambientales

Aunque se conocen gran cantidad de parámetros ambientales que pueden afectar las propiedades de los fluidos, como la temperatura, la acidez del agua, la presión atmosférica, solo unos pocos factores toman relevancia en las turbinas de lámina batiente o flapping foil. Entre los que se destacan la velocidad de la corriente libre U_∞ , viscosidad cinemática ν del fluido, el número de Reynolds Re [39].

El número de Reynolds se define en la Ecuación (2) como:

$$Re = \frac{U_\infty L_0}{\nu}. \quad (2)$$

Donde Re es número de Reynolds, U_∞ es la velocidad de la corriente, ν representa la viscosidad cinemática del fluido y L_0 es la longitud característica.

El valor de L_0 , puede ser la longitud de cuerda c , el espesor máximo D o la longitud de envergadura L (en casos tridimensionales). El número de Reynolds Re para cada parámetro de longitud se define de manera correspondiente en las variaciones de la Ecuación (3):

$$Re_c = \frac{U_\infty c}{\nu} \quad ; \quad Re_D = \frac{U_\infty D}{\nu}, \quad ; \quad Re_L = \frac{U_\infty L}{\nu}, \quad (3)$$

Donde: Re_c es el número de Reynolds basado en la cuerda, Re_D es el número de Reynolds basado en el espesor y Re_L es el número de Reynolds basado en la longitud, c representa la longitud de la cuerda, D es el espesor máximo del perfil, ν es La viscosidad cinemática y L es la longitud característica [28]. En la Figura 11 se aprecia los parámetros descritos.

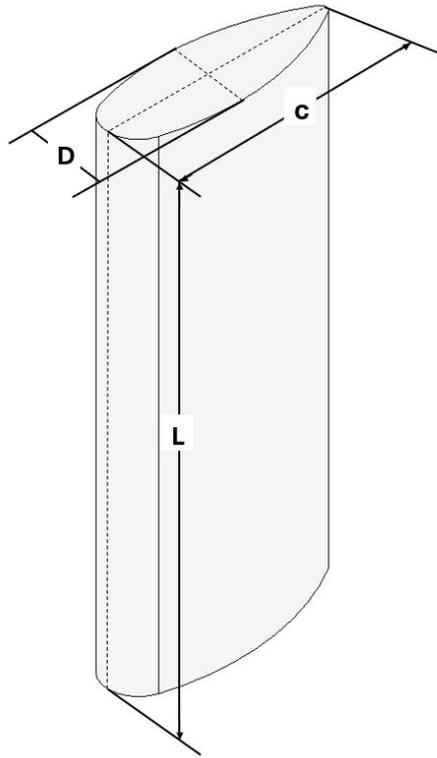


Figura 11: Esquema 3D de un perfil de turbina flapping foil. c : longitud de cuerda, D : espesor máximo y L : longitud de envergadura [28].

4.3.2. Parámetros geométricos

El perfil que normalmente se estudia en este tipo de turbinas, tiene forma de lágrima, un ejemplo de este tipo de perfiles son los perfiles NACA, EPPLER, SD y SG; pero también se tienen diferentes geometrías como elipses y rectángulos. Dichos perfiles aportan los siguientes parámetros: c es la distancia desde el borde de ataque hasta el borde de fuga, D es el ancho del perfil, determinado desde la línea central del perfil, o la cuerda, L es la longitud de la envergadura del ala batiente, la cual, dependiendo del análisis bidimensional o tridimensional, en análisis 2D no se tiene encuentra el valor de L .

Los parámetros D , c y L definen el número Reynolds, pero también son parte de los parámetros geométricos de la turbina, en la Figura [12] se puede ver el esquema que agrupa varios de los parámetros geométricos, en un perfil 2D de una turbina oscilante flapping foil, tales como d que representa la distancia máxima barrida en el aleteo, h_0 que representa la distancia media de desplazamiento del centro de gravedad del perfil. mientras que θ_0 representa el ángulo de cabeceo de la turbina con respecto al flujo. En la Figura [12] también se muestra la amplitud de movimiento y de cabeceo en función del tiempo. $h(t)$ y $\theta(t)$.

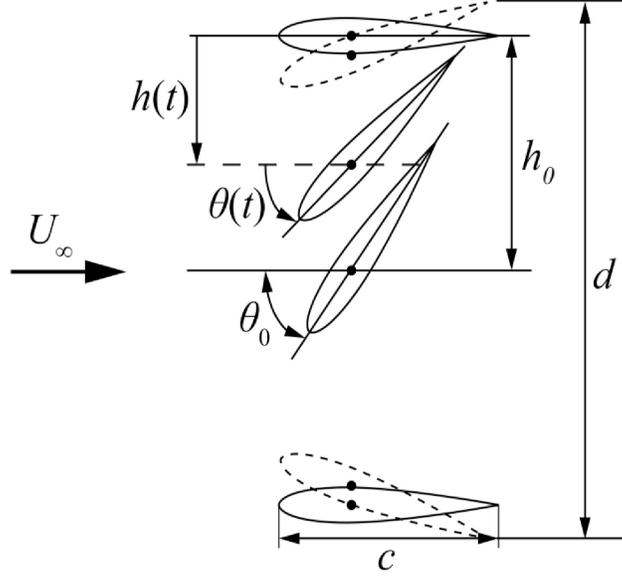


Figura 12: Esquema de una turbina flapping foil [28].

El perfil bidimensional se puede complementar con el uso de L para su descripción, asumiendo su valor como infinito, lo que se conoce como perfil "pseudo tridimensional". Sin embargo, cuando L tiene un valor finito, se obtiene un perfil "verdaderamente tridimensional (3D)". Para tener en cuenta la forma 3D del perfil, se introduce el índice o relación de aspecto (AR), el cual se define en la Ecuación (4):

$$AR = \frac{L}{c} \quad (4)$$

4.3.3. Parámetros cinemáticos

El **número de Strouhal** adquiere relevancia en el contexto de las turbinas de láminas batientes, dado que es una medida adimensional que describe la frecuencia impuesta de forma externa para un objeto en un flujo de fluido [40]. El número de Strouhal se define en la Ecuación (5) como:

$$St = \frac{fL_0}{U_\infty} \quad (5)$$

Donde, St es el número de Strouhal, f es la frecuencia de oscilación del objeto, L_0 es la amplitud de la oscilación del objeto y U_∞ es la velocidad característica del flujo.

El número de Strouhal se puede calcular en función de parámetros geométricos específicos, como la cuerda de los perfiles hidrodinámicos (c), el espesor máximo del perfil aerodinámico o hidrodinámico (D) y la amplitud de oscilación de pico a pico (d). Por tanto, la Ecuación (5) se puede reescribir en función de dichos parámetros geométricos como se muestra en la Ecuación (6).

$$St_c = \frac{fc}{U_\infty} \quad ; \quad St_D = \frac{fD}{U_\infty} \quad ; \quad St_d = \frac{fd}{U_\infty} \quad (6)$$

Donde St_c , St_D y St_d , representan al número de Strouhal calculado en función de la cuerda, el grosor máximo y la amplitud, respectivamente.

La amplitud adimensional es otro parámetro derivado de las variables geométricas y se define en la Ecuación (7) para la cuerda (c), el espesor D y la amplitud de aleteo h_0 [40].

$$AD = \frac{d}{D} \quad ; \quad Ac = \frac{d}{c} \quad ; \quad h = \frac{h_0}{c} \quad (7)$$

La frecuencia reducida (k) es una medida adimensional utilizada para analizar el comportamiento del flujo, frente a los cambios en la velocidad, tamaño y forma del objeto de estudio, en interacción con un flujo, prediciendo la formación de vórtices y la resistencia al movimiento [41].

$$k = \frac{\omega c}{U_\infty} = \frac{2\pi f c}{2U_\infty} \quad (8)$$

donde ω representa los periodos de oscilación, mientras que f es la frecuencia del aleteo, considerando el movimiento como sinusoidal.

En movimiento de las turbinas oscilantes de lámina batiente tanto en su desplazamiento transversal como en el cabeceo del álabe, puede ser descrito mediante funciones sinusoidales que se representan por la Ecuación (9) y (10) [40]:

$$h(t) = h_0 \sin(2\pi f t) \quad (9)$$

$$\theta(t) = \theta_0 \sin(2\pi f t + \phi) \quad (10)$$

Donde θ_0 es la amplitud de cabeceo, t es el tiempo, f es la frecuencia de oscilación, ϕ es el ángulo de fase entre el cabeceo y la oscilación, y $\theta(t)$ y $h(t)$ representan la posición de cabeceo y traslación en función del tiempo, respectivamente [20].

Ángulo de ataque efectivo derivado de las Ecuaciones de posición. Se puede definir el ángulo de ataque efectivo α_{eff} que describe el ángulo del perfil frente al fluido en función de la posición y el tiempo [42].

$$\alpha_{eff} = \alpha_m + \theta_0 \sin(2\pi f t + \phi) - \tan^{-1} \left[\frac{h_0 2\pi f \cos(2\pi f t)}{U_\infty} \right] \quad (11)$$

Donde α_m es el ángulo de ataque medio.

Ángulo de ataque maximo se estima por medio de la Ecuación (12) [42].

$$\alpha_{max,eff}(\alpha_0) = \alpha_m + \theta_0 - \tan^{-1} \left(\frac{h_0 2\pi f}{U_\infty} \right) \quad (12)$$

4.3.4. Parámetros de rendimiento

El rendimiento de recolección de energía de una lámina oscilante se describe mediante dos parámetros principales: el coeficiente de potencia de salida C_p y la eficiencia de recolección de energía η .

El coeficiente medio de potencia de salida se define por medio de la Ecuación (13).

$$\overline{C}_p = \frac{\overline{P}}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 cL} = \overline{C}_{py} + \overline{C}_{p\theta} = \frac{1}{\tau} \left[\int_0^\tau C_y \frac{dh(t)}{dt} dt + \int_0^\tau c \cdot C_m \frac{d\theta(t)}{dt} dt \right] \quad (13)$$

$$C_y = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 cL} \quad (14)$$

$$C_m = \frac{M_\theta}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 c^2 L} \quad (15)$$

Donde \overline{P} es la potencia de salida media, C_{py} es el coeficiente de potencia medio del movimiento de levantamiento o desplazamiento transversal, $C_{p\theta}$ es el coeficiente de potencia medio del movimiento de cabeceo, C_y es el coeficiente de fuerza de impulsión instantánea, C_m es el coeficiente de momento de cabeceo instantáneo, τ es el período de oscilación, F_y y M_θ son la fuerza de elevación instantánea y el momento de cabeceo instantáneo respectivamente [43].

Por su parte la eficiencia de recolección se define por medio de la Ecuación (16). La eficiencia varía según la configuración de la turbina de álabe batiente, dado que existen 3 configuraciones posibles denominadas tipo 1, 2 y 3, se presentan diferentes valores de potencia de salida media \overline{P} [43].

$$\eta = \frac{\overline{P}}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 cL} = \overline{C}_p \frac{c}{d} \quad (16)$$

El valor de d representa el desplazamiento vertical máximo del borde de salida de la lámina oscilante [40].

Las variables de rendimiento están determinada también por el tipo de movimiento de la turbina, a continuación se presentan los 3 tipos de movimiento en las turbinas de álabe batiente.

Tipo 1: movimiento forzado. En esta configuración los movimientos de elevación y de cabeceo se imponen de forma externa, dado que matemáticamente reduce la complejidad del sistema, dando como resultado que la única interacción del sistema proviene del fluido [43]. La potencia de salida media \overline{P} se expresa en la Ecuación (17).

$$\overline{P} = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} \left[Y(t) \frac{dh(t)}{dt} + M_\theta(t) \frac{d\theta(t)}{dt} \right] dt \quad (17)$$

Donde $Y(t)$ y $M_\theta(t)$ representan la fuerza instantánea de elevación y de cabeceo, respectivamente.

Tipo 2: Semi Activo. En esta configuración se requiere una entrada de energía para activar el movimiento de cabeceo (pitching), mientras que la recolección de energía se logra mediante el movimiento de aleteo (heaving), generado por las fuerzas fluidodinámicas resultantes. La extracción neta de energía positiva es posible si la energía extraída del movimiento de aleteo es mayor que la energía necesaria para activar el movimiento de cabeceo. Si se considera el extractor de energía como un amortiguador lineal con un coeficiente de amortiguación c_0 [43], la extracción de potencia neta se puede expresar como:

$$P = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} \left[c_0 \frac{dh(t)^2}{dt} - M_\theta(t) \frac{d\theta(t)}{dt} \right] dt \quad (18)$$

Tipo 3: Sistema pasivo o autosostenido. Este sistema funcionan mediante la utilización de inestabilidades generadas por el flujo para generar movimientos oscilatorios en las direcciones de cabeceo y elevación. Esto permite un diseño mecánico mucho más simple ya que no se requiere ningún sistema de actuación adicional. Además, se garantiza que la extracción de energía será siempre positiva [43]. La extracción neta de energía correspondiente se expresa en la Ecuación (19).

$$P = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} c_0 \frac{dh(t)^2}{dt} dt \quad (19)$$

Como se mencionó anteriormente las turbinas flapping foil guardan gran semejanza con el aleteo de los peces por tanto toma importancia conocer y explorar las herramientas como el biomimetismo.

4.4. Biomimetismo

El biomimetismo se basa en la idea de que la naturaleza ha encontrado soluciones eficientes y sostenibles a los desafíos a lo largo de millones de años de evolución, y que estas soluciones pueden ser aprovechadas por las personas en la solución de problemas similares. Esta disciplina combina la biología, la ingeniería y la tecnología para investigar y aprender de la naturaleza, con el objetivo de imitar sus soluciones en productos y procesos humanos. Además, el biomimetismo ofrece un enfoque innovador y sostenible para solucionar una amplia variedad de desafíos tecnológicos y de diseño. Esto se conoce como biodiseño, el cual al imitar y aprender de la naturaleza, puede ayudar a desarrollar soluciones más eficientes y sostenibles para una amplia variedad de industrias y aplicaciones [44].

El biomimetismo es una disciplina versátil y aplicable a diversas áreas de la ingeniería, que ha demostrado ser eficaz en la creación de soluciones innovadoras y sostenibles. Por ejemplo, en la ingeniería civil, el arquitecto Michael Pawlyn ha utilizado la observación de la naturaleza para crear diseños innovadores que han resultado en soluciones más eficientes y respetuosas con el medio ambiente [45]. En el desarrollo de materiales, el biomimetismo nos permite estudiar procesos de construcción natural, como el de los corales o moluscos, para crear materiales de alta resistencia sin necesidad de procesos termodinámicos a altas temperaturas, lo cual permite un uso más eficiente de la energía [44]. En el ámbito energético, la compañía *Marine Current Turbines* desarrollo una turbina hidrocínética inspirada en la forma de una semilla, logrando una mejora del 10,6% en comparación con modelos anteriores [46], [47].

El biodiseño o biomimetismo no se limita a imitar la naturaleza en sus formas y procesos, su verdadero objetivo es integrar nuestra tecnología en el ciclo biológico, de manera que nuestros desarrollos se adapten al mismo patrón de reutilización y transformación que la naturaleza. En otras palabras, la idea es que nuestros productos y tecnologías puedan ser aprovechados de nuevo una vez cumplida su función, en lugar de convertirse en residuos [44].

Aunque la idea de la integración de la tecnología al ciclo natural parece compleja y casi imposible de alcanzar, algunas herramientas de la ingeniería y del diseño sí nos permiten avanzar en esa dirección. Tal es el caso del análisis de ciclo de vida.

4.5. Ciclo de vida

El ciclo de vida es un gran complemento para el desarrollo de diseños bioinspirados o biomimetismo, buscando entender el impacto sobre el ambiente de los nuevos desarrollos tecnológicos. Dado que el análisis de ciclo de vida es un proceso objetivo y sistemático que se utiliza para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, servicio o proceso. Este proceso implica la identificación de la energía, los materiales utilizados y las emisiones liberadas al medio ambiente a lo largo de todo el ciclo de vida del objeto en cuestión. El objetivo de este análisis es permitir la comparación y evaluación de oportunidades para la mejora ambiental. A continuación, se enumeran los pasos generales del análisis de ciclo de vida [48], [49].

El primer paso en el análisis de ciclo de vida es definir su objetivo y alcance. El objetivo puede ser evaluar, comparar, optimizar, tomar decisiones, establecer indicadores, llevar a cabo marketing o definir políticas. El alcance del análisis se refiere a la extensión temporal y geográfica de la evaluación.

El segundo paso en el análisis de ciclo de vida es el análisis de inventario. Este paso implica la recopilación de los insumos de energía y materiales utilizados en el ciclo de vida del objeto en cuestión, así como las

emisiones generadas a lo largo de todo el proceso. La selección de las entradas y salidas que se incluyen en el análisis es muy importante, ya que puede afectar significativamente los resultados y su calidad.

El tercer y último paso en el análisis del ciclo de vida es la evaluación de impacto. En esta fase, se transforman las entradas y salidas reportadas en el inventario en categorías de impacto ambiental. Estas categorías permiten una mejor interpretación de los resultados y su comparación con otros objetos similares. El análisis de ciclo de vida es una herramienta valiosa para la evaluación de la sostenibilidad y la mejora ambiental de los productos, servicios y procesos [50, 51].

4.6. Recurso hídrico de Colombia

Los sistemas fluviales en Colombia son abundantes, como se puede observar en la Figura 13, donde se muestra el mapa hídrico de los principales afluentes. Entre ellos, se destacan el Río Magdalena, Sinú, Atrato, Tota, Caquetá, Cauca, Ayapel, Casanare, Meta, Patía, Putumayo y Amazonas. Estos ríos se distribuyen geográficamente por todo el territorio nacional. Además, la gran cantidad de ríos y quebradas que abastecen a estos grandes afluentes amplía su alcance. La amplia distribución geográfica de estos ríos representa una enorme oportunidad para el desarrollo de una industria energética limpia y sostenible en el país [52, 53]. La distribución geográfica de estos ríos también respalda la idea de que la generación hidrocinética puede ser una solución para expandir la cobertura de la red nacional de electricidad, disminuyendo las ZNI y diversificando la matriz energética del país. Al aprovechar la energía hidrocinética de los ríos, se puede generar electricidad de manera renovable y sostenible, lo que contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la protección del medio ambiente. Además, el uso de la energía hidrocinética puede ser especialmente útil en las zonas más apartadas del país, donde el acceso a la red eléctrica convencional es limitado. En definitiva, la abundancia y distribución de los sistemas fluviales de Colombia representan una gran oportunidad para el desarrollo de una industria energética sostenible que beneficie tanto al país como al medio ambiente.

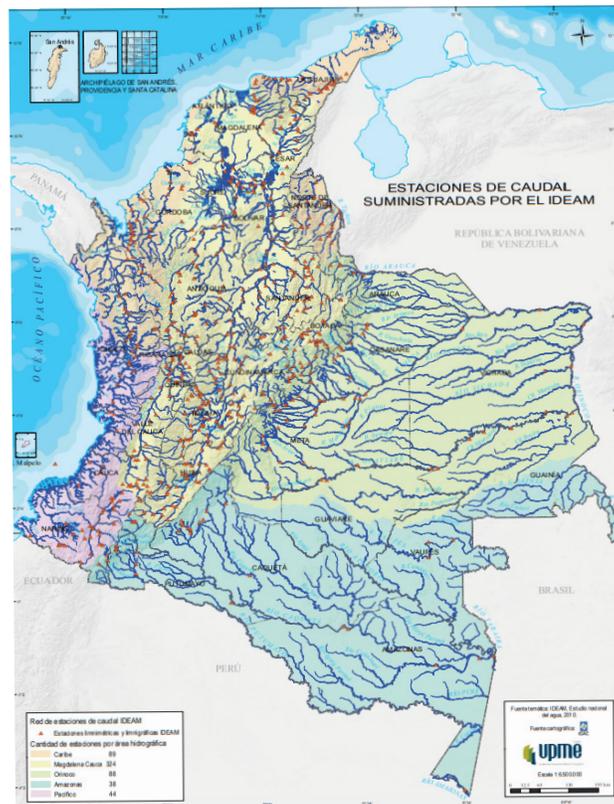


Figura 13: Atlas de ríos en Colombia. [54].

El potencial de los afluentes y cuerpos de agua en el país, va más allá de la energía que se puede extraer de ellos, ya que las aguas nacionales albergan otras riquezas, que pueden interesar a otros sectores como el sector minero y al sector pesquero, entre otros. Pero los ríos y cuerpos de agua alberga y sostienen, gran parte de la biodiversidad, la cual puede servir de inspiración para la resolución de problemas de ingeniería por medio del biomimetismo, por tanto toma importancia para este trabajo explorar la diversidad de especies del país. particularmente las especies acuáticas ya que estas se enfrentan a las mismas condiciones de operación de las turbinas hidrocinéticas, flujos turbulentos, eficiencia energética, entre otras particularidades de los afluentes.

4.7. Diversidad en Colombia

La biodiversidad se refiere a la variedad de formas de vida en la Tierra, desde los microorganismos hasta las plantas y los animales. Esta diversidad es esencial para el funcionamiento de los ecosistemas y para el bienestar humano, ya que provee servicios ecosistémicos como la polinización de cultivos, la regulación del clima y la purificación del agua [55]. Colombia es considerado uno de los países más biodiversos del mundo, debido a su ubicación geográfica y variedad de ecosistemas, los cuales contienen especies endémicas adaptadas a condiciones particulares de cada ecosistema. Regiones como, la selva amazónica, los páramos andinos, pasando por la costa del Pacífico y el Caribe, son ejemplos de la gran variedad de entornos naturales con los que cuenta Colombia, donde se destaca que el país es el hogar de más de 200.000 especies [56].

Es importante destacar que el país también cuenta con una gran riqueza en su fauna acuática. Los ríos, lagos, humedales y océanos del territorio nacional albergan una gran cantidad de especies endémicas y migratorias que contribuyen al equilibrio ecológico y al sustento de las comunidades locales.

4.8. Fauna acuática Colombiana

Identificar la cantidad exacta de especies de peces en los cuerpos de agua de Colombia es una tarea compleja debido a la gran cantidad de ríos, lagos que existen en el territorio nacional, además de la extensión oceánica en los dos océanos. Sin embargo según investigaciones realizadas en el país, se estima que hay alrededor de 3.800 especies de peces de agua dulce y marinos, tal como se puede verificar en el catálogo de peces del país [56]. De estas especies, aproximadamente 1.435 son peces de río, lo que representa cerca del 37,7% de todas las especies de peces en Colombia, según datos publicados en el Repositorio Institucional Alexander von Humboldt [57].

La densidad de especies en Colombia es otro de los factores a destacar. Por ejemplo, sistemas fluviales como el río Magdalena albergan una gran biodiversidad. El río Magdalena cruza el país de sur a norte, pasando por 13 departamentos. Es considerado el sistema fluvial más destacado de Colombia y a nivel continental, se considera el sistema fluvial más importante del norte de los Andes. Además, cuenta con un caudal de $7.154 \text{ m}^3/\text{s}$ y alberga a 233 especies de peces, algunas migratorias y otras que habitan cuencas hidrográficas específicas [58]. Por tanto, en un solo sistema fluvial se tiene aproximadamente el 16% de las especies de peces de Colombia, y el río Magdalena no es un caso aislado. Muchos afluentes colombianos presentan una gran densidad de fauna acuática.

4.9. Locomoción de los peces

Los peces tienen diferentes métodos de propulsión que dependen de la forma de su cuerpo y están adaptados a las condiciones particulares en las que viven. A pesar de estas diferencias, hay características comunes en su propulsión, como la oscilación generada por el movimiento del cuerpo, que se propaga desde la cabeza hasta la cola. También comparten la propulsión generada por las aletas y la cola, la cual depende de la forma y la distribución muscular del pez para generar el empuje. Cabe destacar que cada especie puede utilizar uno o ambos métodos de propulsión para nadar [59].

Por otro lado la cola de los peces funciona como una superficie propulsora independiente con una anatomía tridimensional distinta, la cual desprende vórtices que ayudan a ajustar de forma general el movimiento del resto del cuerpo. El flujo que pasa por la cola se ve afectado por el cuerpo situado aguas arriba, produciendo

un flujo complejo alrededor del pedúnculo caudal. Por tanto, el flujo global es el resultado de la combinación de dos patrones: un flujo convergente a lo largo del cuerpo y otro que envuelve el pedúnculo a medida que se mueve de lado a lado. Por lo tanto, la cola no se encuentra en un flujo libre. Esto mejora la propulsión dado que los vórtices refuerzan de forma positiva, y son sumadas al empuje general. [59, 60].

Las interacciones con otros peces y objetos en el agua también tienen un impacto en la forma en que los peces desplazan, ya que éstos pueden desplazarse sin invertir energía adicional. Este fenómeno se produce cuando el pez entra en resonancia con los vórtices de agua generados aguas arriba, de los cuales puede extraer energía. Estos vórtices pueden ser generados por objetos o peces que se agrupan en cardúmenes. Se ha demostrado que los peces pueden extraer energía de las corrientes incluso después de muertos, logrando desplazarse aguas arriba [33, 59, 60, 61].

Para entender la locomoción de los peces es importante definir los parámetros que intervienen en su interacción con el agua. El número Reynolds y Strouhal, vinculado el primero al análisis de fluidos y el segundo a los movimientos oscilantes, reúnen las principales variables que afectan a los peces y a las turbinas oscilantes.

El número de Reynolds (Re) es un parámetro que describe la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en un flujo. En el caso de la locomoción de los peces, sin embargo, estudios han demostrado que el número de Reynolds no parece tener un gran impacto en su capacidad de propulsión. En cambio, el número de Strouhal (St) es un parámetro que describe la velocidad a la que la cola del pez oscila en relación con su velocidad lineal [59, 60].

Para lograr el desarrollo de una turbina hidrocíneta bioinspirada es importante contar con diferentes herramientas, como el análisis de fluidos por computador o el flujo óptico de imágenes, el primero permite generar un entorno virtual para probar diferentes configuraciones, geométricas o de entorno, creando una base para la comparación con pruebas experimentales. Por otro lado, el flujo óptico permite la recopilación de datos por medio del análisis de imágenes, para el caso de una turbina oscilante, por ejemplo: puede detectar la trayectoria que describe un álabe, generando una relación con las variables de salida como la potencia y la eficiencia.

4.10. Análisis computacional de fluidos (CFD)

El Análisis por Dinámica de Fluidos Computacional, también conocido como CFD por sus siglas en inglés, es una técnica de simulación numérica utilizada para analizar el comportamiento de fluidos en diversos sistemas, como por ejemplo en las turbinas eólicas, hidráulicas y todo tipo de turbomáquina. Los fundamentos matemáticos del CFD se basan en la solución de las ecuaciones fundamentales que rigen el comportamiento de los fluidos, como lo son las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía, las cuales son resueltas mediante métodos numéricos en una malla de puntos discretos que representan el dominio de la simulación [62].

Para realizar un análisis por CFD de una turbomáquina, el proceso a seguir consiste en los siguientes pasos. En primer lugar, se debe generar un modelo geométrico en 3D de la turbomáquina, el cual se utilizará para crear una malla numérica que represente el dominio de la simulación. Posteriormente, se definen las condiciones de contorno, como la presión y la velocidad de entrada y salida del fluido, las cuales se aplicarán en la simulación para representar el comportamiento del sistema en condiciones reales. A continuación, se resuelven las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía en cada punto de la malla mediante el uso de algoritmos numéricos. Por último, se analizan los resultados obtenidos para comprender el comportamiento del fluido en la turbomáquina, a partir de lo cual se pueden realizar ajustes en el diseño de la misma para mejorar su desempeño [63].

El análisis por CFD es una técnica poderosa que permite analizar el comportamiento de fluidos en sistemas complejos, como lo son las turbomáquinas. Su aplicación permite realizar mejoras en el diseño de estas máquinas y optimizar su rendimiento, lo que puede tener un impacto significativo en la eficiencia de diversos procesos industriales [62], [63], [64].

4.11. Flujo óptico

El flujo óptico es un campo de investigación en visión por computadora que se centra en la medición del movimiento aparente de los objetos en una secuencia de imágenes. Se trata de una técnica muy utilizada en aplicaciones de seguimiento de objetos en tiempo real, estabilización de imágenes y navegación autónoma. Uno de los algoritmos más comunes utilizados para el cálculo del flujo óptico es el algoritmo de Lucas-Kanade. Este algoritmo se basa en la suposición de que el movimiento del objeto es constante en una región pequeña alrededor de un punto. El algoritmo utiliza técnicas de estimación de mínimos cuadrados para calcular el movimiento del objeto en cada punto de la imagen [65].

En cuanto a la aplicación del flujo óptico en el análisis del movimiento de peces, hay investigaciones que han utilizado esta técnica para estudiar el comportamiento de los peces en su entorno natural. Algunos estudios han utilizado cámaras de alta velocidad para capturar secuencias de imágenes de peces en movimiento para analizar la velocidad y la dirección de los peces en diferentes situaciones. Estas investigaciones han demostrado que el flujo óptico puede ser una herramienta valiosa para el estudio del comportamiento animal, lo que permite a los investigadores obtener información detallada sobre cómo los animales se mueven y interactúan con su entorno. Para el análisis de sistemas oscilatorios también resulta de interés para analizar el comportamiento de las turbinas hidrocínéticas al paso del agua, dado que su comportamiento será similar al que presentan las aletas de los peces en el agua [66, 67].

5. Estado del arte

Para este trabajo toma gran relevancia lograr una comparativa entre el análisis numérico por computador y la experimentación en condiciones de laboratorio. Actualmente se cuenta con un canal de agua recirculante con una sección de prueba de 5000 mm de largo, con un ancho de 350 mm y 490 mm de profundidad, ubicado en la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Dicho canal limita y condiciona los parámetros de diseño y simulación CFD, dado que el ancho del canal condiciona el desplazamiento de elevación, el cual es el principal mecanismo de generación de energía en las turbinas flapping foil. Por otro lado, al tener un volumen definido por el canal, se generan condiciones de confinamiento para la turbina, las cuales pueden afectar las simulaciones, por tanto, se usará el volumen generado por el canal hidráulico para desarrollar la turbina oscilante bioinspirada.

Establecido el volumen de control, es necesario conocer el estado de las investigaciones en el campo de la generación de turbinas hidrocineéticas flapping foil. El estado del arte se enfocará en conocer los trabajos en materia de experimentación y simulación numéricas en ambientes libres y confinados de turbinas flapping foil. Pero también se destacan investigaciones con propuestas en geometrías innovadoras, ya sean para generación de electricidad o propulsión, dado que este trabajo busca generar una mejora en las turbinas oscilantes por medio de la incorporación de características biológicas. Dicho esto, también se hace un recorrido por investigaciones que usan el biomimetismo para generar mejoras en la generación de electricidad por medio de energías renovables.

Wu et al. [40] realizó la revisión de 142 trabajos para propulsores y turbinas hidrocineéticas flapping foil, el autor recoge trabajos desde el año 1988 hasta 2019, tanto experimentales como simulaciones numéricas. En las Tablas 2 y 3 se presentan algunos de los resultados de su trabajo, destacando algunos de los parámetros más usados en las turbinas y propulsores flapping foil.

Tabla 2: Parámetros experimentales reportados [40].

Parámetros experimentales				
Perfil del álabo	NACA	54 %	Rectangular	22 %
Flexibilidad	Rígido	94 %	Flexible	5 %
Ángulo de cabeceo θ	$\leq 20^\circ$	50 %	$> 20^\circ$	17 %
Ángulo de desfase	90°	90 %	No reportado	10 %
Tipo de movimiento	Sinusoidal	100 %	Sinusoidal y no sinusoidal	11 %
Localización del pivote	0,5c	17 %	0,33c	14 %

Tabla 3: Parámetros simulaciones reportados [40].

Parámetros simulaciones numéricas				
Tipo de análisis	CFD	57 %	Análisis numérico	42 %
Perfil del álabo	NACA	76 %	Rectangular	4 %
Flexibilidad	Rígido	95 %	Flexible	5 %
Dimensiones del análisis	2D %	87 %	3D	13 %
Ángulo de cabeceo θ	$\leq 20^\circ$	32 %	$> 20^\circ$	44 %
Ángulo de desfase	90°	43 %	—	—
Tipo de movimiento	Sinusoidal	96 %	No-Sinusoidal	4 %
Localización del pivote	0,5c	29 %	0,33c	14 %
Modelo de turbulencia	SST	11 %	S-A	9 %

Wu et al. [40] destacan que la mayoría de las investigaciones en materia de simulación se centran en un dominio bidimensional, mientras que las simulaciones 3D son escasas. Los perfiles flexibles son evaluados

solo en el 5% de los trabajos experimentales y de simulación numérica. Por otro lado al evaluar ambas tablas, se puede evidenciar gran diferencia en el valor de algunos parámetros. Tal es el caso del ángulo cabeceo, el cual en porcentaje es mas bajo en las investigaciones experimentales que en las investigaciones numéricas. lo que da entender que existe una separación entre ambos enfoques investigativos. Por tanto, en este trabajo se da énfasis a los trabajos de simulación tridimensional desde 2019, dado que como destaca el autor existe un vacío en la literatura referente a la interacción del flujo 3D con los álabes oscilantes.

El confinamiento y el efecto del suelo y las paredes son aspectos a tener en cuenta para el desarrollo de la turbina oscilante bioinspirada. Por tanto, se presentan las siguientes investigaciones:

Zhu et al. [68] discuten sobre la eficiencia de extracción de energía de un ala oscilante cerca del suelo, utilizando un método de cálculo numérico transitorio en 2D. El estudio investiga los efectos de varios factores como el número de Reynolds, el espacio promedio de separación del suelo, el ángulo de ataque efectivo y la frecuencia de oscilación en la eficiencia de extracción de energía del ala oscilante. Los resultados del estudio indican que el efecto del suelo puede aumentar significativamente la eficiencia de extracción de energía del ala oscilante. Se encontró que el efecto del suelo es asimétrico en el curso del movimiento del ala por tanto la formación del efecto túnel o confinamiento divergente o convergente altera los campos de flujo del agua y las distribuciones de presión alrededor del ala cerca del borde de ataque, lo que resulta en un aumento general en la fuerza de elevación y en la capacidad de recolección de energía. Dichos efectos positivos sobre la eficiencia de recolección de energía están limitados a un valor máximo de 2,8 veces la cuerda (c), más allá de este valor los autores reportan que no se presenta un efecto ni negativo ni positivo sobre la eficiencia. También destacan que el efecto suelo se ve favorecido por la frecuencia de aleteo.

He et al. [69] estudian numéricamente el rendimiento de un hidroala semi-pasivo oscilante, mediante el uso de OpenFoam. Examina el problema de interacción fluido-estructura, implicado en la dinámica de la hidroala oscilante con un sistema de recolección de energía, el cual interactúa con una frontera tipo pared. El autor establece que la frecuencia reducida óptima para un sistema confinado por una pared se encuentra entre los valores de 0,12 y 0,16. Además señala que medida que el álabe experimenta los efectos hidrodinámicos del efecto suelo la eficiencia de recolección de energía aumenta, debido a la interacción del álabe con los vórtices generados en la interacción fluido – estructura, dicho aumento de la eficiencia se presenta cuando la distancia entre el álabe y el suelo H/c equivale a 0,9 donde H representa la distancia máxima del pivote al suelo y c representa a la cuerda del perfil, logran una eficiencia máxima de $\eta = 39,90\%$. En la Figura [14] se muestran los resultados de la simulación realizada por los autores.

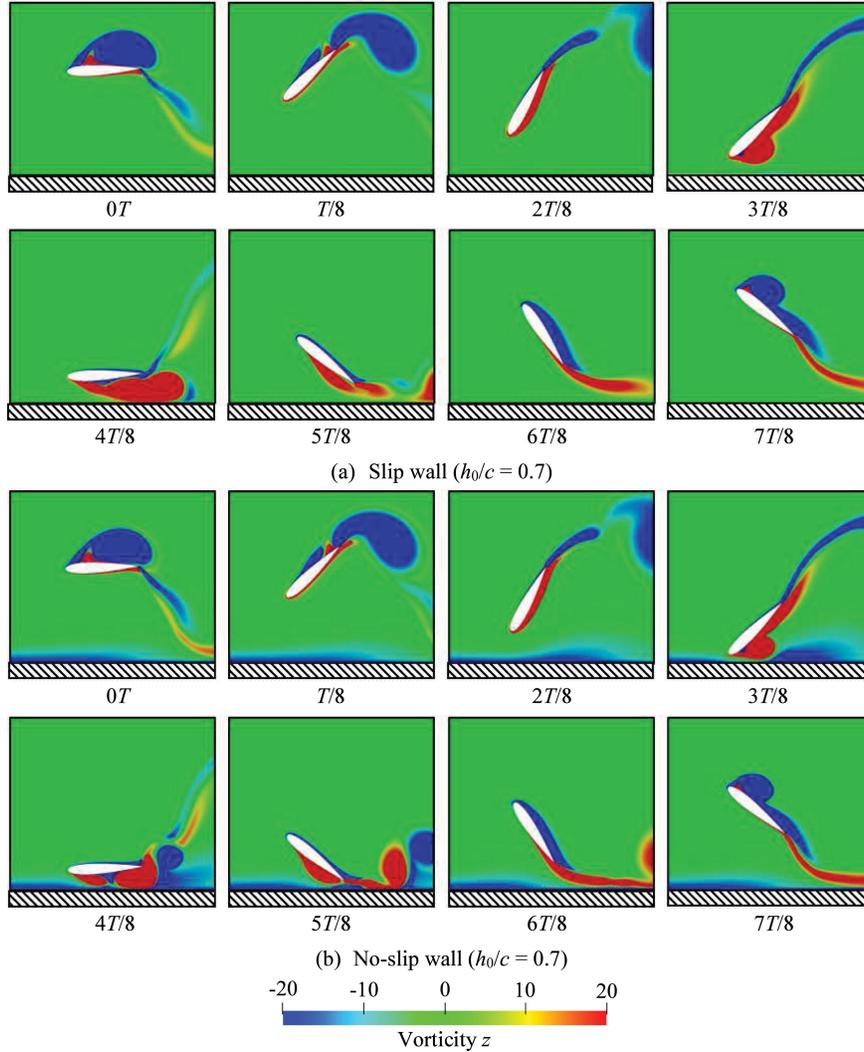


Figura 14: Gráfica de contorno de vorticidad durante un ciclo [69].

Su et al. [70] investigaron cómo el rendimiento de recolección de energía por un hidroala oscilantes es afectado por la presencia de paredes de confinamiento. El estudio se llevó a cabo en un canal de agua en circulación con un número de Reynolds de 50.000 se realizaron mediciones de las fuerzas hidrodinámicas en tres configuraciones diferentes de confinamiento (no confinado, un muro y dos muros) y una serie de niveles de confinamiento para cada configuración. El montaje realizado se muestra en la Figura 15. Los resultados muestran que en comparación con la situación no confinada, se obtiene una mejora significativa del rendimiento en la eficiencia para un sistema con confinamiento fuerte de dos paredes, debido al aumento de las fuerzas hidrodinámicas, mientras que solo se observa un aumento modesto en la configuración de una pared. El estudio paramétrico, vario la frecuencia reducida y la amplitud de cabeceo, mostrando que a medida que aumenta el nivel de confinamiento, la recolección óptima de energía se produce a valores más altos de la frecuencia reducida y la amplitud de cabeceo, Alcanzando una eficiencia del 42 %. Los hallazgos del estudio sugieren que la mejora del rendimiento se debe principalmente al aumento de la fuerza de sustentación hidrodinámica debido a la aceleración de la velocidad local alrededor del hidroala causada por la presencia de las paredes de confinamiento. En el estudio, se introdujo una brecha adimensional, g/c , siendo g la distancia entre la pared y el álabe, mientras que c representa la cuerda del álabe. Valores más bajos de g/c corresponden a niveles más fuertes de confinamiento de muros. El valor de g/c osciló entre 3,2 (la configuración no confinada) y 0,5 (el nivel de confinamiento más alto). Se observó que la eficiencia aumentó significativamente en la configuración de dos paredes, pasando de aproximadamente un 24 % en la

configuración no confinada ($g/c = 3,2$) al 42 % en el nivel más alto de confinamiento ($gab/c = 0,5$).

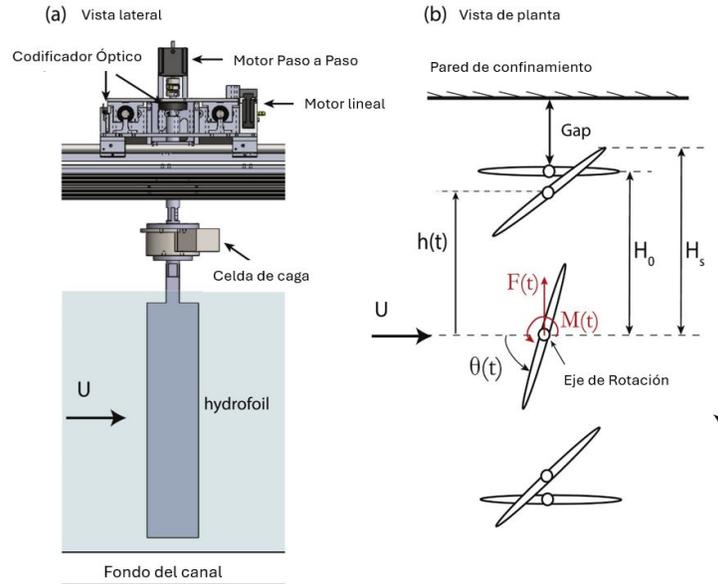


Figura 15: (a) Vista lateral del sistema experimental en el canal de agua. (b) vista superior del hidroala en la carrera descendente del ciclo con el pivote de $h(t)$ y $\theta(t)$ [70].

Como se evidencia en estos trabajos, el rendimiento de la eficiencia de generación de energía se ve aumentado por el confinamiento del sistema oscilatorio, favoreciendo la producción de electricidad. Pero es necesario explorar otros trabajos experimentales para validar que la recolección de energía en un canal es relevante. Además de otros parámetros importantes como la forma de los perfiles, la relación de aspecto AR y la Localización del pivote.

Wang and Ng [42] proponen un diseño novedoso para un conjuntos de turbinas de energía de marea basadas en hidroalas ver la Figura 16. Con el objetivo de maximizar la producción de energía y la viabilidad económica. El diseño propuesto es un conjunto de turbinas de energía de marea con dos hidroalas estrechamente interconectadas en tándem, que se investiga utilizando un método combinado de experimentos en túnel de agua y modelado numérico CFD. El rendimiento de recolección de energía se optimiza ajustando la amplitud de inclinación y el espaciado entre hidroalas. Las estructuras de flujo inestable y las distribuciones de presión se presentan para revelar los mecanismos de producción de fuerza y energía, así como las interacciones entre hidroalas y las estelas en el agua. El estudio concluye que el diseño propuesto de álabes en tándem pueden mejorar de manera efectiva la eficiencia energética de las hidroalas alcanzando hasta un 31,4 % y un 43,6 %, respectivamente, lo que resulta en una eficiencia energética promedio del 37,5 %. Las pruebas se realizaron en un canal hidráulico de sección cuadrada de $450 \times 450 \text{ mm}^2$ y una longitud en la sección de pruebas de 1.000 mm. Los autores reportan que en el punto de mejor operación, el bloqueo del fluido es aproximadamente del 10 % y solo se genera en momentos específicos del movimiento del álabes en tándem. Finalmente concluye que el diseño propuesto de turbinas con dos álabes estrechamente interconectadas y en tándem muestra resultados prometedores en términos de producción de energía y viabilidad económica.

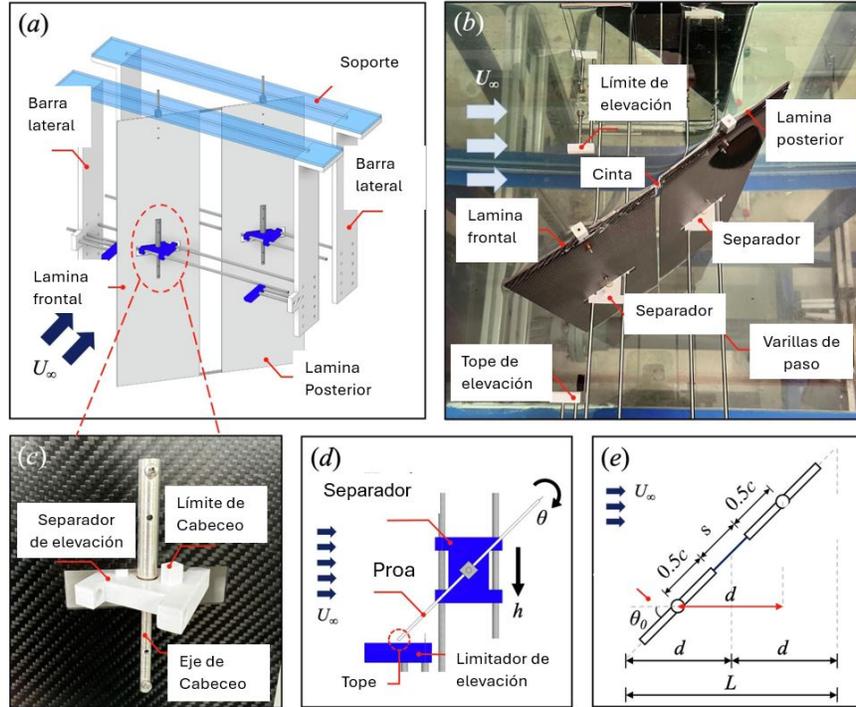


Figura 16: Esquemas hidroalas en tándem: (a) Diseño general; (b) Modelo de prueba; (c) Mecanismo de elevación y cabeceo; (d) Limitador de movimiento ;(e) Definiciones de las medidas de la lámina [42].

Duarte et al. [72] llevan a cabo un estudio experimental para optimizar los parámetros estructurales de cabeceo de un prototipo de turbina de flapping foil totalmente pasiva, ver la Figura 17. Por medio de un prototipo a escala se ensayó en un canal confinado a un número de Reynolds de cuerda Re_c de 60.000 el prototipo de turbina consistía esencialmente en una lámina con perfil NACA0015 montada elásticamente sobre un eje de cabeceo y un carril de oscilación. Los resultados experimentales mostraron que las mejores prestaciones de la turbina se alcanzaron con el eje de cabeceo situado a un tercio de la longitud de la cuerda ($x/c = 0,333$). En esta configuración, se identificó un caso optimizado en $kq = 0,071$ y $cq = 0,052$ para el que se pudo medir un rendimiento hidráulico de $h = 31,9\%$. Además, los resultados experimentales mostraron que la energía cosechada por el movimiento de cabeceo era insignificante en comparación con el movimiento de oscilación. Sin embargo, para que la turbina rindiera al máximo era necesario que el amortiguamiento viscoso del cabeceo fuera distinto de cero.

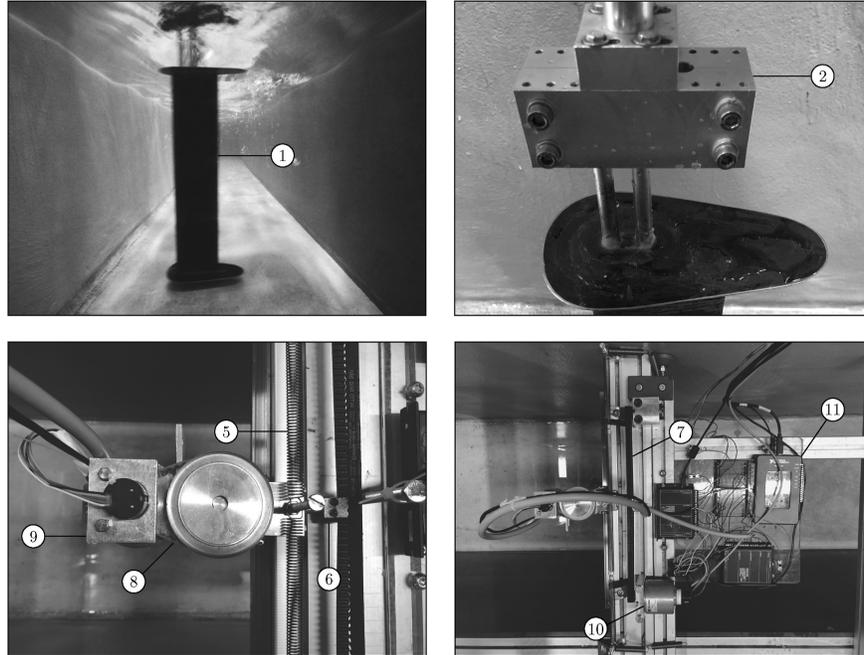


Figura 17: Configuración experimental de una turbina de lámina batiente completamente pasiva en un canal confinado que destaca sus componentes principales [72].

Zhao et al. [73] se centraron en la búsqueda del mejor rendimiento de extracción de energía, utiliza un ala oscilante totalmente pasiva para extraer energía del flujo de agua. El equipo de investigadores realizó una serie de experimentos en un túnel de agua utilizando un número de Reynolds alrededor de 1×10^5 la investigación obtuvo una eficiencia de conversión de energía máxima general del 42,7% a una velocidad de agua de 0,71 m/s y una amplitud de inclinación del ala de 60° , lo que corresponde a una salida de potencia promedio de alrededor de 1,51 W. También se desarrolló un modelo teórico cuasi estacionario para predecir rápidamente el rendimiento del sistema en un espacio de parámetros más amplio. Se encontró que el sistema de ala puede operar de manera continua solo cuando la velocidad del agua es suficientemente alta. El perfil plano, mostró un desempeño óptimo comparable con investigaciones y desarrollos con perfiles NACA u otros similares. En la Figura 18 se muestra el montaje experimental.

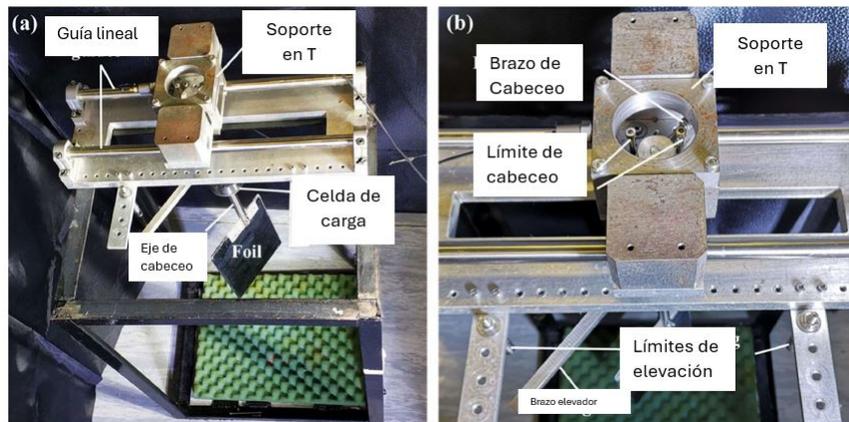


Figura 18: Modelo de prueba para la recolección de energía de flujo utilizando una lámina de aleteo completamente pasiva [73].

Liu et al. [74] presenta un estudio experimental y numéricamente de álabes oscilantes hidrocineticos semipasivo. En este estudio se investigó el rendimiento de la recolección de energía en un de canal de agua, se utilizó un amortiguador magnético y un generador eléctrico para proporcionar cargas constantes y variables, respectivamente. El modelo de hidroala funcionó mejor en la recolección de energía para la frecuencia reducida de 0,10 y la amplitud de balanceo activada de 70-90°. Se establecieron modelos numéricos bidimensionales y tridimensionales, y se utilizó la tecnología de malla superpuesta deslizante dual para realizar los complejos movimientos de balanceo acoplados y predecir la interacción fluido-estructura del hidroala. En el estudio numérico, se lograron un coeficiente de potencia máximo y una eficiencia del 0,75 y 0,33, respectivamente. Se compararon y validaron los modelos numéricos 3D y 2D basados en la plataforma de dinámica de fluidos computacional ANSYS-Fluent 16.0 con los datos experimentales correspondientes. Las características de las estructuras de flujo y las distribuciones de presión sobre el hidroala.

De este trabajo se destaca la configuración del montaje, ver la Figura 19, el cual establece la amplitud en función de un brazo que sostiene el álabe el cual se conecta con un eje, colocando la amplitud en función del radio barrido por el brazo.

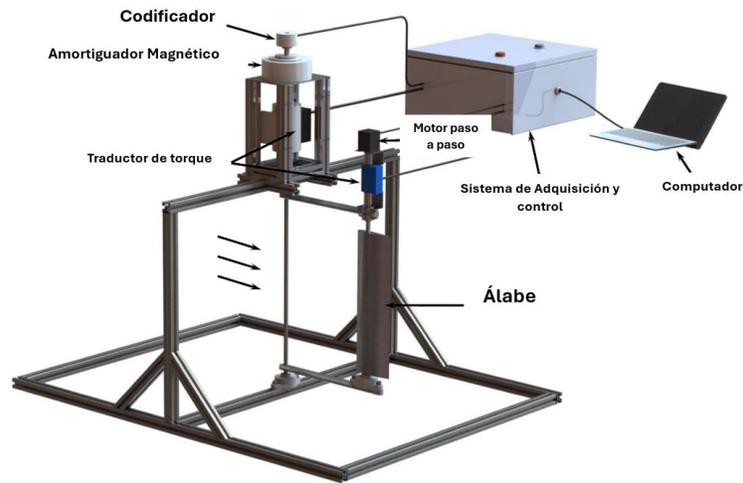


Figura 19: Esquema de la configuración experimental para el hidroplano de cabeceo acoplado en el modo semipasivo [74].

Mathai et al. [75] examinan la cinemática, dinámica y campos de flujo generados por un álabe oscilante hidrodinámico de membrana oscilante y complaciente que extrae energía de un flujo uniforme de agua a un número de Reynolds basado en la cuerda de $Re_c = 310^4$. En este trabajo los autores someten a una lámina flexible a las fuerzas hidrodinámicas producida por la interacción con la corriente. Las cuales generan que la membrana se deforme dinámicamente, aumentando efectivamente la amplitud del perfil durante el ciclo de oscilación. La deformación de la membrana se modela utilizando la ecuación de Young-Laplace, con un término de presión aproximado a partir de la teoría del perfil aerodinámico delgado. El seguimiento de la deformación de la membrana y el campo de flujo circundante mediante perfilado láser y velocimetría de imagen de partículas. Los autores concluyen que la deformación pasiva de materiales blandos que interactúan con fluidos puede ser explotada en la extracción de energía de las corrientes fluviales y de mareas. Además, demuestran que los hidroalas de membrana pueden mantener su rendimiento incluso a bajas amplitudes de oscilación, en los regímenes donde los hidroalas rígidos no son eficientes. En las pruebas realizadas, se reportó alrededor de un 55 % de mejora en la energía generada con los hidroalas de membrana en comparación con los hidroalas rígidos [75]. En la Figura 20 se presenta el montaje experimental realizado en esta investigación.

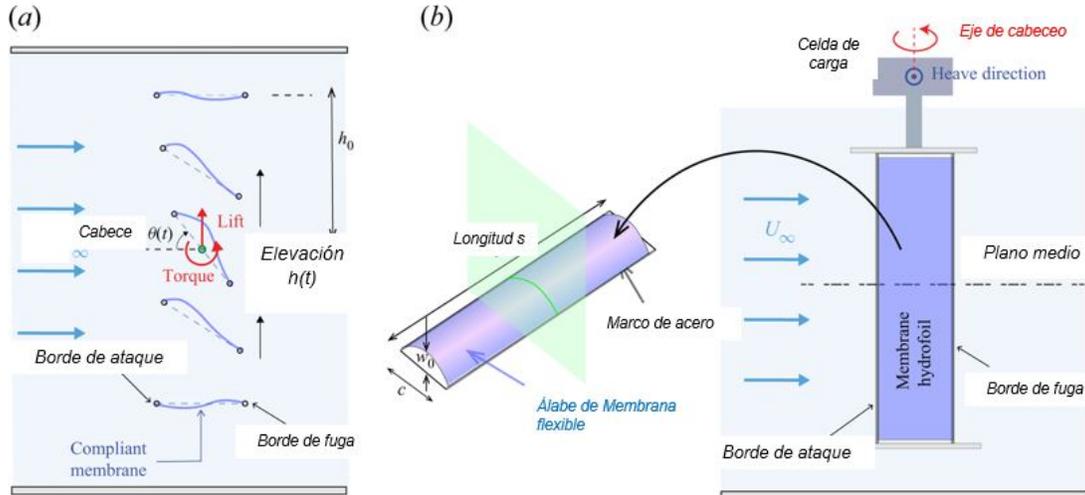


Figura 20: Representación esquemática de una lámina de membrana oscilante utilizada en la extracción de energía hidrocínética. (a) Esquema transversal de la lámina de membrana deformándose. (b) Esquema lateral que muestra la membrana oscilando en un flujo de agua uniforme [75].

Kim et al. [76] investigan el rendimiento de la captación de energía de un hidroala que oscila, con un enfoque particular en el efecto de la forma y relación de aspecto de la hidroala. Los resultados sugieren que la forma de la sección transversal de la hidroala tiene poco efecto en el rendimiento de captación de energía y que la eficiencia debida al movimiento de elevación aumenta con la frecuencia reducida en la amplitud de inclinación óptima. Por otro lado, la eficiencia debida al movimiento de inclinación o cabeceo disminuye con la frecuencia reducida. La relación de aspecto del álabe tiene un efecto significativo en la eficiencia de la elevación. Al aumentar la relación de aspecto lleva a una mayor eficiencia de la elevación. Sin embargo, el efecto de la relación de aspecto en la eficiencia de la inclinación o cabeceo es insignificante. Además, la instalación de placas terminales en ambos extremos de la hidroala mejora la potencia de elevación, pero tiene un efecto negativo con el aumento de la relación de aspecto. Por otro lado, la adición de placas terminales mejora uniformemente la potencia de cabeceo. El estudio sugiere que controlar la formación del vórtice en el borde de ataque puede mejorar la eficiencia general de la turbina oscilante y el rendimiento de captación de energía se debe al crecimiento retardado del vórtice del borde de ataque cerca de los extremos del álabe. En la Figura 21 se presenta el montaje experimental realizado en esta investigación.

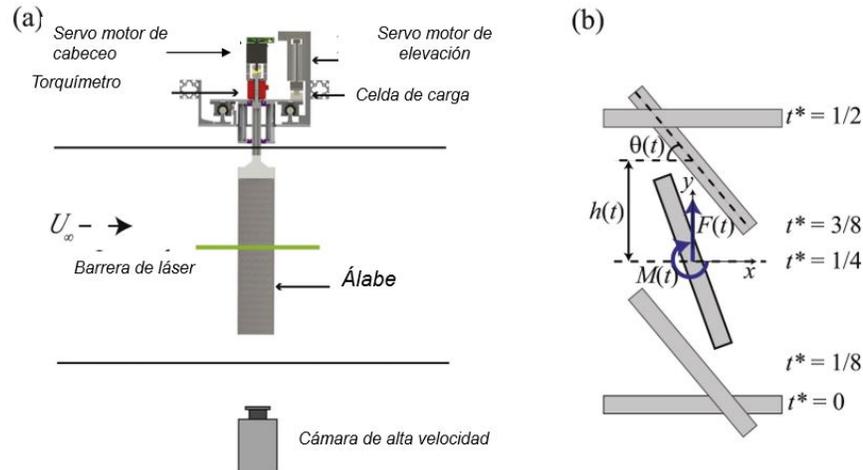


Figura 21: (a) Esquema del hidroala instalado en el canal de agua. (b) Movimientos de cabeceo y oscilación del hidroala en vista descendente. Para mayor claridad, sólo se muestra la mitad del ciclo de la carrera. T es el periodo de un ciclo, y ($t^* = t/T$) [76].

El artículo anterior aunque es del año 2017, toma gran relevancia para la investigación para determinar uno de los parámetros, el perfil del álabe oscilante, esencial para la realización de las simulaciones y la experimentación.

Las investigaciones de turbinas flapping foil en 2D representan gran parte del esfuerzo de la comunidad académica, pero los análisis en 3D siguen siendo escasos, a continuación, se presentan investigaciones para propulsión pero principalmente para la absorción de energía por medio de turbinas flapping foil, con enfoque simulaciones numéricas 3D.

Wang et al. [77] presenta un estudio numérico en 3D de una álabe oscilante hidrodinámica con movimiento sinusoidal ver la Figura [22]. El procedimiento consistió en controlar completamente la oscilación de la hidroala según los parámetros especificados y comparar los resultados obtenidos con datos experimentales previos, para validar la precisión del método numérico. Se investigaron los efectos de la frecuencia reducida, amplitud oscilatoria, número de Reynolds y número de Strouhal en el rendimiento hidrodinámico. Además, se analizaron los componentes del flujo de estela y los efectos 3D. Los resultados detallados incluyen información sobre las características del flujo alrededor del hidroala, como la distribución de presión, velocidad y vorticidad. También se presentan gráficos que muestran cómo varían estas características con diferentes valores de frecuencia reducida, amplitud oscilatoria, número de Reynolds y número de Strouhal. Concluyendo que el método numérico utilizado es preciso para predecir el rendimiento hidrodinámico de la hidroala oscilante sinusoidalmente. También, se encontró que la frecuencia reducida y el número de Strouhal tienen un gran impacto en el rendimiento hidrodinámico, mientras que la amplitud oscilatoria tiene un impacto menor.

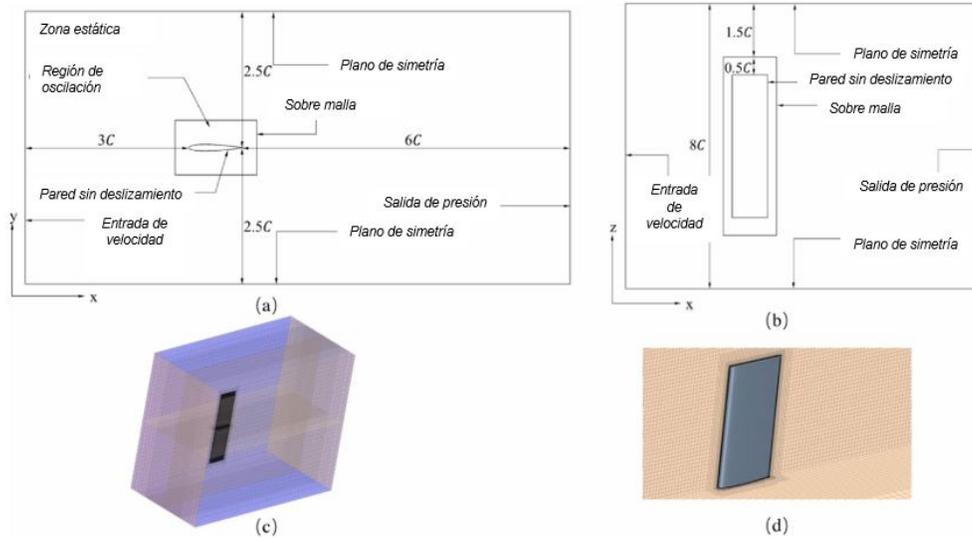


Figura 22: (a) Geometría y condiciones de contorno en el plano xy; (b) Geometría y condiciones de contorno en el plano xz; (c) Malla computacionales; (d) Condición de malla cerca de la lámina [77].

Villeneuve et al. [78] llevaron a cabo simulaciones RANS tridimensionales en estado estacionario del flujo alrededor de una hoja de envergadura finita estacionaria. El análisis se dirigió hacia la dinámica de la vorticidad, las fuerzas que actúan sobre la hoja y su distribución. Cuando se usan placas de extremo o placas de extremo desprendidas. En la Figura 23 se aprecia la interacción del fluido con el álabe. El objetivo era entender la física en la cercanía de las puntas de los álabes, ya que su uso podría ser beneficioso para optimizar el rendimiento de las turbinas de eje vertical o turbinas oscilantes. Los resultados mostraron que la presencia de placas desprendidas conduce a un aumento importante del coeficiente de sustentación y una reducción significativa del coeficiente de arrastre. Esto se explica por el hecho de que las placas desprendidas modifican el camino de las líneas de vórtices arrojadas por la hoja, afectando así la distribución y la circulación del fluido. Este trabajo refuerza la idea que los sistemas de generación en condiciones de confinamiento presentan mejoras en su desempeño.

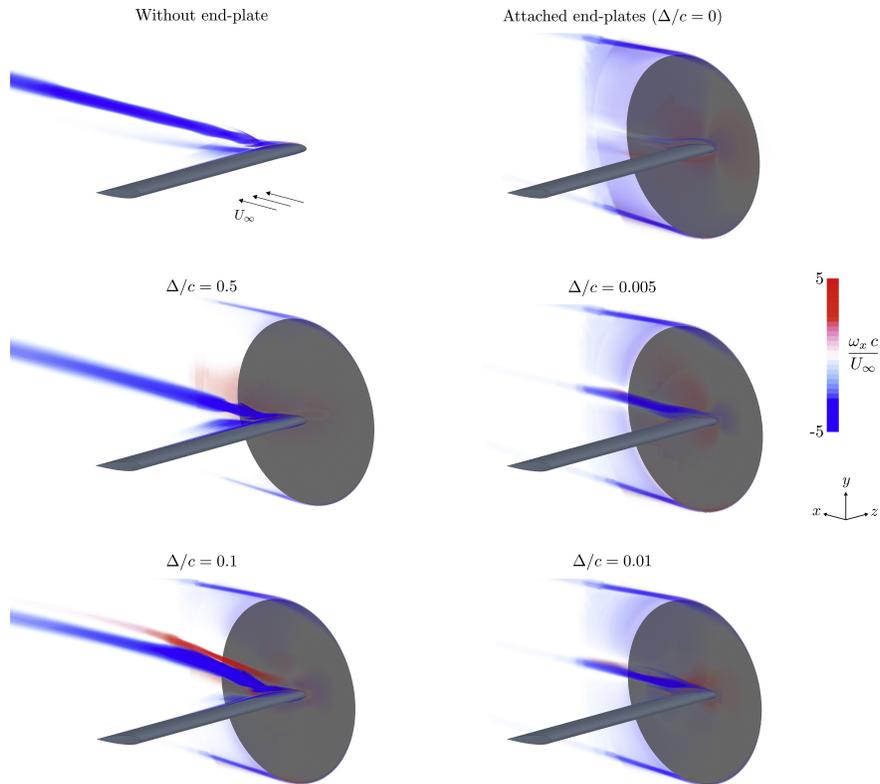


Figura 23: Representación volumétrica del campo de vorticidad en el sentido de la corriente alrededor de un álabe con y sin placas extremas desprendidas a diferentes anchuras de separación [78].

Posteriormente, Villeneuve et al. [79] exploraron la eficiencia y la tasa de recuperación de la estela de turbinas oscilantes flapping foil, usando platos finales y platos desprendidos (detached end-plates). Se realizan simulaciones numéricas en tres dimensiones utilizando un enfoque de Delayed Detached-Eddy Simulation (DDES). Con el objetivo de analizar el coeficiente de potencia y la recuperación de la velocidad media en sentido longitudinal de una turbina con diferentes geometrías de end-plates y detached end-plates y comparar los resultados con una turbina de alta eficiencia sin end-plates. Los resultados muestran que la eficiencia de la turbina se incrementa significativamente cuando se utilizan detached end-plates, llegando a ser un 21 % mayor que la de la turbina de referencia de alta eficiencia. Además, los mecanismos físicos que afectan la tasa de recuperación de la estela son los mismos, independientemente de si se utilizan detached end-plates o no. Curiosamente, se encontró que para una turbina con pequeñas detached end-plates, la recuperación media de la velocidad en sentido longitudinal en la estela es similar a la de la turbina de referencia, mientras que la eficiencia se incrementa en un 15 %. Esto sugiere que las detached end-plates podrían ser beneficiosos para las turbinas de aletas que operan en granjas. En la Figura 24 se aprecia la interacción del fluido con la paleta en confinamiento.

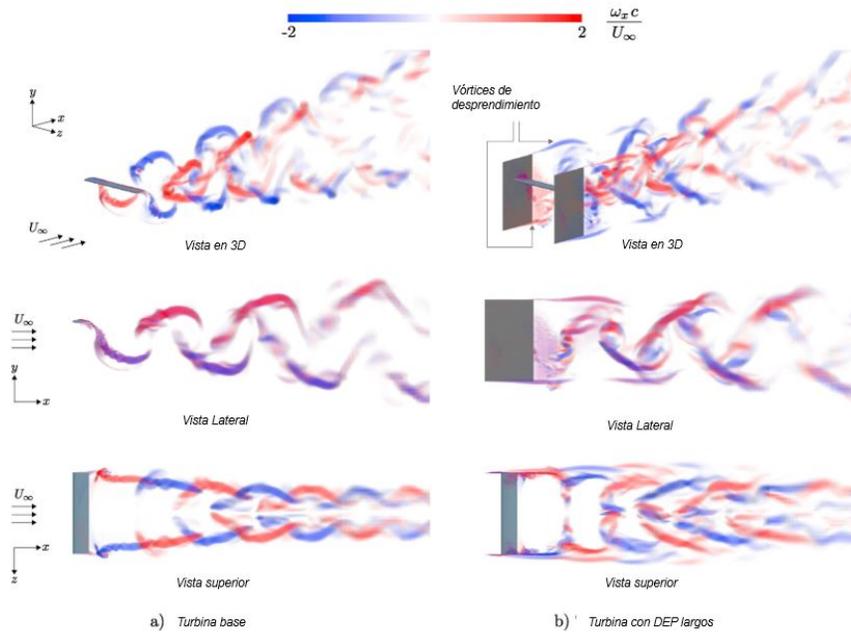


Figura 24: Representación volumétrica de la corriente en la estela de la turbina oscilante [79].

Zhou et al. [80] se centra en la investigación de las características de trabajo y el rendimiento hidrodinámico de una aleta semiactiva que se mueve en un arco circular mediante un brazo oscilante, se utilizaron diferentes parámetros de diseño, incluyendo la longitud del brazo oscilante y la rigidez del resorte de torsión, para analizar el rendimiento de la aleta. Se utilizó un método de acoplamiento fluido-estructura tridimensional para resolver la ecuación de dinámica de fluidos y la ecuación de dinámica estructural y se analizaron las características de trabajo de la estructura con diferentes parámetros de movimiento y geometría. Los resultados mostraron que aumentar la longitud del brazo oscilante es beneficioso para mejorar la eficiencia máxima de la aleta semiactiva, así como para mejorar el coeficiente de empuje correspondiente al punto de eficiencia máxima. Y reducir la rigidez del resorte también es beneficioso para mejorar la eficiencia máxima del sistema de propulsión. Sin embargo, esto no es beneficioso para el coeficiente de empuje. Se estudio la trayectoria elíptica y su efecto en el coeficiente de empuje a baja velocidad de avance. El estudio proporciona una comprensión más profunda del rendimiento hidrodinámico y las características de trabajo de una aleta semiactiva en movimiento curvo. Estos hallazgos pueden ser útiles para el diseño y desarrollo de sistemas de propulsión y generación de energía eléctrica. En la Figura 25 se muestra un esquema del sistema estudiado en este trabajo.

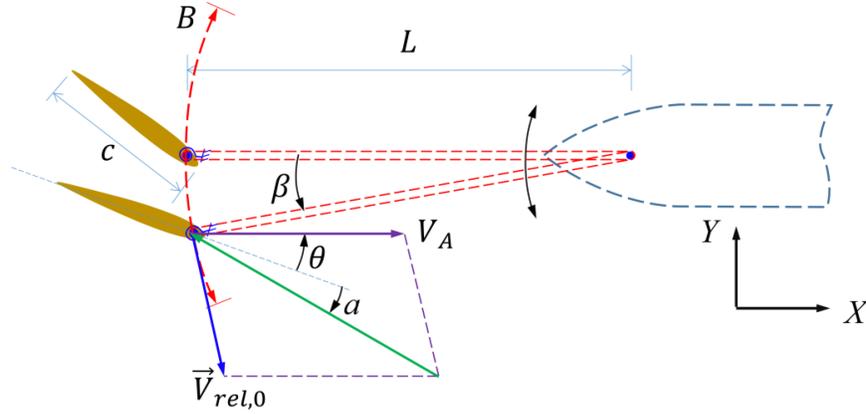


Figura 25: Esquema del hidropelano de semiactivo impulsado por el brazo oscilante [80].

Jiang et al. [81] presentaron un estudio numérico de un convertidor de energía basado en una lámina oscilante completamente pasiva. Con una geometría de media luna invertida, como se muestra en la Figura 26 la lámina experimenta movimientos combinados de elevación y cabeceo. La energía se extrae del flujo mediante la generación de momentos periódicos de un brazo conectado a un eje. Realizaron simulaciones de turbulencia incompresible tridimensionales para obtener el campo de flujo transitorio y la fuerza aerodinámica. crean un sistema de masa-amortiguador-resorte para responder a la fuerza aerodinámica transitoria. Se investigan los efectos del factor de amortiguación de cabeceo, el factor de amortiguación de elevación y la longitud de la lámina en el rendimiento de extracción de energía. Los resultados muestran que los amortiguadores de cabeceo y balanceo deben cooperar para lograr el mejor rendimiento de extracción de energía. El movimiento de elevación o de balanceo contribuye alrededor del 90 % del coeficiente de potencia total, mientras que el movimiento de cabeceo contribuye con el otro 10 %. La longitud de la lámina influye en el rendimiento de extracción de energía, y las pérdidas son causadas por el efecto 3D, principalmente debido al flujo que interactúa en el borde de fuga en la punta del álabo. En general, el estudio demuestra que el convertidor de energía basado en lámina oscilante completamente pasiva es una opción viable para la extracción de energía de una corriente.

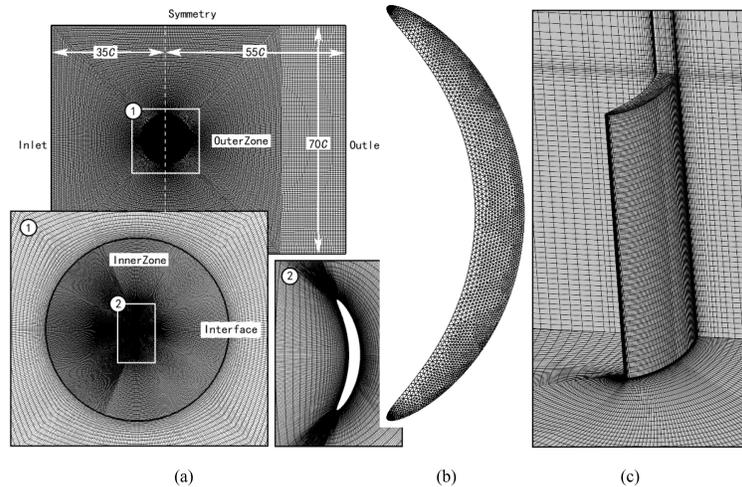


Figura 26: Esquema simplificado del hidropelano de aleteo semiactivo impulsado por el brazo oscilante [81].

Investigaciones como esta demuestran que la innovación en la forma del álabo oscilante puede conducir a mejoras en el rendimiento de la turbina. Además se destaca las diferentes estrategias planteadas para mejorar el desempeño de las turbinas. A continuación se destacan trabajos que innovan en la forma de los álabos de las turbinas.

Zhou et al. [82] presentaron un recolector de energía hidrocínético. Este dispositivo se compone de un álabo oscilante con un deflector en la zona de la cola que se puede desviar gradualmente hacia arriba durante el ciclo de oscilación descendente y hacia abajo durante el ciclo de oscilación ascendente. La eficiencia de la recolección de energía se analizó mediante (CFD). El estudio encontró que la eficiencia mejorada de recolección de energía se debe principalmente al aumento de la fuerza de empuje máxima y la mejor sincronización temporal entre la cinemática del ala y la producción de fuerza. Además, el deflector produce un aumento en la curvatura efectiva, lo que se traduce en una mayor diferencia de presión entre los dos lados del álabo, lo que aumenta la sustentación. En general, la eficiencia de recolección de energía del hidroala con el deflector optimizado es significativamente mayor que la de un recolector de energía hidroeléctrica convencional, y se logra un aumento máximo del 23,5 % cuando la frecuencia reducida es de 0,20. La apertura óptima del deflector es de 30° y su longitud óptima (l) es $1/3$ de la cuerda y la separación entre el cuerpo y el deflector debe ser de 0,001 de la cuerda.

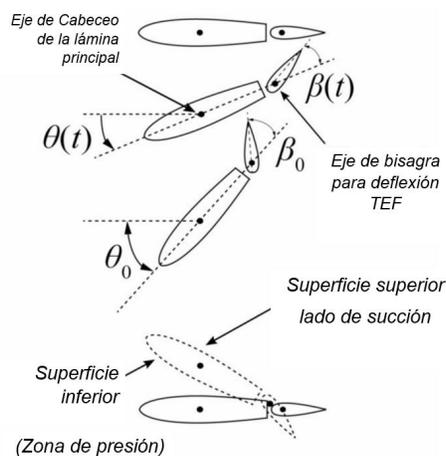


Figura 27: Diagrama esquemático del movimiento oscilante del flap del borde de salida [82].

Dado que las turbinas oscilantes se asemejan en operación a las aletas de los peces, toma importancia entender y conocer los trabajos referentes a la propulsión acuática y la interacción de las aletas caudales con el fluido, en función de su forma y configuración. Por tanto se presentan los siguientes trabajos.

Xie et al. [83] presentaron los resultados en simulación numérica 3D y de forma experimental de una aleta caudal bioinspirada en truchas y mamíferos acuáticos, ver la Figura 28. Evaluando tres modos de aleteo tridimensional cerca de la pared o del suelo. Mediante el estudio paramétrico para investigar los efectos del espacio libre dv/dh entre la aleta caudal, el suelo y el área proyectada de la aleta S , en las características hidrodinámicas de la aleta caudal. Para validar los resultados de la simulación, se diseñó un sistema mecánico de aleteo de aleta caudal y se realizaron experimentos hidrodinámicos en un canal de dimensiones $LxWxH$ 2 m x 1,2 m x 1,2 m en diferentes espacios libres dv/dh , frecuencias f y áreas proyectadas S . Determinado en el modo de aleteo vertical, el efecto del suelo en el coeficiente de empuje C_x aumenta cuando la distancia dv disminuye, lo que tiene efectos en la eficiencia de propulsión. La aleta caudal con una gran área proyectada S es más sensible al efecto del suelo y tiene una mejor eficiencia. Para un dv dado, cuanto mayor es S , mayor es el coeficiente de sustentación C_z . La aleta caudal que aletea cerca del suelo con una gran área proyectada S es más propensa al cabeceo.

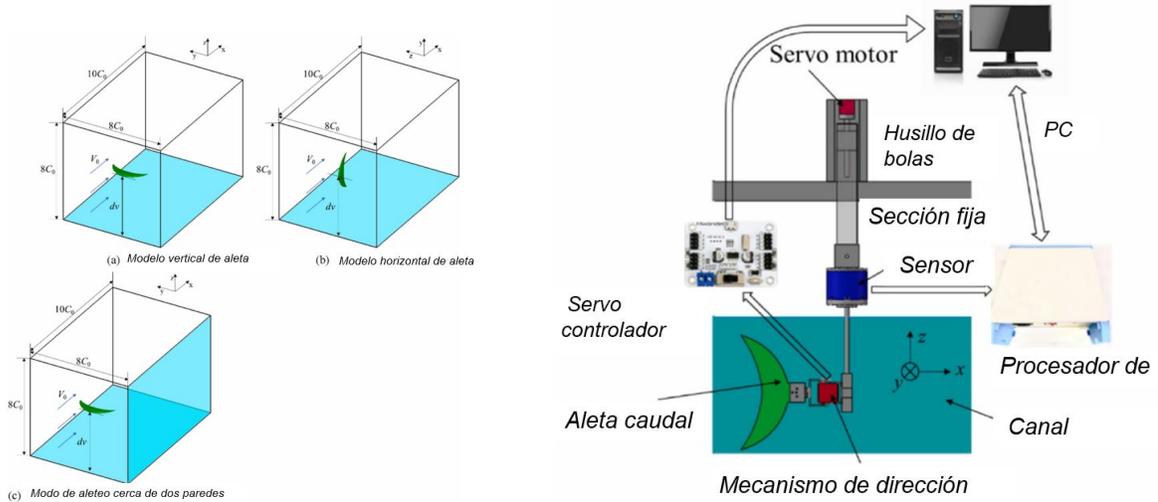


Figura 28: Aleta caudal en dominio computacional y esquemático de pruebas experimentales [83].

Este trabajo reafirma las conclusiones de trabajos en turbinas flapping foil, el efecto de las paredes o el suelo, mejora el desempeño de los álabes, impactando en la eficiencia de propulsión y de generación de energía.

La elección de una forma de aleta caudal particular para un vehículo submarino robotizado no es sencilla. Por tanto, para abordar este problema, Krishnadas et al. [84] realizaron simulaciones numéricas asumiendo un flujo laminar. Se comparan las formas de 7 aletas caudales de la misma área de superficie, pero diferentes en cuanto al ángulo del borde de ataque de la aleta (o ángulo delta) y la naturaleza de la bifurcación. Utilizando simulaciones (CFD) en 2D, obtuvo el rango de números de Strouhal (St) con alta eficiencia para acotar el problema. Esta información se utilizó luego en simulaciones 3D, donde se observó un pico en el rendimiento de propulsión, cerca del valor St de 0,25. Esta información se utilizó luego en simulaciones 3D, donde se observó un pico en el rendimiento de propulsión, cerca del valor St de 0,25. La eficiencia máxima se obtuvo para una forma, intermedia con un pedúnculo caudal moderado y una bifurcación pequeña, la cual presenta mejora frente al modelo base de un 11 %. Las simulaciones numéricas demostraron que el papel de los vórtices del borde de ataque (LEVs) está directamente relacionado con las características geométricas de la aleta, particularmente su geometría.

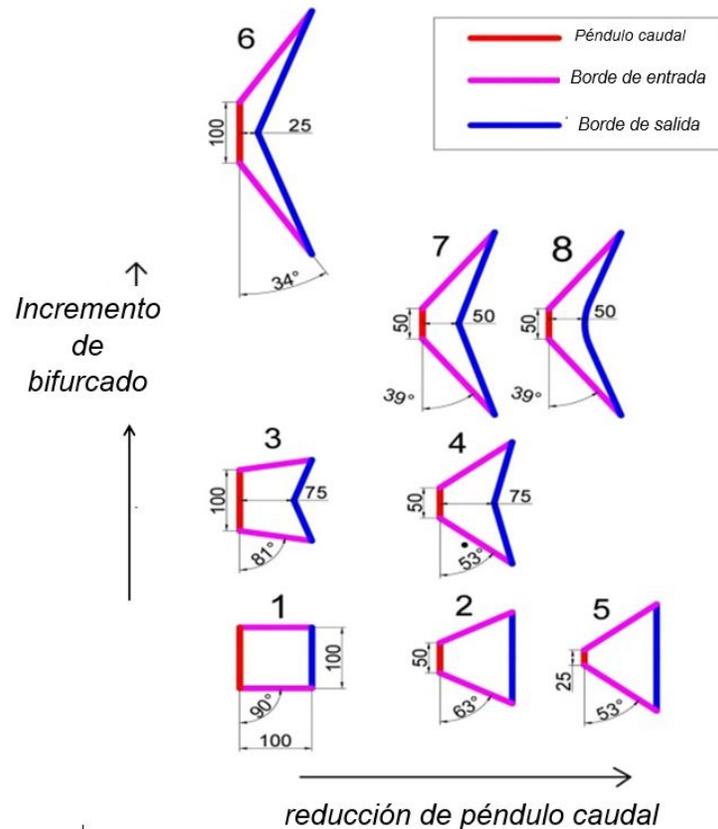


Figura 29: Ilustración de las formas de aleta caudal consideradas para el estudio. Aleta rectangular (1), pedúnculo caudal moderado sin bifurcación (2), bifurcación pequeña sin disminución del pedúnculo caudal (3), forma combinada con pedúnculo caudal moderado y bifurcación pequeña (4), pedúnculo caudal pequeño sin bifurcación (5), bifurcación grande sin disminución del pedúnculo caudal (6), pedúnculo caudal moderado con bifurcación moderada (7), pedúnculo caudal moderado con borde de salida semilunar (8); Todas las dimensiones están en mm y los ángulos del borde de salida están en grados [84].

Xiong [85] enfoca su trabajo en las estructuras de vórtices dentro de vórtices (VV) detrás de tres formas diferentes de aletas caudales bifurcadas basadas en tres especies de peces. Los resultados muestran que la sincronización de la separación de vórtices en el borde de fuga y el desprendimiento de vórtices en el borde de ataque contribuye a la generación de la estructura VV. Las estructuras VV de aletas caudales con diferentes longitudes de cuerda se pueden observar casi simultáneamente. El número de Strouhal no solo determina el número de vórtices que se desprenden en la estela, sino que también refleja el tiempo de activación y el efecto superpuesto de los vórtices del borde de ataque y del borde de fuga en el rendimiento de propulsión. El estudio concluye que la forma de biología tiene un efecto directo sobre la eficiencia de propulsión.

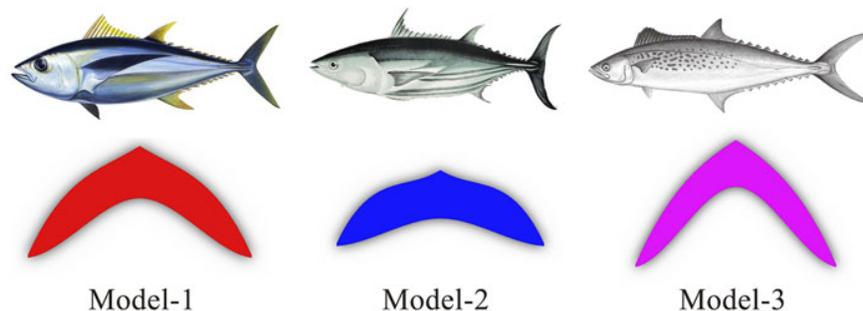


Figura 30: Formas de los tres modelos de aleta caudal [85].

Hoerner et al. [86] realizaron una investigación experimental para determinar si un álabe, con adaptaciones biológicas reduce las cargas estructurales al paso del flujo, esto se logra por medio de un perfil flexible, el cual varía el ángulo de ataque, generando un control dinámico y adaptativo frente a las condiciones del fluido. La investigación demostró que los picos de carga se atenúan y bajan su intensidad, que se traduce en una mayor capacidad de extracción de energía y un aumento en la eficiencia. Esto se logra gracias a la flexibilidad, del perfil que genera desprendimiento de los vórtices más cortos, creando una estela reducida.

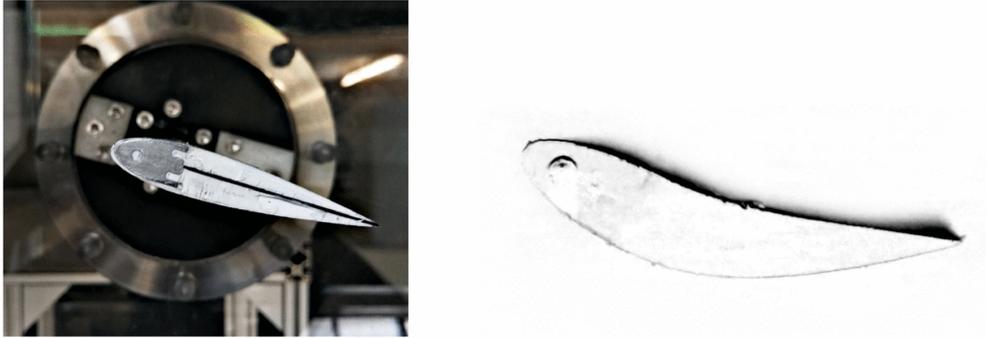


Figura 31: (Izquierda) Sección de un hidroala flexible bioinspirado, con borde de ataque sólido y esqueleto flexible de fibra de carbono, rodeado de silicona blanca. (Derecha) hidroala adaptada al paso del flujo [86].

Una de las áreas de uso de los alabes oscilantes es en la propulsión de navíos o de robots acuáticos, son particularmente estos últimos los que más frecuentemente adaptan formas biológicas, buscando mejorar su eficiencia y rendimiento. La propulsión y la generación de energía están regidas por las mismas ecuaciones de rendimiento mostradas anteriormente, pero difieren en la componente de la fuerza generada por el álabe oscilante cambia, para la generación de energía toma relevancia la componente perpendicular al movimiento del fluido, mientras que para la propulsión toma importancia la componente paralela y de sentido contrario a la corriente. Dichas fuerzas están relacionadas por el ángulo de ataque efectivo, el cual se definió en la sección anterior, pero que en pocas palabras es el ángulo de ataque del álabe en un determinado momento. Por tanto, existe una relación matemática que vincula la propulsión y la generación de energía. Por ende, estudiar los casos de éxito de prototipos robóticos y de propulsión, que implementan formas biológicas puede ayudar al desarrollo de este trabajo [40].

Uno de los trabajos que destaca es el generado por Ramamurti et al. [87] quienes evaluaron por medio de simulaciones numéricas 4 formas de aleta caudal pertenecientes al atún, la caballa y al pez napoleón comparadas contra una cola trapezoidal bioinspirada, generada de trabajos anteriores del equipo de Ramamurti. En la Figura 32. Se pueden observar los perfiles evaluados, los cuales toman la forma de la cola del atún, el pez napoleón, la cola trapezoidal biomimética y la cola del pez caballa. Este estudio se centró en la interacción de las aletas caudales con el cuerpo y las aletas pectorales de los peces, ubicadas aguas arriba. Determinando que la aleta trapezoidal genera el mayor empuje, para las condiciones evaluadas.

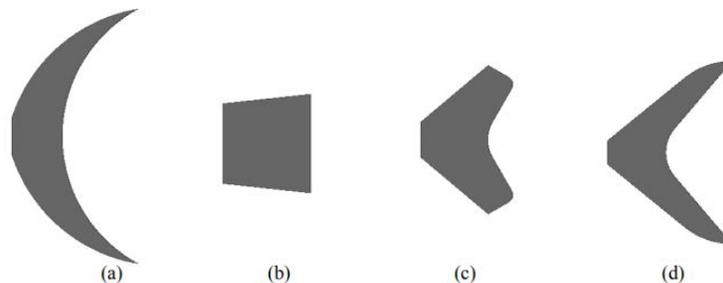


Figura 32: (a) Cola de atún, (b) cola de pez napoleón. (c) Cola trapezoidal. (d) Cola de pez caballa. [88].

Este estudio concuerda con el realizado por Lima Rodríguez [89] quienes desarrollan un algoritmo pseudoaleatorio para generar modelos biomiméticos. En este trabajo se evalúan 4 formas derivadas de una cola trapecoidal (modelo base, redondeada, bifurcadas y lunadas) como se puede observar en la Figura 33. Esta investigación se centra en el estudio de los bordes de ataque y de salida de las aletas, evaluado por medio de simulación numérica las fuerzas hidrodinámicas generadas por cada forma. Donde la forma de medialuna o lunada de la aleta, presenta la mayor velocidad media y el menor arrastre. Pero la menor eficiencia de rendimiento. La aleta bifurcada presenta un balance óptimo entre velocidad y rendimiento. Mientras que una cola redondeada ofrece una mayor maniobrabilidad, pero un mayor arrastre que las demás formas.

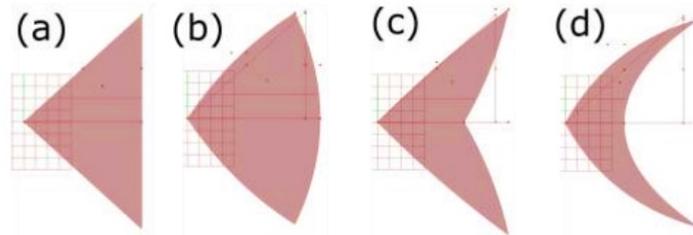


Figura 33: (a) Modelo base, (b) Redondeada. (c) Bifurcada. (d) Lunada. [89].

Estas investigaciones muestran que la forma de los álabes o aletas caudales, tiene relevancia para el desarrollo de la eficiencia de propulsión, pero su impacto en la absorción de energía aun no es claro, por tanto la presente investigación busca determinar si la incorporación de una forma biológica en los álabes de las turbinas oscilantes flapping foil, tiene un impacto positivo en la recolección de energía.

A continuación se presentan algunos casos de éxito en la incorporación de características biomiméticas, para la propulsión y para la generación de energía.

En el diseño de robots propulsados por aletas oscilantes, es común encontrar la metodología biomimética, la cual parte de la forma de un pez o animal acuático para llegar a un diseño funcional, tal es el trabajo de Xie et al. [90], quienes crean un generador de patrones de aleteo, que permite la experimentación de diferentes modos de nado en un prototipo robótico, lo que permitió entender como el patrón de movimiento de la cola se relaciona con la velocidad crucero del prototipo. Además en este trabajo se imitan la estructura muscular de los peces, controlada por medio de cables y muelles que permite la oscilación de la cola, de forma flexible. En la Figura 34 se muestra un esquema del prototipo robótico. La cola es trapecoidal y bifurcada y creada en gel de silicona. Este trabajo concluye que el movimiento de propulsión más eficiente se presenta cuando el aleteo es simétrico y sinusoidal. destacando que los patrones de nado con asimetrías llevan a menores valores de rendimiento.

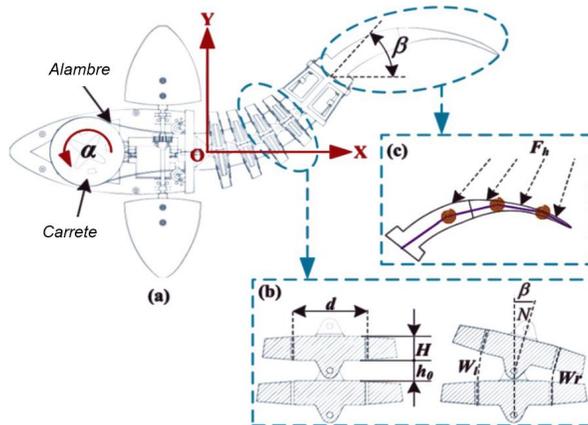


Figura 34: Esquema prototipo robótico acuatico bioinspirado [90].

Hashem and Zhu [88] desarrollan una investigación numérica para una turbina tipo savonius, dicha investigación implementa un diseño bioinspirado en los peces koi, particularmente cuando los peces nadan en duplas giratorias. En este trabajo se utilizan la relación de superposición y la relación de separación entre los peces para definir la separación entre las palas de la turbina. Los resultados revelaron que el diseño óptimo para la turbina hidrocínética Savonius bioinspirada corresponde a la relaciones de superposición y brecha de 0,2085 y 0,0057, respectivamente. La configuración óptima genera un coeficiente de potencia máximo de 0,2521, que es un 17,6% más alto que el de una forma convencional con la misma relación de velocidad punta. En la Figura 35 se muestra un resumen gráfico del trabajo desarrollado.

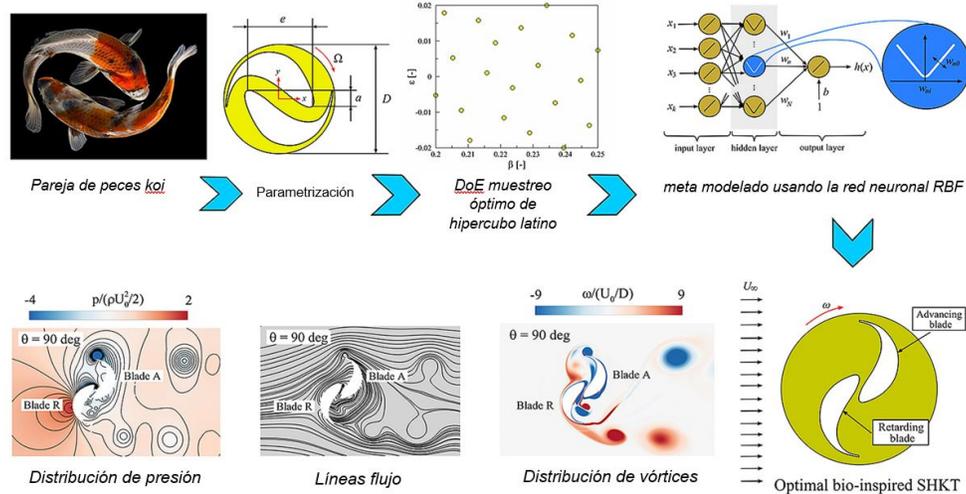


Figura 35: Resumen gráfico del trabajo desarrollado por Hashem and Zhu [88].

Uno de los trabajos que resalta en el campo de la generación de energía es el propuesto por Wang et al. [91], quienes hace una revisión sobre diseños bioinspirados en las aletas de las ballenas jorobadas, específicamente en las protuberancias que generan un borde de ataque dentado. Estas protuberancias en las aletas llevaron al desarrollo de los bordes ondulados de vanguardia. Dado que alteran el paso del fluido sobre la superficie, disminuyendo los efectos aerodinámicos que perjudican a los VAWTS. En especial el bloqueo dinámico de los álabes. Para atacar ese problema, se realizó un análisis estadístico combinado con CFD para encontrar las variables más relevantes, en el diseño de la turbina con borde ondulado, esto usando el método estadístico de

Taguchi. El diseño final nos muestra una turbina tipo H con borde ondulado, que mejora el paso del fluido sobre las superficies de los álabes mejorando a su vez el desempeño según los resultados derivados de este estudio, el VAWT optimizado tiene una mejora de potencia del 18,3% en TSR de 2, lo que indica una mejor capacidad operativa en TSR bajos. En la Figura 36 se muestra el dominio computacional y el modelo de turbina bioinspirada en las aletas de las ballenas.

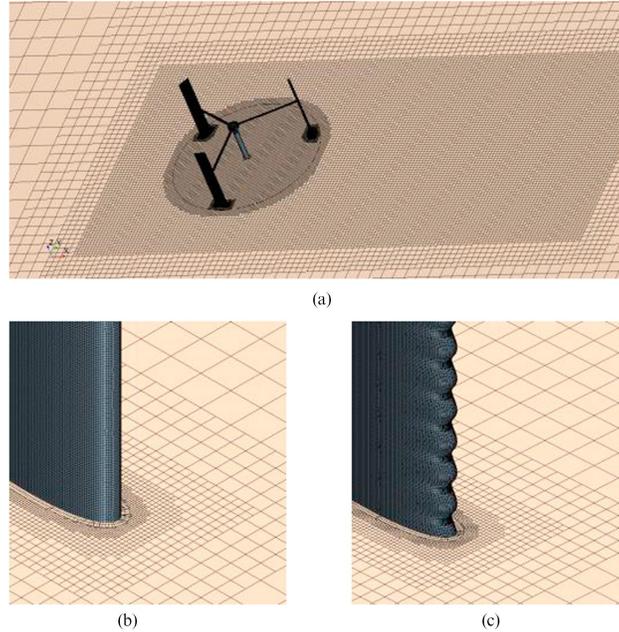


Figura 36: Dominio computacional y modelo de turbina bioinspirada en las aletas de las ballenas [91].

Como se evidencio en el estado del arte, el confinamiento favorece la generación de electricidad, cuando se usan turbinas oscilantes. Por otro lado, se pudieron evidenciar diferentes estrategias para mejorar la eficiencia de las turbinas, desde turbinas en tándem, multi elemento, flexibles y con variaciones geométricas. También se resalta el vacío en la literatura en referencia al efecto de la forma tridimensional, aunque las investigaciones de aletas caudales arrojan luz sobre este tema dado que concluyen que las aletas bifurcadas generan una mayor eficiencia en la propulsión. Toma importancia explorar si los álabes bioinspirados en aletas caudales, aportan en la extracción de energía de las corrientes de agua, al ser incorporadas en una turbina flapping foil, esto teniendo en cuenta que la incorporación de características biológicas mejora el rendimiento de sistemas de recolección de energía renovables.

Conclusiones del estado del arte

- El confinamiento es favorable para la generación de energía eléctrica.
- El bloqueo hidrodinámico para las turbinas oscilantes solo se presenta momentáneamente y suele favorecer el desempeño de estas.
- La flexibilidad de los perfiles o la articulación de estos aumenta el rango de movimiento y mejora el desempeño.
- Las placas en los extremos de los álabes interactúan con los vórtices de desprendimiento de forma positiva, pero generan mayor arrastre. Por tanto, es mejor generar confinamiento alrededor de la turbina.
- Existen gran variedad de trayectorias que los álabes pueden seguir, ya sean líneas rectas o arcos de curvas elípticas, pero su rendimiento aún está por ser determinado.
- Las formas biológicas interactúan de forma positiva con el confinamiento y con el efecto suelo. Además, la incorporación de formas trapezoidales bifurcadas ha demostrado tener el balance ideal entre fuerza propulsora y maniobrabilidad contra el arrastre.
- Las formas biológicas incorporadas al desarrollo de turbinas eólicas e hidrocinéticas y prototipos robóticos muestran un aumento en la eficiencia.

6. Diseño de turbinas oscilantes

En esta sección se describen las consideraciones, parámetros y metodología utilizados para el diseño base del álabe oscilante, el cual se determina a partir de la revisión de la literatura y del estado del arte. Además, se detalla la metodología seguida para desarrollar los diseños biomiméticos o bioinspirados, los cuales se basan en las especies migratorias de los ríos colombianos.

6.1. Diseño de turbina base

Para el diseño de las turbinas, toma gran importancia el volumen del canal hidrodinámico presente en la Universidad de Antioquia, ver la Figura 37 el cual tiene 350 mm de ancho y una profundidad máxima de 490 mm. La cota de agua se define en 350 mm de altura, lo que nos da un área cuadrada transversal de 122.500 mm². El ancho del canal juega un papel fundamental en el diseño, dado que establece el recorrido máximo del álabe. Tomando una relación de aspecto de 4,5, como se establece como valor mínimo recomendado en [40], se define la longitud máxima del álabe en 320 mm y una cuerda de 71 mm. Esto deja un margen de 30 mm entre el suelo y la turbina.



Figura 37: Fotografía Canal hidrodinámico universidad de Antioquia, elaboración propia

La frecuencia de oscilación se plantea en función del número de Strouhal mediante la Ecuación 5. Tomando un valor de 0,2 el cual está asociado al movimiento de peces y aves [92], se obtiene una frecuencia de 1,41 Hz.

La Tabla 4 recoge los parámetros geométricos necesarios para la creación del modelo base de álabe, el cual tomara relevancia tanto en la creación de los modelos experimentales como en las simulaciones numéricas.

Tabla 4: Descripción de parámetros diseño modelo base.

Variable	Valor
Relación de aspecto	4,5
Longitud del perfil (L)	320 [mm]
Cuerda (c)	71 [mm]
Elevación (h_0)	71 [mm]
Amplitud de movimiento (A)	142 [mm]
Ángulo de cabeceo (θ_0)	90° o 1,57 rad
Frecuencia de oscilación	1,41 Hz
Ángulo de desfase ϕ	90° o 1,57 rad

En la sección anterior, se destacaron trabajos que mostraron el desempeño positivo de álabes bifurcados para la propulsión, dichos estudios no evaluaron la flexibilidad de los perfiles o el cambio de forma, una característica presente en las aletas de los peces. En el presente estudio se evaluará el desempeño de perfiles longitudinales basados en la cola de peces nativos de Colombia y su influencia sobre la turbina oscilante, pero con perfiles rígidos esto como un primer acercamiento a la influencia de los perfiles longitudinales en la generación de energía. Buscando llenar un vacío señalado por la literatura para los efectos de formas 3D en el desempeño de la turbina.

Como lo señalan [42], la forma transversal del álabe no tiene un efecto significativo sobre el rendimiento de la turbina; por lo tanto, se define un espesor D de 10 mm y una sección rectangular definida por el espesor y por la cuerda con un área de 10 x 71 mm². Dicho espesor evitara que los álabes presenten una flexión significativa. Aunque la simulación y experimentación se exploran en secciones posteriores, la definición del material y su versatilidad para crear álabes con geometrías complejas como lo son las aletas de los peces toma relevancia al momento de crear los modelos. El material que será empleado para la creación de los álabes es el acrílico, un material polimérico muy versátil para el prototipado. Por otro lado, una sección rectangular y esbelta facilita la fabricación, evitando la implementación de perfiles transversales como los NACA, EPPLER entre otros cuyas medidas y curvas están en función de la cuerda. El acrílico en espesores menores podría presentar flexión o no soportar las fuerzas del agua. Se toma este valor de 10 mm buscando facilitar el prototipado de las geometrías y como señala la literatura la poca relevancia del tipo de sección transversal permite la implementación de una medida arbitraria para la variable D . En la Figura 38 se aprecia la disposición de las medidas del álabe modelo base.

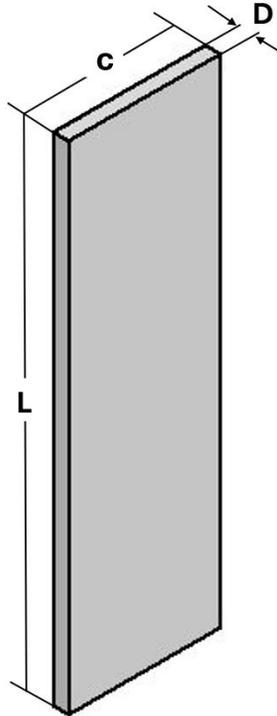


Figura 38: Álabe de la turbina base. Elaboración propia.

Como señalan los parámetros de rendimiento, el factor determinante en el desempeño de la turbina es la fuerza, generada por la interacción del álabe con la corriente a medida que esta se desplaza por el fluido. Dicha fuerza es cambiante y está en función del ángulo de cabeceo y de ataque del perfil hidrodinámico. Establecida la geometría de la turbina base Flapping Foil, se determinan dos parámetros para la creación y posterior comparación de la turbina bioinspirada y el modelo base. Estos parámetros son el área del perfil determinado por la longitud de la cuerda (c) y la extensión del álabe (L). Dicha área es de 122.500 mm^2 . El otro parámetro es la relación de aspecto (AR) definida por la Ecuación 4, dado que determina el área barrida por la turbina y por tanto, la energía máxima que puede captar [40].

6.2. Diseño bioinspirado

Para corroborar si la implementación de una forma biológica puede mejorar el rendimiento de la turbina oscilante, se extraen características generales de los peces, especialmente de sus aletas y colas. Pero los peces presentan una gran variedad de formas en sus colas, que se pueden clasificar principalmente como heterocerca, homocerca y Dificerca. Las colas homocerca presentan lóbulos superior e inferior simétricos, mientras que las colas diphyerca se caracterizan por una distribución asimétrica del tejido caudal que resulta en dos lóbulos, superior e inferior, de dimensiones relativamente equivalentes [54].

La guía de especies migratorias de Colombia [93] realiza una recopilación fotográfica de las especies que migran en el territorio nacional, permitiendo extraer características llamativas o de interés para evaluar en un biodiseño. Se hace énfasis en las especies de río migratorias, ya que la turbina oscilante está pensada para operar en los ríos de Colombia y dichos peces han evolucionado para tales condiciones. Además, su condición de especie migrante las lleva a experimentar diferentes condiciones en los ríos, como cambios de velocidad, sedimentación y temperatura. Por tanto, este grupo de peces cobra relevancia. En las Figuras 39, 40, 41, 42 se muestra parte de la recopilación de la guía, donde se destaca que gran parte de los peces migratorios y de río presenta una cola bifurcada y homocerca.



▼ *Prochilodus magdalenae* p. 344



▼ *Prochilodus mariae* p. 347



▼ *Prochilodus nigricans* p. 349



▼ *Prochilodus reticulatus* p. 351



▼ *Prochilodus rubrotaeniatus* p. 353



▼ *Semaprochilodus insignis* p. 355



▼ *Semaprochilodus kneri* p. 357



▼ *Semaprochilodus laticeps* p. 359



▼ *Semaprochilodus taeniurus* p. 361

Figura 39: Recopilación de imágenes de especies de peces migrante en Colombia. Imagen 1 [\[93\]](#).

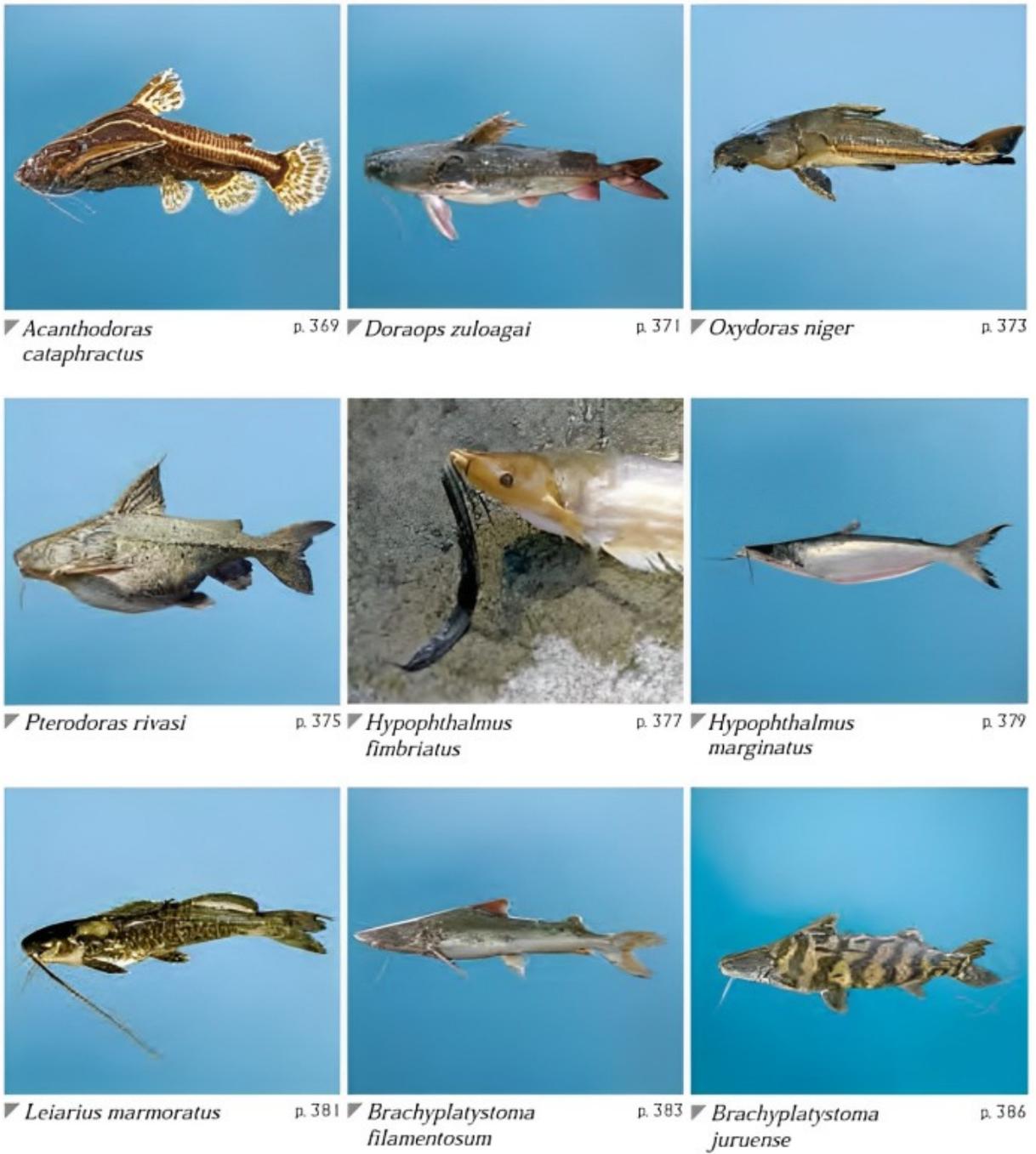


Figura 40: Recopilación de imágenes de especies de peces migrante en Colombia. Imagen 2 [93](#).



▼ *Moenkhausia lepidura*

p. 269



▼ *Moenkhausia sanctaefilomenae*

p. 271



▼ *Myleus schomburgkii*

p. 273



▼ *Myloplus rubripinnis*

p. 275



▼ *Mylossoma acanthogaster*

p. 278



▼ *Mylossoma aureum*

p. 280



▼ *Mylossoma duriventre*

p. 282



▼ *Piaractus brachipomus*

p. 285



▼ *Salminus affinis*

p. 288

Figura 41: Recopilación de imágenes de especies de peces migrante en Colombia Imagen 3 [93].



Figura 42: Recopilación de imágenes de especies de peces migrante en Colombia Imagen 4 [93].

Como se aprecia en la guía de peces de Colombia [93], gran parte de las especies presentan una cola con lóbulos simétricos, particularmente la familia de los *Prochilodus*, *Salminus*, *Myloplus* y *Brycon* (Figuras 39 [41] y 42 respectivamente). Mientras que especies denominadas de forma común como bagres, los *leiaris* y *brachyplatystoma* presentan colas con lóbulos asimétricos, de la misma manera los peces de la familia *oxydoras* (Figura 40), comúnmente llamados limpia piedras, también presenta este tipo de cola. Todos adaptados a las condiciones particulares y a su estilo de vida [93].

Los peces de la familia *Prochilodus* presentan un comportamiento alimenticio notable: se alimentan principalmente

de algas que crecen sobre las rocas en el lecho de los ríos. Utilizan su boca para sujetarse a las rocas mientras desprenden fragmentos de algas [94],[95]. Este comportamiento es de interés, ya que, al estar cerca de las rocas los *Prochilodus* experimentan constantemente vorticidades y otras inestabilidades propias del flujo libre en los ríos. Estas condiciones son muy similares a las que impulsan las turbinas oscilantes, ya sea por resonancia, como en el VIV y el buffeting, o por inestabilidades, como en el flutter y el galloping.

En la familia *Prochilodus*, el Bocachico de nombre científico *Prochilodus magdalenae* destaca, Dadas las grandes distancias que recorre, migrando a lo largo del río Magdalena, Cauca, Sinú entre otros. Su presencia en diferentes afluentes del país, lo convierten en uno de los peces más consumidos y de interés comercial [93],[96],[97]. Esto ha derivado en una gran cantidad de investigaciones sobre su comportamiento.

Aunque un gran número de peces exhiben particularidades geométricas en sus cuerpos o comportamientos que podrían servir de inspiración para crear un diseño biomimético para una turbina oscilante, en este trabajo nos centraremos en el Bocachico. Esto se debe a que la cola del Bocachico, con lóbulos homogéneos, resalta una cualidad común en muchos peces. Además, su comportamiento alimenticio, previamente destacado, lo posiciona como un candidato ideal para investigar el impacto de la forma longitudinal en los álabes de las turbinas oscilantes.

Los perfiles longitudinales de las colas de los peces presentan varias características de interés, tales como los bordes de ataque o de fuga, así como la rugosidad y protuberancias. Sin embargo, en el presente estudio nos centraremos en dos características: el borde de ataque y el borde de fuga. En la Figura 43 se detallan los bordes de ataque y de fuga de la cola del bocachico.

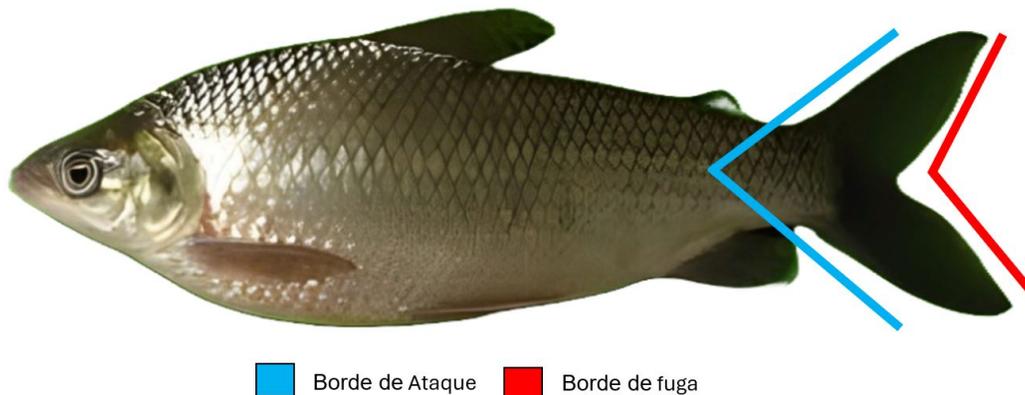


Figura 43: Fotografía *Prochilodus magdalenae* [98]

Una vez establecidos los aspectos de interés, se crea una silueta que incluye un borde de ataque bifurcado y el borde de fuga, para luego ser acoplada con la información de la turbina Flapping Foil. Generamos una curva de forma aproximada a la cola del pez, lo cual se logró mediante el software Inventor de Autodesk, a partir de una fotografía ver la Figura 43. Esta fotografía corresponde a un individuo proveniente de una piscifactoría, cuya envergadura se documentó en aproximadamente 230 mm [98]. Esto permitió realizar un escalado de la fotografía a las dimensiones reales del pez. Con las dimensiones reales, se aísla el área de la cola, que posteriormente se acota con una silueta y se le aplica simetría, de manera que ambos lóbulos de la cola sean homogéneos ver la Figura 44

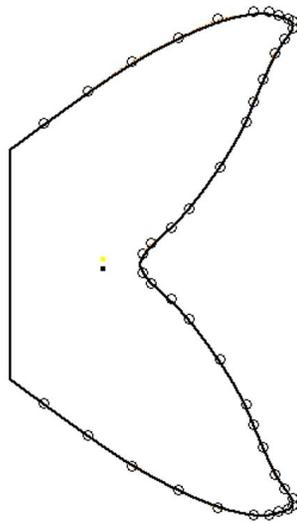


Figura 44: Silueta cola de bocachico, elaboración propia.

Se crean 3 modelos de turbinas bioinspiradas en la cola el bocachico. Estos modelos mantienen la relación de aspecto de 4,5 pero no el área del modelo base. El Modelo (A) representa el modelo base, los modelos (B,C,D) incorpora el borde de fuga, el borde de ataque en la cola o ambas características ver Figura 45.

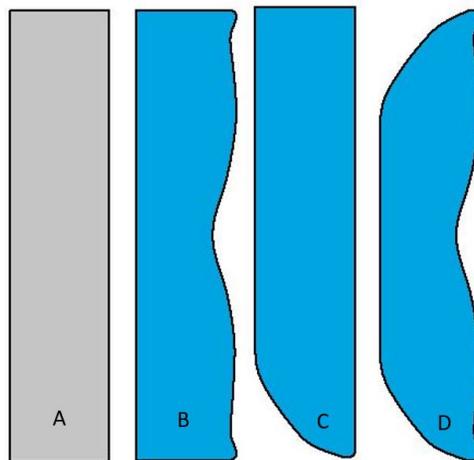


Figura 45: Modelo base (A), modelo con borde de fuga (B), modelo con borde de ataque (C), modelo con borde de ataque y fuga (D). Elaboración propia.

Para ver los efectos del área en la turbinas se crean 2 modelos mas, el modelo (E), el cual incorpora de forma mas fiel la forma de la cola del pez migratorio, igualando el área con el modelo base, ver Figura 46. el modelo F, es una variación del modelo (C) al cual se le agrega una ligera curvatura en el borde de ataque para compensar el área faltante, de tal manera que la relación de aspecto AR sea muy cercana a 4,5 ver Figura 47.

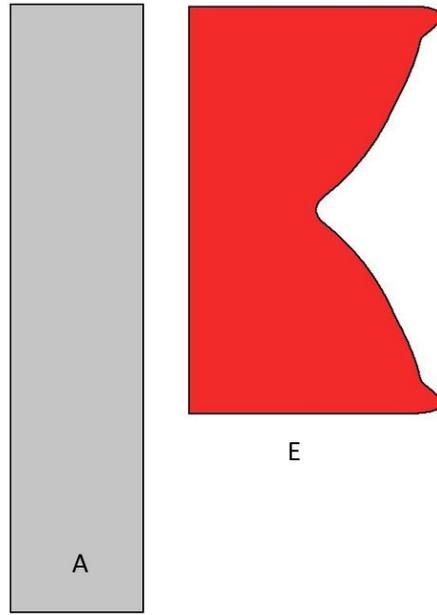


Figura 46: Modelo base (A), modelo con border de fuga mas fiel a la silueta del bocachico (E). Elaboración propia.

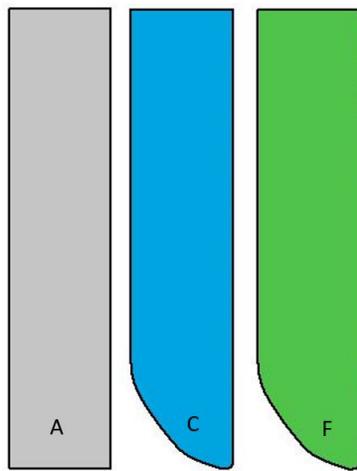


Figura 47: Modelo base (A), modelo con Borde de ataque (C), modelo variación del modelo C (F). Elaboración propia.

7. Simulación CFD

El dominio computacional se define en función del canal hidrodinámico de la Universidad de Antioquia, el cual tiene una sección de pruebas de aproximadamente 2 m de largo. Dicha sección está ubicada en la mitad del canal de 5 m. El dominio computacional se extiende un metro por delante de la turbina, lo que equivale a 14 veces la cuerda del modelo base (14c), esto buscando evidenciar si la turbina genera represamiento aguas arriba. Esta decisión se basa en los trabajos de Wang et al. [77], Xie et al. [83], Jiang et al. [81]. Los cuales establecen una distancia de $3c$, $5c$ y $35c$ respectivamente. Por tanto, un valor intermedio se presenta como una opción pertinente. Por lo tanto, el dominio se acotará a 1 m por delante del modelo y 2,5 m detrás de la turbina, eliminando así 1,5 metros del volumen real del canal. Este ajuste busca reducir el número de elementos en la simulación, lo cual se traduce en tiempos de cálculo más cortos. En la Figura 48 se detalla el dominio computacional.

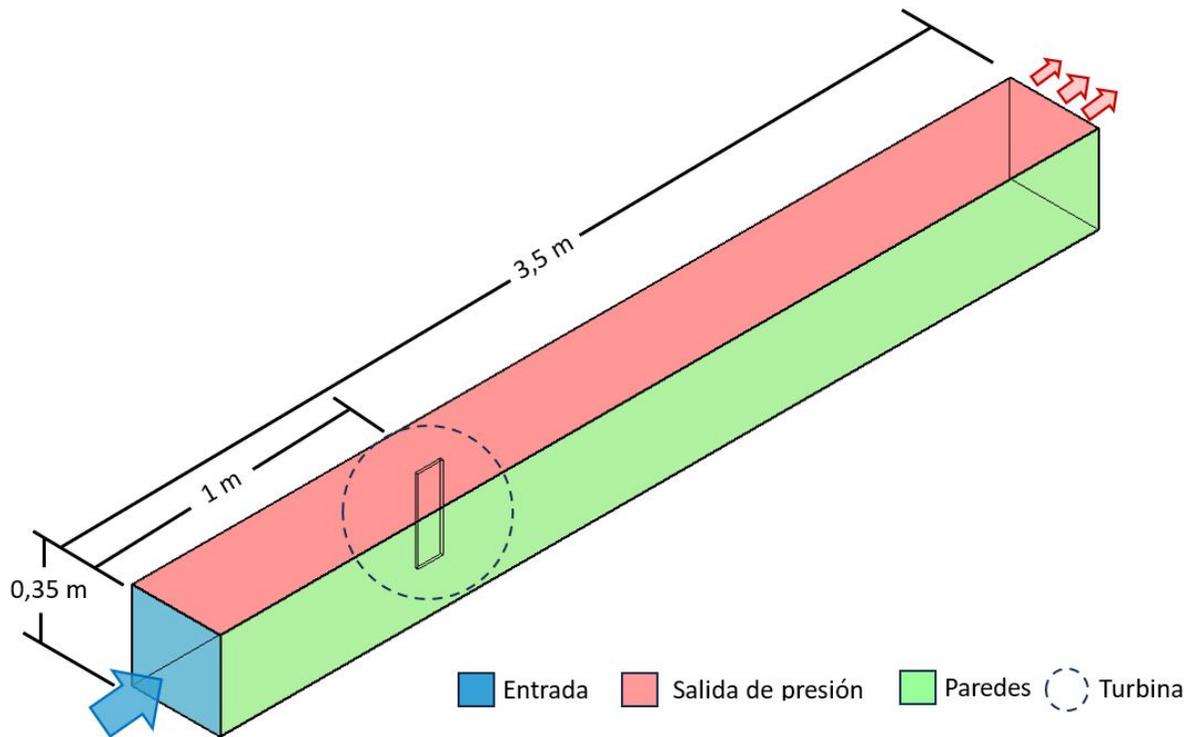


Figura 48: Dominio computacional canal hidráulico.

En la Figura 49 se muestra la vista esquemática en planta de la malla, la cual está compuesta por dos regiones: una malla móvil y una malla estática. La malla móvil permite el reajuste de los elementos de la malla estática a medida que el álabe cambia de posición. Mientras que en la Figura 50 muestra la vista lateral la malla esquemática

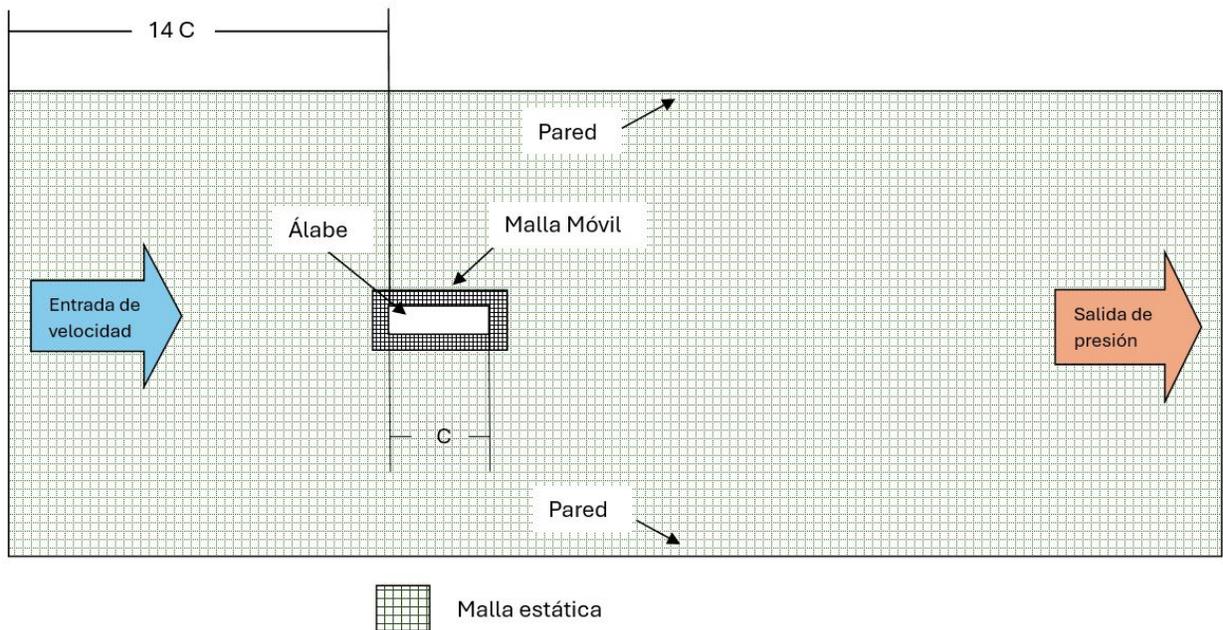


Figura 49: Esquema de la malla computacional, vista de planta.

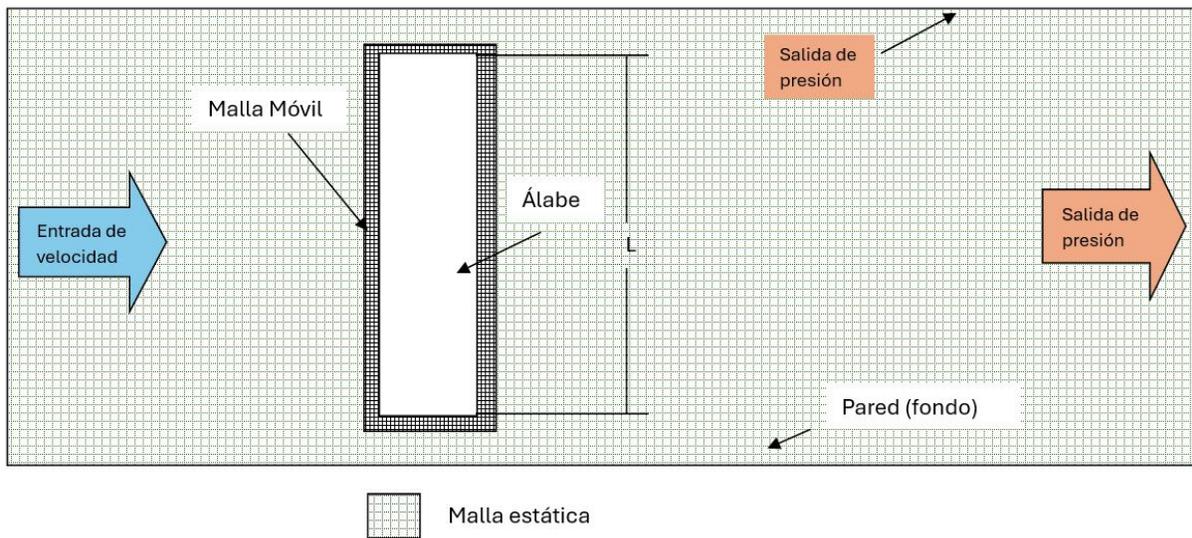


Figura 50: Esquema de la malla computacional, vista de planta.

El parámetro que cobra relevancia en las simulaciones es la fuerza que genera el fluido sobre el álabe de la turbina, esto debido a que los parámetros de rendimiento, como la potencia y el coeficiente de potencia, están vinculados con la fuerza hidrodinámica. Por tanto se genera una configuración de parámetros dentro del solucionador CFD, los cuales se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Parámetros para análisis CFD

Parámetros	Valor
Velocidad de entrada	0,5 m/s
Número de palas	1
Longitud (b)	0,32 m
Cuerda (c)	0,071 m
Relación de intensidad de la turbulencia	0,07
Selección del perfil	Rectangular
Diámetro hidráulico	0,35 m
Algoritmo de cálculo	SIMPLE
Densidad de flujo	997 kg/m ³
Temperatura de flujo	25 °C
Modelo de viscosidad	k- ω SST
Orden de ecuación (momento, energía cinética, tasa de disipación específica)	Primer orden
Condición de Pared	Sin deslizamiento
Discretización del tiempo	0,0025 s

Para validar el modelo de simulación CFD, se implementó la interpolación de Richardson. Inicialmente, se aplicó para mejorar la resolución en el dominio espacial, permitiendo una representación más precisa de las características de comportamiento del fluido. Posteriormente, la interpolación de Richardson se extendió al análisis del paso temporal en las simulaciones CFD. Este enfoque permitió determinar el paso temporal más adecuado para alcanzar una óptima precisión en los resultados, minimizando al mismo tiempo los costos computacionales asociados.

7.1. Independencia de la malla

Se consideró la independencia de mallado como un factor trascendental. Esta independencia determina la eficacia de la herramienta de simulación y la concordancia de los resultados numéricos. Para la resolución de las ecuaciones del sistema se implementó ANSYS particularmente el módulo de Fluent. La exactitud y precisión de estos resultados están directamente relacionadas con el tamaño de los elementos utilizados en la discretización. Se empleó el índice de convergencia del mallado (GCI, por sus siglas en inglés), desarrollado por Roache y basado en el método de extrapolación de Richardson, para cuantificar el error en la simulación. Este método permitió estimar la solución cuando el tamaño de los elementos tendía a cero, así como cuantificar las diferencias entre los resultados numéricos y el valor asintótico calculado. El proceso de estimación del error mediante este método requiere al menos tres mallas sucesivas refinadas de menor a mayor tamaño de elementos (gruesa (3), media (2) y fina (1)), con un factor de refinamiento (r) mínimo de 1,3 [99]. El orden de precisión de la solución (\hat{p}) se determina mediante la Ecuación 20

$$\hat{p} = \left| \ln \left(\frac{\varepsilon_{3,2}}{\varepsilon_{2,1}} \right) \right| / \ln(r) \quad (20)$$

Donde,

$$\varepsilon_{3,2} = f_3 - f_2 \quad (21)$$

f_3 es la fuerza en la malla fina, y f_2 es la fuerza en la malla media.

$$\varepsilon_{3,2} = f_2 - f_1 \quad (22)$$

f_1 es la fuerza en la malla gruesa.

El error relativo entre mallas se determina mediante la Ecuación 23

$$e_{1,2} = \left| \frac{\varepsilon_{2,1}}{f_1} \right| \quad (23)$$

La solución asintótica para un valor de espaciamento Δh tendiendo a cero se define como:

$$\text{fuerza}_{\Delta h \rightarrow 0} \approx \text{fuerza}_{\text{exacta}} \approx f_3 + \frac{\varepsilon_{2,1}}{r^{\hat{p}} - 1} \quad (24)$$

Finalmente, el índice de convergencia entre mallas se calcula según la Ecuación 25:

$$GCI_{1,2} = F_s \left(\frac{e_{1,2}}{r^{\hat{p}} - 1} \right) \quad (25)$$

Donde F_s es un factor de seguridad, que en este trabajo se estableció en 1,25 [99].

Para alcanzar una convergencia adecuada en la simulación computacional, es esencial que el valor de R se aproxime lo más posible a 1 [100], [101]. Por tanto se establece un paso temporal de 0,005 s y se crean 3 conjuntos de mallas como se presenta en la Tabla 6. En esta tabla, se detallan los resultados que muestran la relación entre la variable objetivo y el tamaño normalizado de los elementos con respecto al número total de elementos, cabe resaltar que un mayor número de elementos implica menor tamaño de los elementos. A medida que el tamaño de los elementos disminuye la fuerza generada por la turbina aumenta, esto debido a que el menor tamaño permite a los elementos adaptarse mejor, a medida que el álabe se desplaza por el dominio. Recopilando valores con mayor precisión. En la Tabla 7 se resumen los parámetros de la interpolación de Richardson para la malla computacional. el valor obtenido para GCI es de 1,0142 y el error relativo entre la malla fina y media es menor al 2% por tanto se establece que una malla con características similares en número de elementos y tamaño refleja valores coherentes de fuerza y por tanto de potencia y de rendimiento. Finalmente en la Figura 51 se puede ver representación gráfica de la interpolación de Richardson.

Tabla 6: Parámetros Independencia del mallado.

Malla	Elementos	Fuerza [N]	Error %
Gruesa	490.114	13,09737	
Media	1.145.140	13,90857	5,83
Fina	1.708.755	14,11388	1,45

Tabla 7: Independencia de mallado.

Parámetro	Valor
r	2,00
$\frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1}$	3,9511
p	1,9823
f_{h0}	13,1658
F_s	1,2500
GCI_{23}	0,024704257
GCI_{12}	0,006161551
GCI	1,0148

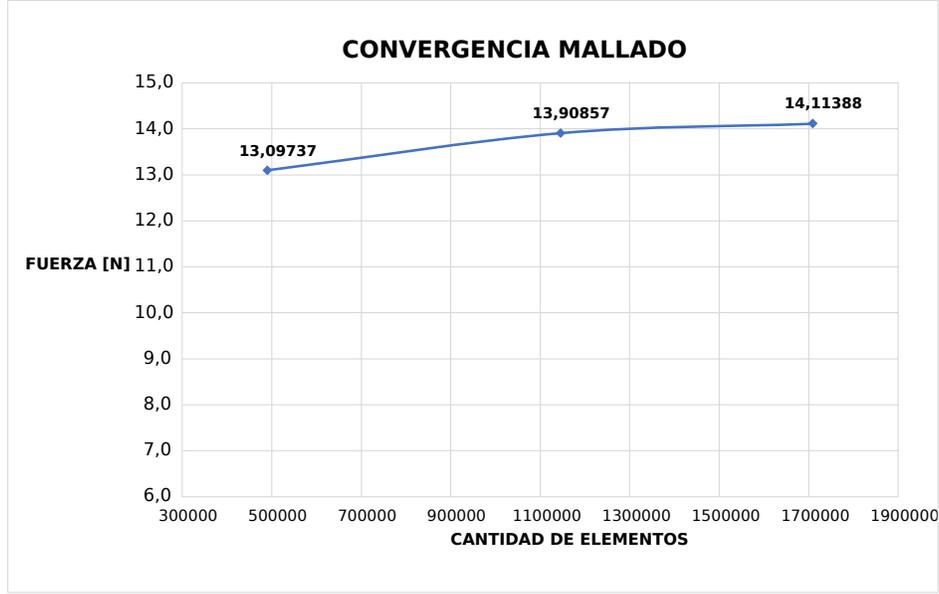


Figura 51: Convergencia de la malla para la simulación CFD.

7.2. Independencia temporal

Se puede caracterizar la independencia temporal utilizando la condición de Courant-Friedrichs-Lewy, que establece restricciones sobre el tamaño del paso temporal en relación con el tamaño del elemento. Estas variables están conectadas entre sí a través de la siguiente Ecuación [26]

$$c_0 = \frac{u_i \Delta t}{\Delta x_i} \quad (26)$$

Donde, u_i es la velocidad del fluido en la dirección i ; Δt es el paso temporal; y Δx_i es el tamaño del elemento en la dirección i . El criterio de estabilidad para la solución de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido requiere que $c_0 \leq 1$. Para el caso extremo en el que el número de Courant es igual a la unidad, la Ecuación [26] se puede reescribir como la Ecuación [27] [102].

$$\Delta t = \frac{\Delta x_i}{u_i} \quad (27)$$

Además de su impacto en la convergencia y estabilidad de la solución del modelo numérico, el tamaño del paso temporal también incide en los resultados numéricos derivados de las simulaciones. Como se mencionó anteriormente, las simulaciones realizadas para el estudio de independencia del mallado espacial se llevaron a cabo con un tamaño de paso temporal de 0,005 s.

Para realizar el análisis de sensibilidad de las simulaciones en función del tamaño del paso temporal, se utilizó como punto de partida la Ecuación [27] donde se asumió que Δx_i era 0,0025 m, representando el tamaño promedio de la celda en el mallado cercano al álabe de la turbina. Para u_i , se utilizó un valor de 0,5 m/s. En consecuencia, el paso temporal mínimo Δt fue de 0,005 s. Concordando con el valor asumido para la independencia temporal. Los resultados obtenidos para el estudio de independencia temporal se presentan de manera resumida en la Tabla [8,9] donde se obtiene un valor de GCI de 1,0199 y un error relativo entre el paso temporal de 1,95 % por tanto el paso temporal que se usara en las simulaciones es de 0,0025 s. Dado que no existe una diferencia significativa con el paso fino de 0,00125. Finalmente en la Figura [52] se presenta gráficamente la interpolación de Richardson temporal.

Tabla 8: Parámetros de independencia temporal

Malla	Δt	Fuerza [N]	Error %
Gruesa	0,005	13,89715	
Media	0,0025	13,90534	0,0588982
Fina	0,00125	14,18167	1,9485011

Tabla 9: Independencia temporal

Parámetro	Valor
r	2,0000
$\frac{(f_3-f_2)}{(f_2-f_1)}$	0,0296
p	-5,0764
f_{h0}	22,5050
F_s	1,2500
GCI_{23}	-0,000758715
GCI_{12}	-0,025100196
GCI	1,0199

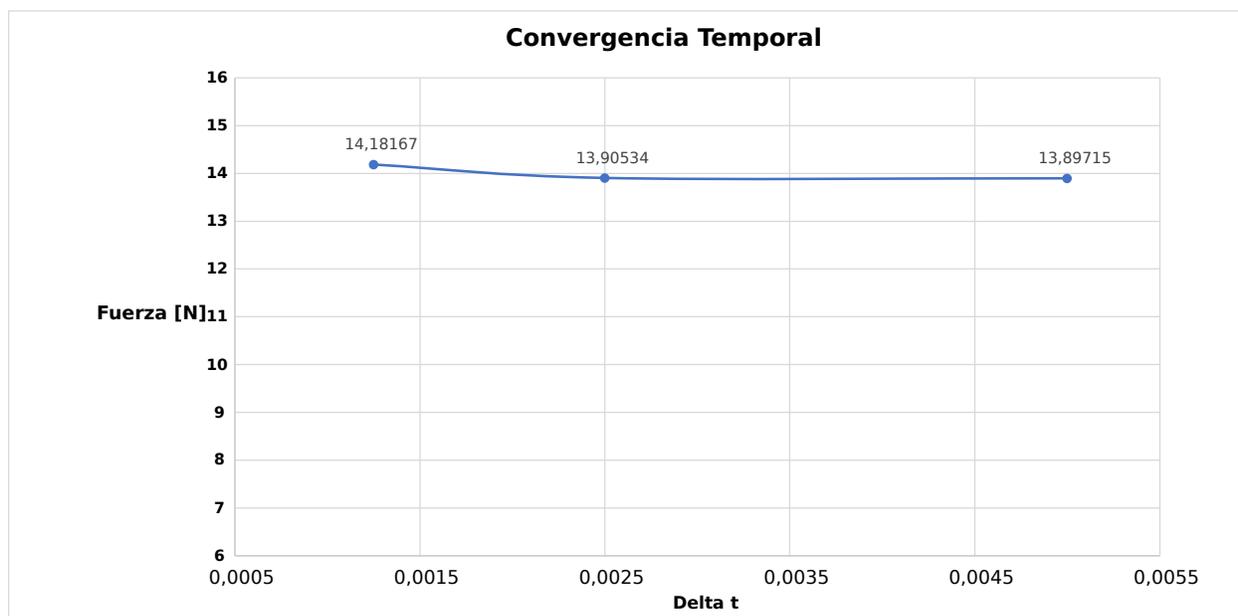


Figura 52: Independencia temporal.

7.3. Resultados y análisis

La fuerza se establece como el parámetro de rendimiento en las turbinas oscilantes, ya que la potencia de las mismas surge de la interacción del flujo con la estructura. En la Figura 53 se observa el desempeño de los modelos A, B, C, D y F, los cuales mantienen una relación de aspecto igual o aproximada de 4,5. En la Figura 53, se puede observar también que el modelo A presenta picos de fuerza alternados de positivo a negativo, sin valles prolongados. Mientras que los otros modelos B, C, D y F presentan crestas compuestas por dos picos. Dichas crestas son, en comparación con el modelo A, más extensas en el periodo de oscilación, lo que podría traducirse como un desplazamiento más suave dentro del fluido, ya que la fuerza se aplica durante un mayor periodo de tiempo. Por otro lado, los modelos B, C, D y F también presentan valles con valores

de fuerza próximos a cero, lo que sugiere que las interacciones del fluido con el álabe producen periodos de equilibrio donde las fuerzas se contrarrestan.

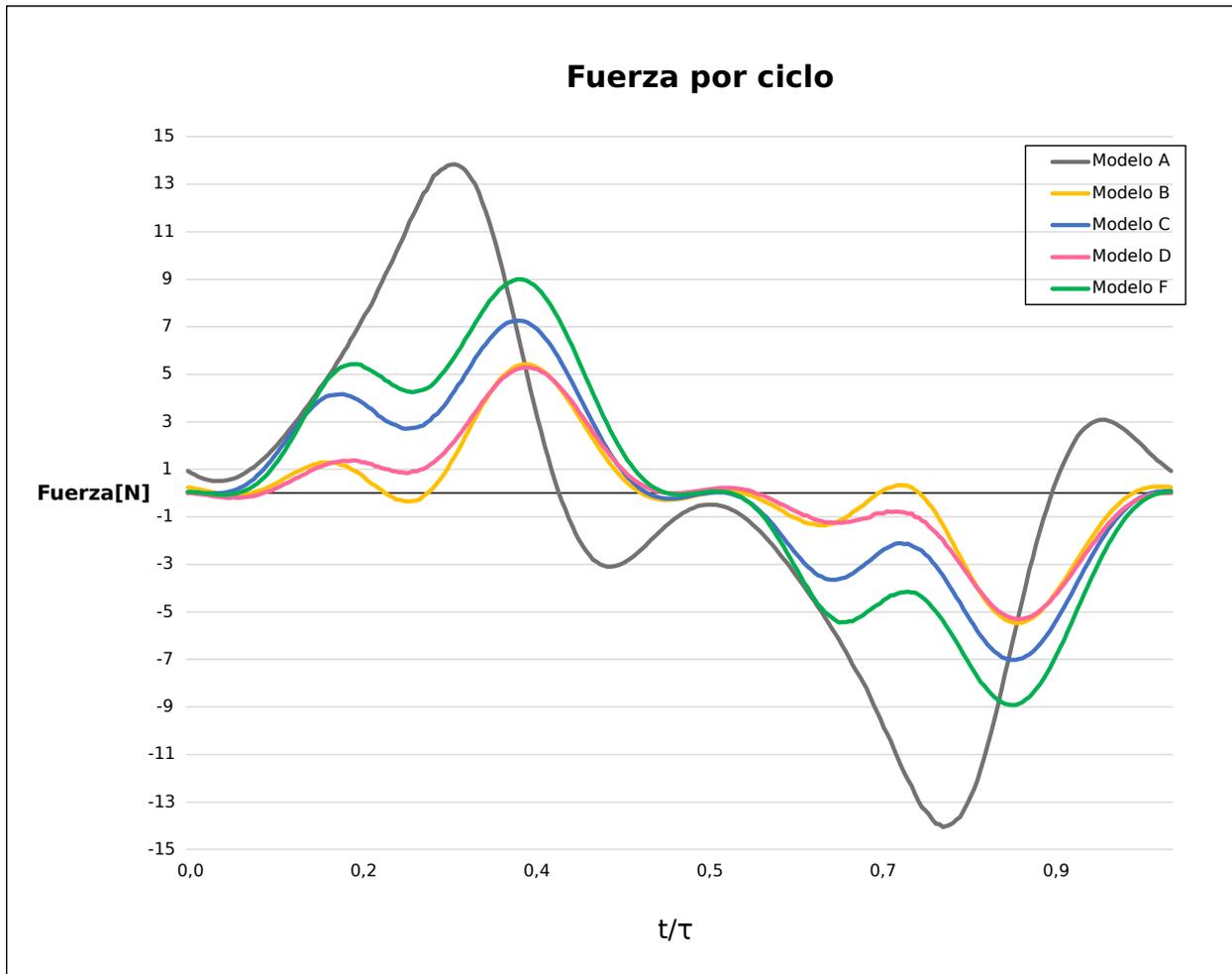


Figura 53: Fuerza por ciclo de los modelos A,B,C,D,F.

En la Figura 54, se presenta el ciclo de fuerza para los modelos A, E y F, los cuales conservan la misma área, aunque no comparten la misma relación de aspecto. Para el modelo A, la relación de aspecto es de 4,5 para el modelo E, es de 1,618 y para el modelo F, es de 4,2. En la Figura 54 se observa que el modelo E y el F se comportan de manera similar en cuanto a los picos de fuerza. Sin embargo, el modelo E presenta valles con una magnitud de fuerza más alta que el modelo F, el cual muestra los valles sobre el eje. Esto indica una cancelación de fuerzas y un periodo de equilibrio.

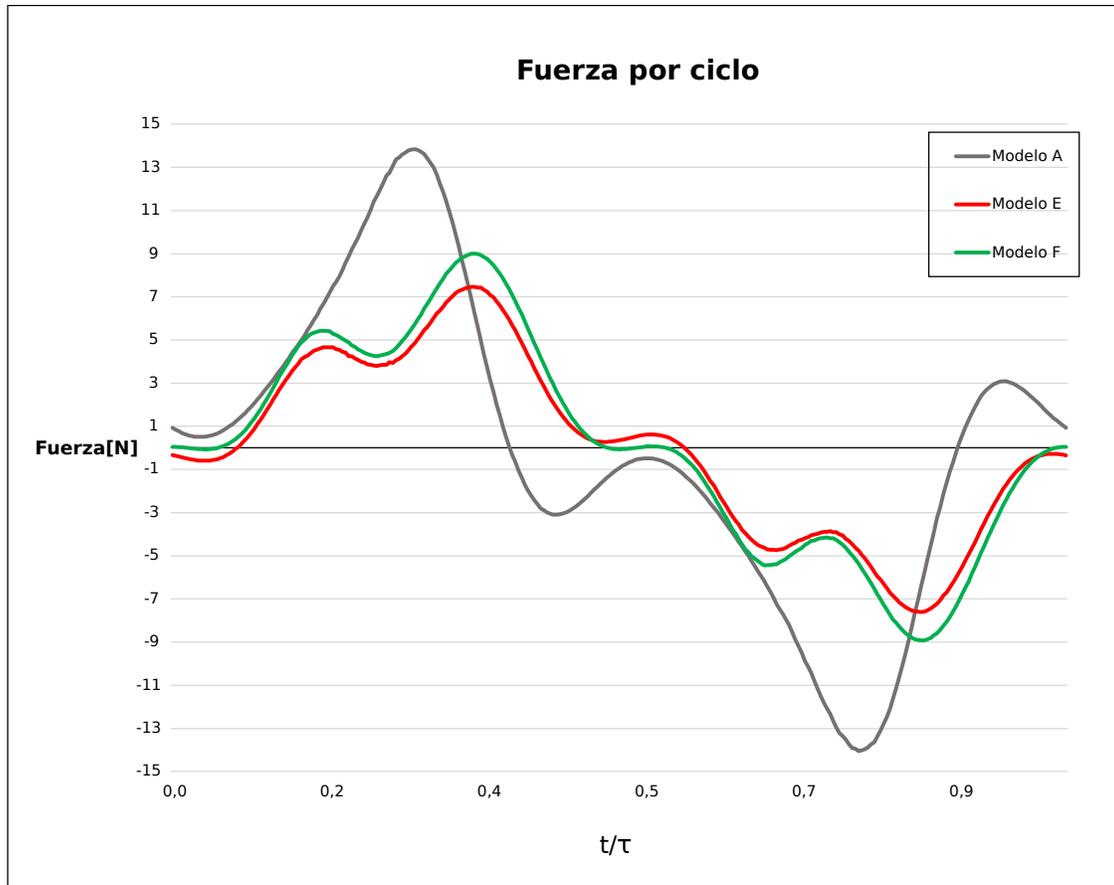


Figura 54: Fuerza por ciclo de los modelos A,E,F.

En la Tabla 10 se presentan los resultados de la evaluación de los parámetros de rendimiento para todos los modelos, además de las respectivas áreas. Se puede observar que la disminución del área genera una pérdida en la potencia de la turbina.

Tabla 10: Resultados de la eficiencia para todos los modelo

	Modelo A	Modelo B	Modelo C	Modelo D	Modelo E	Modelo F
Potencia [W] por ciclo	1,4016	0,9727	0,8150	0,5826	1,0336	1,2138
Eficiencia	50 %	34 %	29 %	21 %	58 %	43 %
Área [m ²]	0,0224	0,0211	0,0213	0,0181	0,0224	0,0224
Disminución de área	0 %	6 %	5 %	19 %	0 %	0 %
Disminución de la potencia	0 %	31 %	42 %	58 %	-18 %	13 %

El modelo (A) exhibe la mayor potencia por ciclo, seguido por el Modelo (E) y el modelo (F). Por otro lado, el modelo (D) muestra la potencia más baja por ciclo. En términos de eficiencia, tanto el "Modelo A como el modelo (E) son los más eficientes, alcanzando un 50 % y 58 %, respectivamente. Contrastando con estos, el modelo (D) exhibe la eficiencia más baja, registrando un 21 %. La disminución en el área refleja una pérdida de rendimiento en las turbinas. Esto se destaca al comparar los Modelos C y F, que comparten una similitud significativa. El modelo (D), con una disminución de área del 19 %, presenta una pérdida en la eficiencia del 42 % en comparación con el modelo (A). Además, los modelos con áreas idénticas también muestran diferencias en el rendimiento, indicando claramente que la forma de las palas tiene un impacto crucial en el desempeño, siendo mas positivo la incorporación de bordes de ataque, que de fuga.

8. Experimentación

Para la experimentación, se aplicarán el enfoque semi-pasivo y completamente pasivo, los cuales están determinados por las Ecuaciones [18](#),[19](#). Además, se fabricaron seis álabes correspondientes a los modelos probados en las simulaciones. En cuanto a la experimentación, el movimiento tipo dos, denominado semi-pasivo, se produce al generar cambios en el ángulo de cabeceo, agregando momento a la turbina. Por otro lado, el movimiento tipo 3 se describe como aquel generado gracias a las interacciones del fluido con el ala de la turbina sin ninguna interferencia externa. Este tipo de movimiento está determinado por la interacción del fluido con las turbinas. Dicho tipo de movimiento está sujeto al flujo de agua, que generalmente suele ser turbulento, lo que genera que el sistema sea errático.

El sistema está compuesto por dos guías metálicas que sostienen un carro con rodamientos lineales. Conectado al canal por medio de dos resortes lineales a cada lado, conectados a su vez con la estructura del canal, como se muestra en las Figuras [55](#), [57](#). En la misma imagen se aprecian los resortes son importantes ya que cumplen la función de convertir un sistema rígido en uno elástico, con la capacidad de absorber energía.

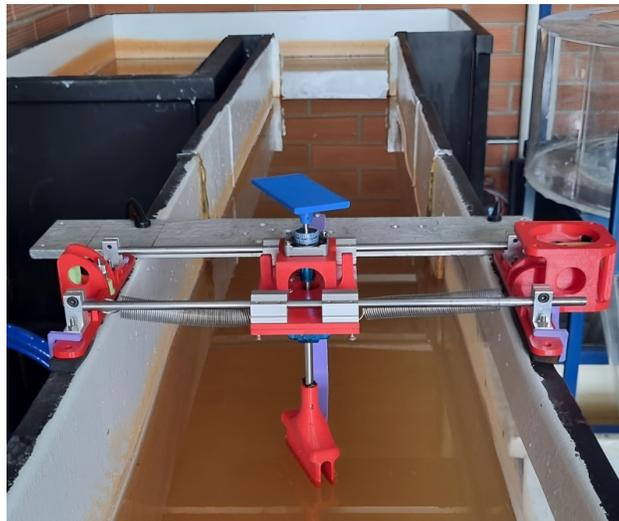


Figura 55: Montaje experimental.

Los álabes fueron fabricados mediante una cortadora láser, utilizando acrílico de 10 mm de espesor. En la Figura [56](#), se aprecian los modelos cortados y preparados, los cuales presentan áreas en la parte superior diseñadas para su sujeción al carro y, a su vez, a las guías lineales.

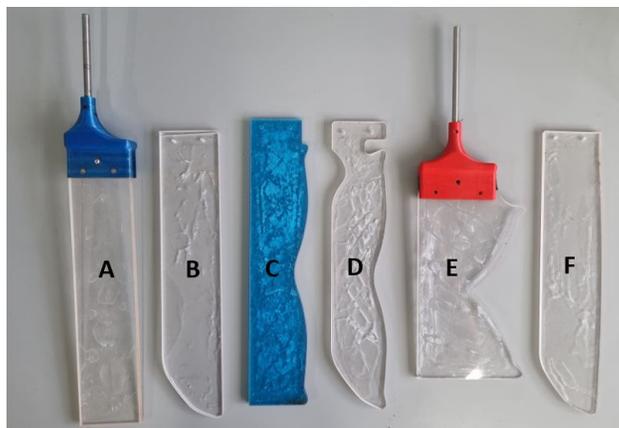


Figura 56: Perfil de los álabes

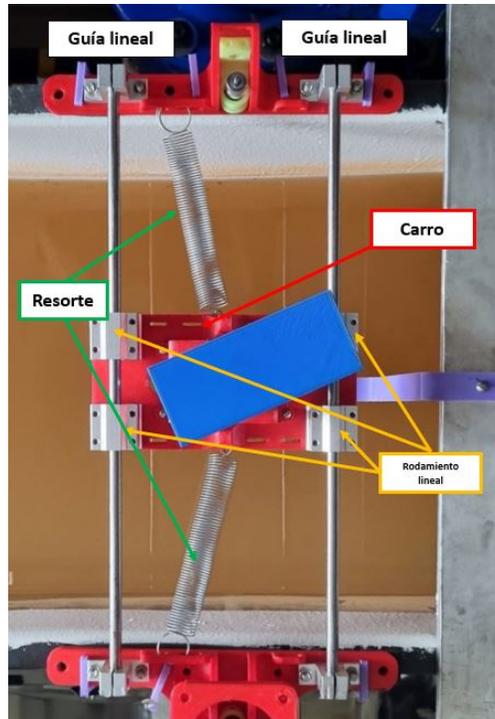


Figura 57: Vista de planta del montaje experimental

8.1. Sistema de medición

Se implementan un sistema de medición no invasivo, visión artificial que utiliza el análisis de flujo óptico y técnicas de binarización de imágenes para el rastreo de objetos a partir de su color. Además, se incorporó un sistema de medición sobre el carro, el cual consiste de un acelerómetro conectado a un microcontrolador para determinar en ambos casos la fuerza sobre los álabes y seguir su trayectoria.

8.2. Medición con visión artificial

El sistema de visión artificial está compuesto, como se observa en la Figura 58, por una cámara con su respectivo trípode, una computadora que procesa en tiempo real los movimientos del carro que une los álabes a las guías y un pequeño marcador. Este marcador, un rectángulo de color azul, se utiliza por su forma y color para determinar la posición angular y de elevación del sistema.

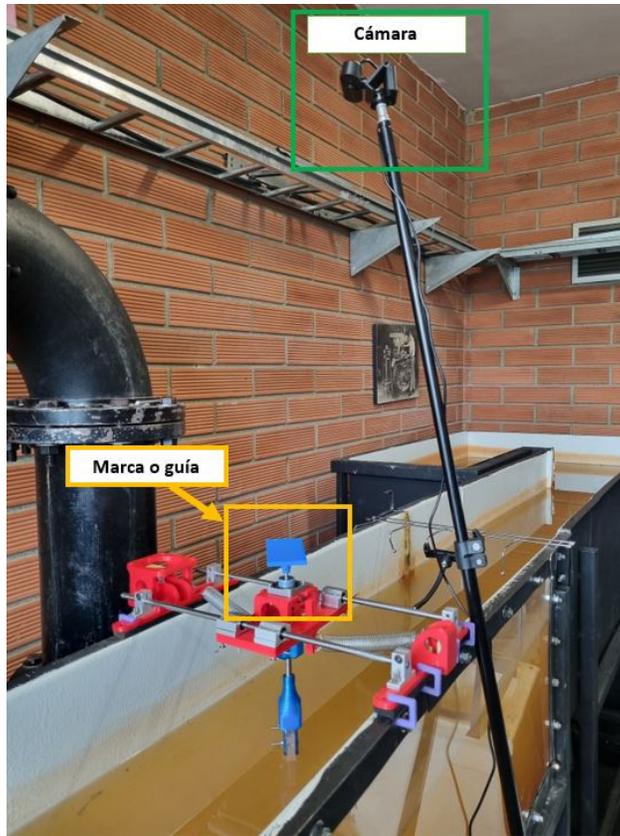


Figura 58: Sistema de visión artificial.

La calibración se realiza mediante un factor de escala, el cual se calcula mediante el cociente entre el área binarizada del marcador y su área real ($5750,98 \text{ mm}^2$). El factor de escala establece también una relación con los píxeles de la imagen; por lo tanto, se pueden determinar las distancias recorridas por el marcador. Además, su forma también nos permite rastrear el ángulo de rotación. En la Figura 59 se muestra una captura del proceso de seguimiento y binarización al momento de la calibración del sistema.

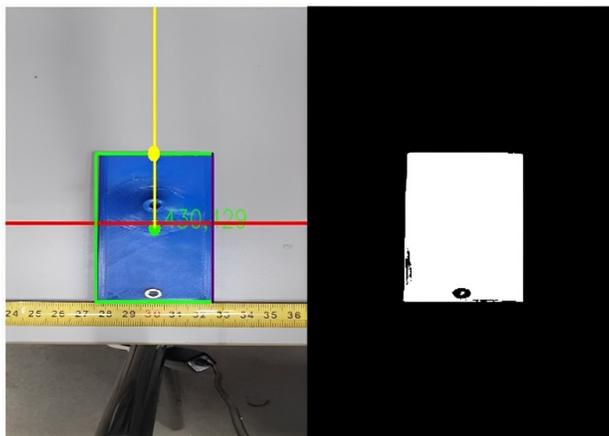


Figura 59: Mascara de seguimiento y de binarización del color azul.

El error relativo entre los valores de área binarizada y área real es del 1%.

8.3. Medición con sensores

El sistema con acelerómetros también se acopla al carro de la turbina, pero se conecta mediante cables a un microprocesador que calcula de igual manera los movimientos de elevación y traslación. la Figura 60 para más detalles.

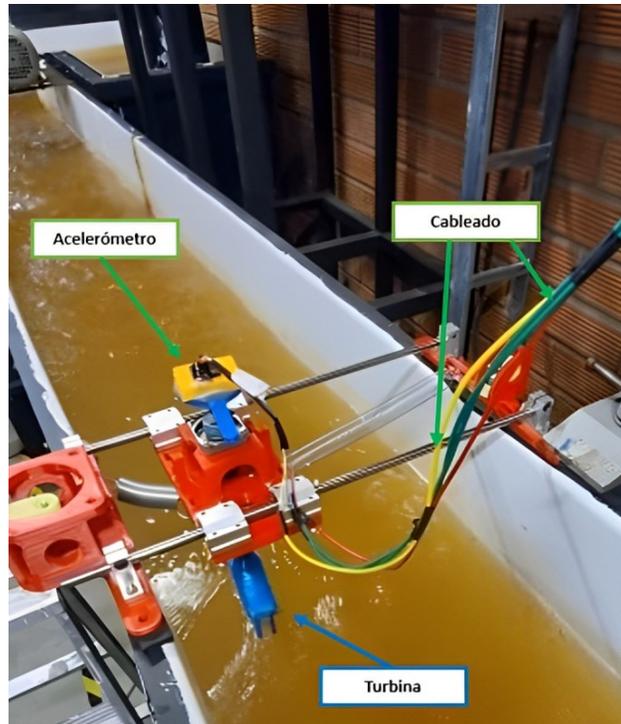


Figura 60: Mecanismo y turbina con sistema de medición con acelerómetro.

Para determinar la fuerza generada por cada álabe, se debe conocer la masa de los mismos y también la de todo el sistema. En la Tabla 11 se muestra la masa de los álabes y de los componentes del sistema que se mueven con el carro.

Tabla 11: Pesos de componentes del sistema.

Componente	Masa [g]
Modelos A	385,78
Modelos B	261,76
Modelos C	257,04
Modelos D	231,52
Modelos E	294,79
Modelos F	280,8
Carro	455,15
Sensores y cableado	177
Marcador (visión artificial)	13,63

En la Tabla 12 se evidencia la reducción de masa con respecto al Modelo A, que resulta ser el más pesado y por tanto el punto de comparación para los otros modelos.

Tabla 12: Peso del sistema según sistema de medición

Modelo	Masa sistema con sensores [g]	Masa sistema con visión artificial [g]	Disminución de masa respecto al modelo A [g]
Modelos A	1.058,43	854,56	0 %
Modelos B	1.019,68	815,81	4 %
Modelos C	1.014,96	811,09	5 %
Modelos D	989,44	785,57	8 %
Modelos E	1.052,71	848,84	1 %
Modelos F	1.038,72	834,85	2 %

Se ha creado un tope central que genera un cambio en el ángulo de ataque, provocando así una alteración en la interacción con el fluido. Ver Figura 61. Aunque no constituye un control activo sobre la turbina, sí aporta un momento adicional al sistema, clasificándose como un tipo 2 de movimiento (semi-activo). A las pruebas realizadas con el tope se les denominarán como modelos A, B, C, D, E y F, mientras que para las pruebas en la corriente libre se utilizará el término 'modelo libre' para referirse a la interacción no restringida del flujo con la turbina.

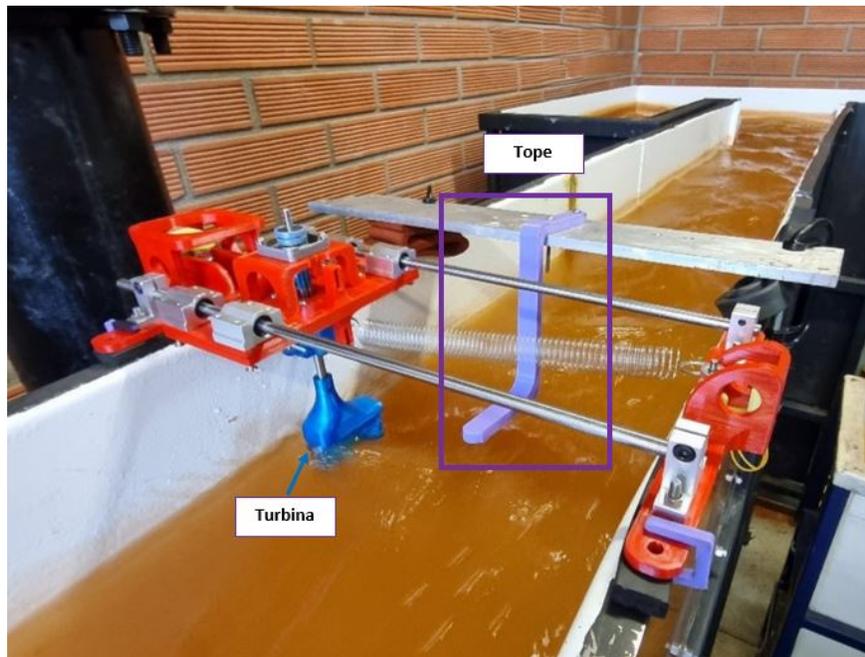


Figura 61: Montaje con tope para movimiento semi activo.

8.4. Resultados y Análisis

A continuación, se detallan las fuerzas generadas por los modelos y captadas por el sistema de visión artificial. Los resultados se han aislado a uno o dos periodos de oscilación, con el objetivo de destacar las diferencias entre tener un tope (movimiento tipo 2) y estar sujeto a la corriente libre, movimiento tipo 3. Además, la ventana de tiempo se adapta a cada modelo para lograr extraer un periodo de oscilación, que dependiendo del tipo de movimiento dicha ventana puede ser más corta o larga. En la Figura 62 se presentan los resultados del modelo base, denominado modelo A. La Figura 62 muestra una ventana de tiempo compuesta por 2 periodos para el modelo A y uno para el modelo A libre. Esto permite apreciar que la inclusión del tope reduce aproximadamente a la mitad el periodo de oscilación, aunque con una ligera pérdida en la magnitud de la fuerza.

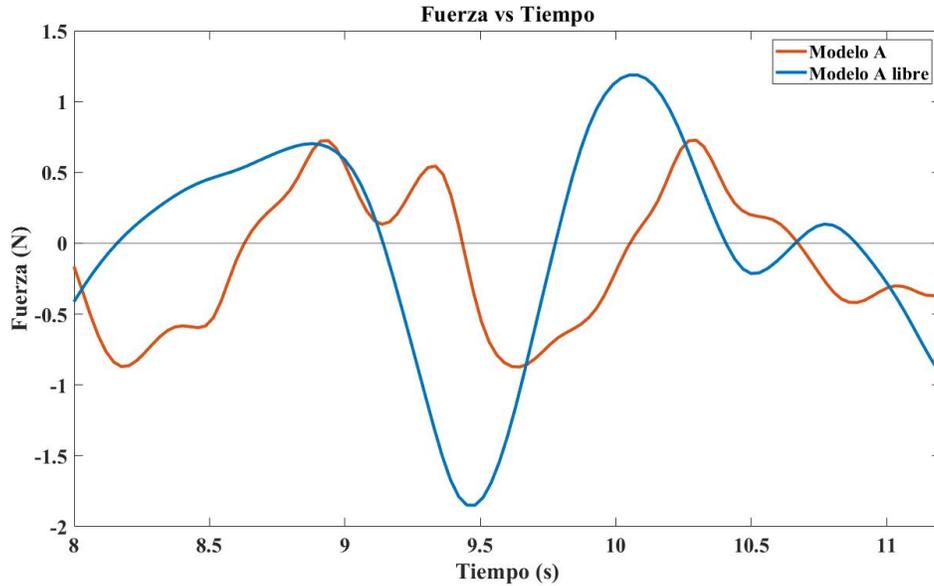


Figura 62: Modelo A vs modelo A libre.

La Figura 63 presenta el modelo B, exhibiendo una ventana de tiempo correspondiente a un periodo tanto para la prueba con tope como para la corriente libre. No obstante, se observa que el modelo B muestra una distribución de fuerza con picos de magnitud inferior en comparación con las pruebas del modelo B en condiciones de corriente libre, el modelo B libre presenta picos en la fuerza, más altos pero también más cortos en el tiempo, esto se debe a la ausencia del tope, dado que este se comporta como un controlador del ángulo de cabeceo, lo que permite vencer la inercia del cambio de dirección más fácilmente, esto se traduce en curvas más suaves, mientras que sin el tope el modelo debe ganar más fuerza para vencer la inercia de su movimiento, generando los picos que se observan en la Figura 63. Ambas pruebas exhiben un comportamiento similar en la distribución temporal de la fuerza, teniendo un periodo muy similar.

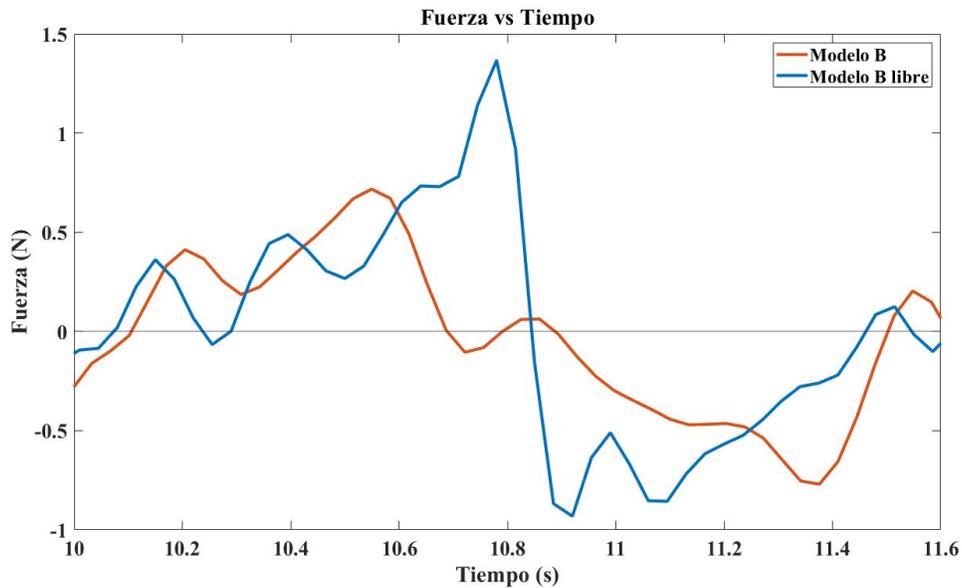


Figura 63: Modelo B vs modelo B libre.

En contraste, el modelo C presenta extensos periodos de estabilidad o quietud, cuando se enfrenta a la corriente libre sin tope. En cambio, en las pruebas con el tope, se generan picos de fuerza de gran intensidad y prolongados en el tiempo. Este comportamiento se ilustra en la Figura 64, esto se debe al cambio en el ángulo de cabeceo que genera el tope, el cual agrega una perturbación, que le permite al modelo C, almacenar energía en los muelles, dicha perturbación se genera de forma recurrente al paso del álabe por el tope, evitando que el modelo se estabilice.

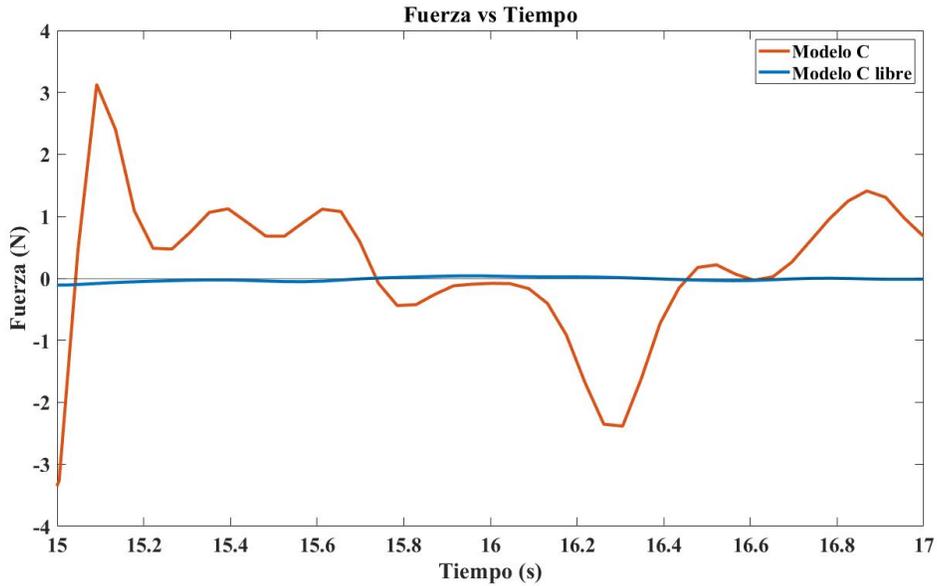


Figura 64: Modelo C vs modelo C libre.

El modelo D exhibe un comportamiento similar al modelo anterior, pero con una estabilidad más destacada y picos de fuerza más suaves. En contraste, las pruebas en flujo libre muestran una estabilidad frente al paso de la corriente. Este patrón se visualiza en la Figura 65. Que muestra que el modelo D libre no genera fuerza.

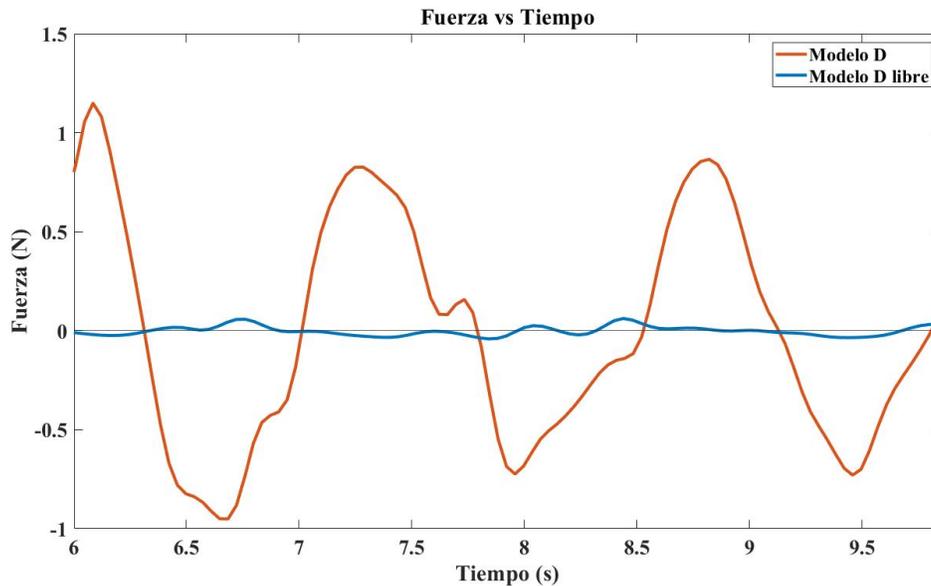


Figura 65: Modelo D vs modelo D libre.

Los modelos E, tanto con tope como en condiciones de flujo libre, presentan un comportamiento errático, a menudo mostrando estabilidad y generando picos aleatorios de fuerza. En este modelo, no se pudo apreciar un movimiento periódico, lo que resulta en una generación de potencia nula.

El modelo F en condiciones de flujo libre no exhibe un movimiento oscilante; tiende con frecuencia a la estabilidad. En cambio, el modelo F con tope genera picos de fuerza. Este comportamiento se ilustra en la Figura 66

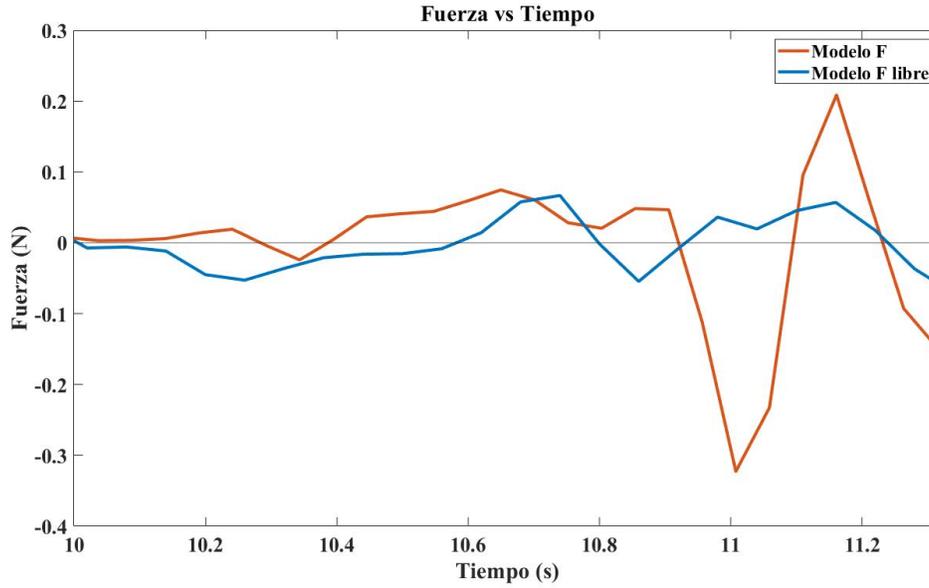


Figura 66: Modelo F vs modelo F libre.

Con los datos obtenidos, se calculan los parámetros de rendimiento para ambos tipos de movimiento, semiactivo y pasivo. Los resultados se resumen en las Tablas 13 para el movimiento semiactivo y en la Tabla 14 para el flujo libre.

Tabla 13: Potencia por ciclo para cada modelo movimiento tipo 2.

Modelo	Potencia [W] por ciclo	Eficiencia (%)
Modelo A	1,843579189	24,2 %
Modelo B	1,65685	21,7 %
Modelo C	1,967946	25,8 %
Modelo D	1,924331046	25,2 %
Modelo E	0	0,0 %
Modelo F	2,372160887	31,1 %

Tabla 14: Potencia por ciclo para cada modelo en condiciones de flujo libre, movimiento tipo 3.

Modelo	Potencia [W] por ciclo	Eficiencia (%)
Modelo A Libre	1,545039112	20,2 %
Modelo B Libre	1,438534574	18,8 %
Modelo C Libre	0,016534731	0,2 %
Modelo D Libre	0,060160001	0,8 %
Modelo E Libre	0	0 %
Modelo F Libre	0	0 %

Los datos obtenidos revelan un rendimiento superior en las turbinas semiactivas en comparación con las turbinas pasivas. Destaca el modelo F, que muestra un rendimiento mejorado, pasando del 0 % en flujo libre al 31 % en la configuración con tope. Esto se debe a que sin las perturbaciones que genera el tope, los perfiles C, D y F tienden a estabilizarse en flujo libre o a moverse de forma caótica.

Los perfiles con borde de fuga, como el modelo B y D muestran una disminución de rendimiento en la corriente libre en comparación con el modelo A (ver la Tabla 14). Sin embargo, los modelos C y D superan al modelo A cuando se introduce el tope con movimiento semiactivo ver la Tabla 13, esto se puede explicar gracias a la interacción de la forma del álabes con el flujo, como se apreció en las Figuras 65, 63. Los perfiles bioinspirados transitan el flujo con picos de fuerza más suaves.

El modelo F y C por otro lado muestran un comportamiento similar, presentando un mejor desempeño en el movimiento tipo 2 y nulo en el flujo libre, pero la diferencia en el área se ve reflejada también en la eficiencia, mostrando que el modelo F con un área mayor, pero con forma similar genera una mayor eficiencia.

El modelo E, presenta el peor comportamiento frente a la corriente generando un desempeño nulo en ambos montajes, esto a pesar de destacar en las simulaciones. esto implica que la trayectoria que se impuso en el perfil desempeña un papel fundamental en su desempeño.

Las mediciones con acelerómetro y giroscopio se realizaron de igual forma para el movimiento pasivo y semi activo. Pero dichos sensores se montaron sobre el carro que sostiene la turbina, como se muestra en la Figura 60. Estos sensores añaden masa al sistema cambiando ligeramente su comportamiento. En la Figura 67 se muestra un Ciclo de ambos tipos de movimiento, con y sin el tope. La Figura 67 presenta una cambio frente a las prueba con visión artificial, los ciclos de ambos modelos se ven igualados en el ancho de las crestas de fuerza, además el periodo de ambas ondas es similar. Pero la magnitud de los picos de fuerza en el modelo con tope (modelo A) sigue siendo mayor.

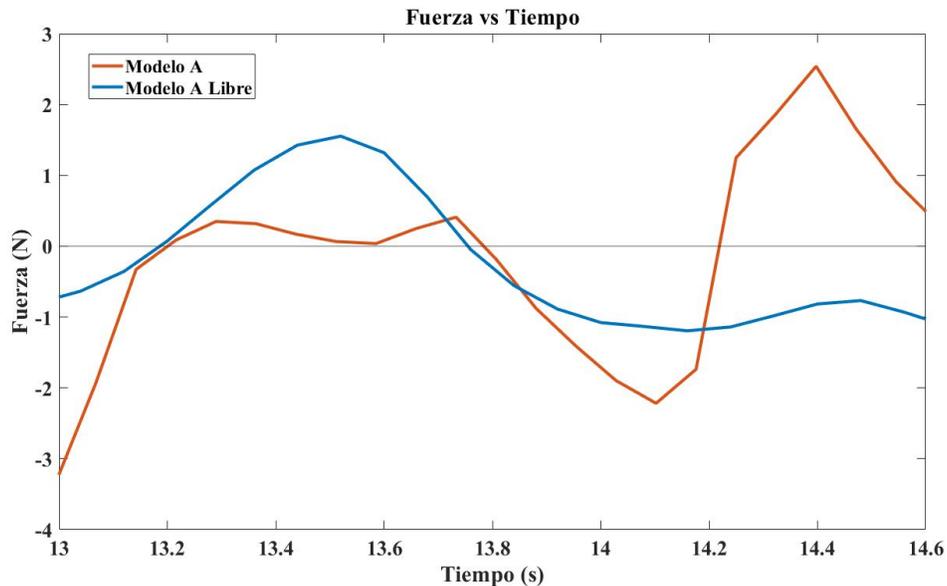


Figura 67: Modelo A vs modelo A libre con acelerómetro.

En la Figura 68 se presenta una ventana de tiempo que abarca aproximadamente un ciclo para la turbina modelo B, considerando tanto la configuración con tope como la libre. Se observa que ambos modelos exhiben periodos similares, aunque el modelo con tope muestra un rendimiento superior, evidenciado por magnitudes de fuerza superiores.

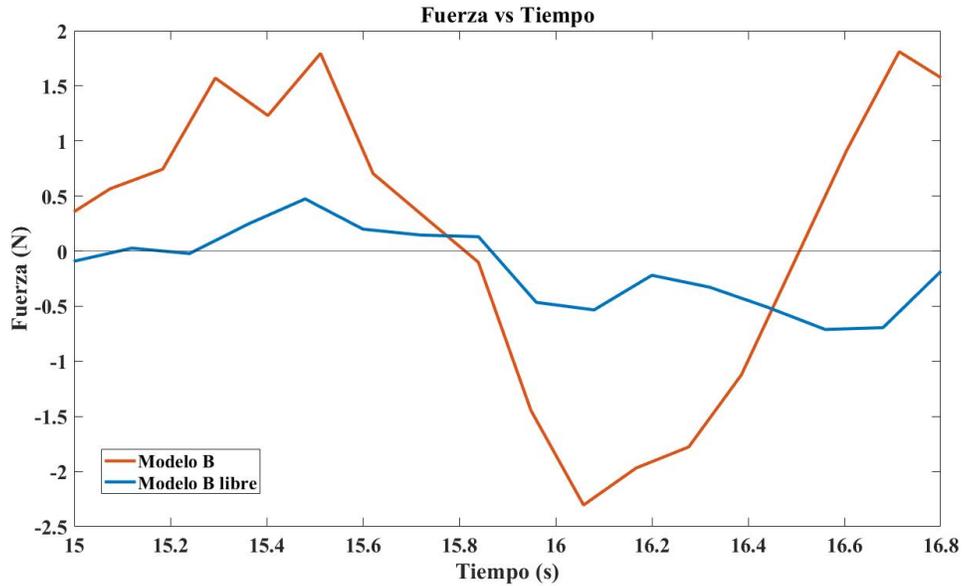


Figura 68: Modelo B vs modelo B libre con acelerómetro.

La Figura 69 presenta el rendimiento de la turbina del modelo C en condiciones tanto libres como con tope. Esta turbina exhibe un rendimiento notable, especialmente cuando se utiliza el tope que induce el cambio de ángulo de ataque. En la Figura 69, se logra captar un periodo de oscilación de la turbina modelo C en su estado libre, sin embargo, su comportamiento resulta errático y tiende a prolongados periodos de estabilidad o quietud. Durante el periodo registrado, se aprecia que la magnitud de la fuerza es menor en comparación con el modelo C con tope, reafirmando la noción de que los modelos con movimiento semiactivo poseen un rendimiento superior.

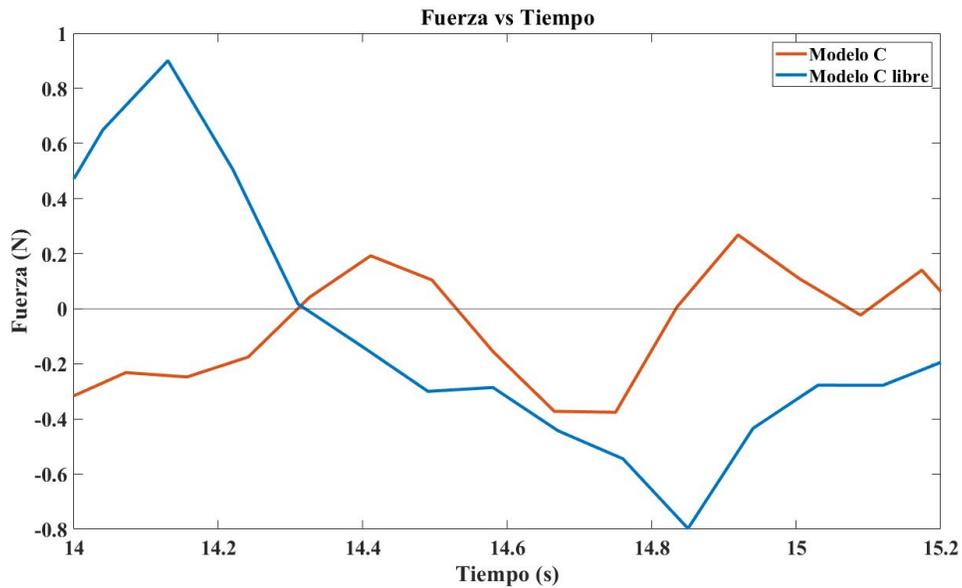


Figura 69: Modelo C vs modelo C libre con acelerómetro.

Respecto al modelo D, se observa una tendencia similar a la encontrada en las pruebas con el sistema de visión artificial. En corriente libre, el modelo tiende a estabilizarse, generando valores de fuerza muy bajos

o incluso nulos. Por otro lado, en el caso del movimiento semiactivo, el modelo exhibe un comportamiento más favorable, con ondas claramente identificables y magnitudes de fuerza más significativas. Ver Figura 70

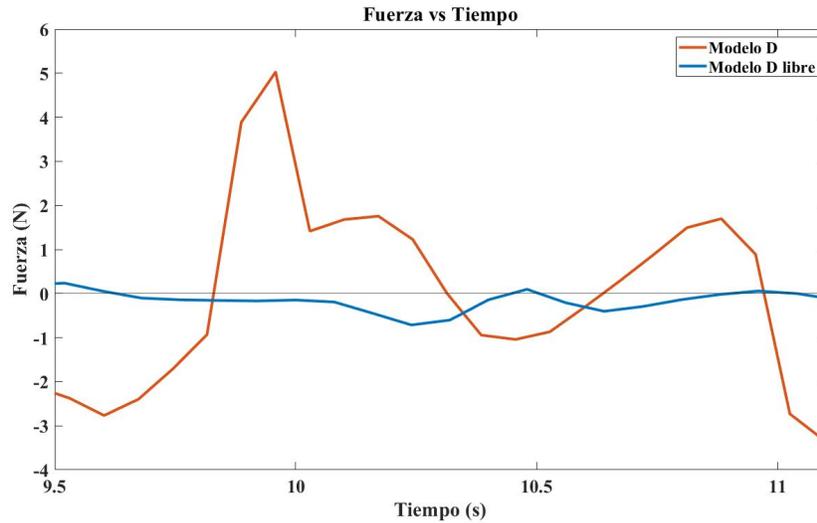


Figura 70: Modelo D vs modelo D libre con acelerómetro.

La Figura 71 exhibe el comportamiento del modelo F, el cual sigue una dinámica similar al modelo D. Solo mediante la incorporación del tope se logran las perturbaciones necesarias para sacar al modelo de su zona de equilibrio, dando lugar a la generación de picos de fuerza que son fundamentales para la producción de potencia en este modelo.

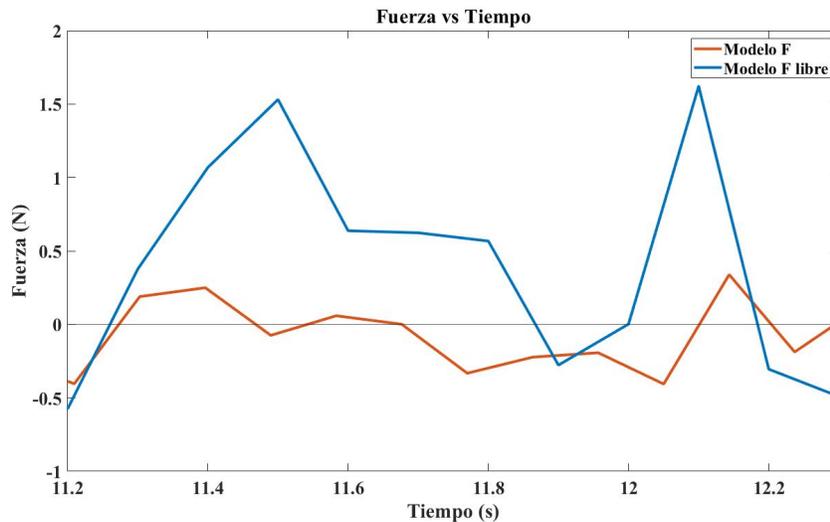


Figura 71: Modelo F vs modelo F libre con acelerómetro.

El modelo E, a pesar del aumento de masa con el sistema de medición, exhibe el mismo comportamiento errático, generando fuerza nula. Cuando interactúa con la corriente, el modelo permanece estático o se desplaza hacia uno de los extremos, donde entra en un estado de estancamiento.

La Tabla 15 recoge los valores obtenidos para ambos métodos de medición, tanto para visión artificial como para el uso de acelerómetros. Podemos observar que se conserva gran similitud entre los datos obtenidos

usando la visión artificial y el uso de acelerómetros. Las diferencias en los métodos de medición se pueden atribuir en gran parte al tratamiento de datos o a ligeras variaciones al momento de las mediciones. De forma general, los modelos muestran un desempeño similar, destacando que la pérdida de área de algunos modelos frente al modelo base no parece ser un impedimento para alcanzar potencias por ciclo similares. Además, el modelo F supera al modelo base en ambos casos demostrando que áreas iguales no necesariamente se traducen en potencias equivalentes.

La Tabla 16 muestra el desempeño de los modelos frente a la corriente libre. Se observa que solo los modelos A y B pueden generar ciclos de potencia, mientras que los modelos C, D, E y F generan rendimientos bajos o directamente nulos. Esto indica que los perfiles con bordes de ataque tienden a permanecer en equilibrio bajo las condiciones de experimentación. Mientras que los modelos con borde de ataque recto, presenta un mejor rendimiento en dichas condiciones.

Tabla 15: Potencia por ciclo y eficiencia para cada modelo con movimiento tipo 2 semiactivo.

Modelo	Medido con Visión Artificial		Mediciones con Acelerómetro	
	Potencia por Ciclo [W]	Eficiencia (%)	Potencia por Ciclo [W]	Eficiencia (%)
Modelo A	1,8436	24,2	1,8717	24,5
Modelo B	1,6569	21,7	1,5632	20,5
Modelo C	1,9679	25,8	2,1639	28,3
Modelo D	1,9243	25,2	2,1307	27,9
Modelo E	0	0,0	0	0,0
Modelo F	2,3722	31,1	2,0367	26,7

Tabla 16: Potencia por ciclo y eficiencia para cada modelo en condiciones de movimiento tipo 3 pasivo.

Modelo	Medido con Visión Artificial		Mediciones con Acelerómetro	
	Potencia por Ciclo [W]	Eficiencia (%)	Potencia por Ciclo [W]	Eficiencia (%)
Modelo A	1,5450	20,2	1,5852	20,8
Modelo B	1,4385	18,8	1,5692	20,6
Modelo C	0,0165	0,2	0,2438	3,2
Modelo D	0,0602	0,8	0,0202	0,3
Modelo E	0	0,0	0	0,0
Modelo F	0	0,0	0	0,0

Cabe resaltar que las variaciones en el modelo de movimiento tipo 3, en el cual el modelo se deja sin ningún control, esta sujeto a muchas mas variables que perturben los movimiento de los modelos, agregando error a las mediciones.

Conclusiones

Se desarrollaron seis geometrías de álabes oscilantes para turbinas flapping foil, cinco de ellas basadas en el "bocachico" o *Prochilodus magdalena*, para las cuales se adaptaron dos características principales a un modelo de álabe recto, que se utilizó como punto de comparación. El borde de fuga y el borde de ataque se tomaron como parámetros de interés para acoplarse en las turbinas, determinando que los perfiles con borde de ataque, en condiciones de flujo libre sin control (movimiento pasivo), generaban bajo o nulo rendimiento en la recolección de energía. Mientras tanto, el borde de fuga permitió un tránsito más suave dentro de la corriente y la capacidad de operar en condiciones de flujo libre, generando sus propias trayectorias por la interacción con el flujo.

Se destaca el comportamiento del modelo base denominado modelo (A), que presenta un rendimiento entre el 20 % y el 26 % para los diferentes tipos de movimiento (semiactivo y pasivo). Esto establece que geometrías sencillas pueden ser de gran utilidad para la generación de electricidad mediante turbinas hidrocínéticas.

En el análisis CFD, se planteó el tipo de movimiento activo, donde los movimientos del álabe son impuestos. Los resultados indican que el modelo más eficiente es el de álabe recto, seguido de los modelos F y E, que comparten la misma área pero no la misma forma. Esto destaca la importancia de este parámetro en el rendimiento de las turbinas flapping foil.

La experimentación se llevó a cabo en un canal hidrocínético a una velocidad de 0,5 m/s, poniendo a prueba los seis modelos. Se concluye que el modelo F presenta la mayor eficiencia en condiciones de movimiento tipo 2, pero la turbina base es la más versátil.

Se concluye finalmente que la forma de los bordes de ataque y de fuga son parámetros que influyen en el rendimiento de las turbinas. Además, se destaca que un enfoque bioinspirado puede ayudar a determinar los parámetros más relevantes para su optimización.

Referencias

- [1] IEA, “Power systems in transition: Challenges and opportunities ahead for electricity security,” 2020.
- [2] U. N. D. of Economic and P. D. Social Affairs, “World population prospects 2022: Summary of results,” 2022.
- [3] D. Gielen, R. Gorini, R. Leme, G. Prakash, N. Wagner, L. Janeiro, S. Collins, M. Kadir, E. Asmelash, R. Ferroukhi *et al.*, “World energy transitions outlook: 1.5° c pathway,” 2021.
- [4] UNFCCC, “Adoption of the paris agreement—paris agreement text english,” 2015.
- [5] M. Lennan and E. Morgera, “The glasgow climate conference (cop26),” *The International Journal of Marine and Coastal Law*, vol. 37, no. 1, pp. 137–151, 2022.
- [6] U. de Planeación Minero Energética-UPME, “Plan energético nacional 2020–2050: La transformación energética que habilita el desarrollo sostenible,” 2020.
- [7] I. D. Márquez, D. M. Puyo, M. L. Robledo, and S. S. Valderrama, “Transición energética: Un legado para el presente y el futuro de colombia,” *Bogotá DC, Colombia*, 2021.
- [8] D. O. Natasha Avendaño García, “Zonas no interconectadas,” 2020.
- [9] C. de Colombia, “Ley 1715 por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional,” *No. May*, p. 2014, 2014.
- [10] J. D. Pabón Caicedo, J. Zea Mazo, G. León Aristizabal, J. Montealegre Bocanegra, G. Hurtado Moreno, and O. González Gómez, “La atmósfera, el tiempo y el clima,” 1998.
- [11] I. UPME, *Atlas de Viento de Colombia*, 2017.
- [12] U. UPME, “Atlas: Potencial hidroenergético de colombia,” *Bogotá DC Escala*, vol. 1, no. 4.500, 2015.
- [13] D. P. Zuluaga Pulgarín, “Evaluación de metodologías de interpolación de radiación solar en colombia,” 2018.
- [14] M. Khan, G. Bhuyan, M. Iqbal, and J. Quaicoe, “Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review,” *Applied energy*, vol. 86, no. 10, pp. 1823–1835, 2009.
- [15] M. Sood and S. K. Singal, “Development of hydrokinetic energy technology: A review,” *International Journal of Energy Research*, vol. 43, no. 11, 2019.
- [16] A. K. Nag and S. Sarkar, “Techno-economic analysis of a micro-hydropower plant consists of hydrokinetic turbines arranged in different array formations for rural power supply,” *Renewable Energy*, vol. 179, pp. 475–487, 2021.
- [17] D. Kumar and S. Sarkar, “A review on the technology, performance, design optimization, reliability, techno-economics and environmental impacts of hydrokinetic energy conversion systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 796–813, 2016.
- [18] A. Kumar and R. Saini, “Performance analysis of a single stage modified savonius hydrokinetic turbine having twisted blades,” *Renewable Energy*, vol. 113, pp. 461–478, 2017.
- [19] W. Ibrahim, R. Ismail, and M. Mohamed, “Micro-hydro energy estimation for hydrokinetic energy harnessing at sungai lembing,” in *Proceedings of the 10th National Technical Seminar on Underwater System Technology 2018: NUSYS’18*. Springer, 2019, pp. 549–562.
- [20] H. R. Karbasian, J. Esfahani, and E. Barati, “Simulation of power extraction from tidal currents by flapping foil hydrokinetic turbines in tandem formation,” *Renewable Energy*, vol. 81, pp. 816–824, 2015.

- [21] H. Karbasian, J. A. Esfahani, and E. Barati, “The power extraction by flapping foil hydrokinetic turbine in swing arm mode,” *Renewable Energy*, vol. 88, pp. 130–142, 2016.
- [22] T.-Z. Ang, M. Salem, M. Kamarol, H. S. Das, M. A. Nazari, and N. Prabakaran, “A comprehensive study of renewable energy sources: classifications, challenges and suggestions,” *Energy Strategy Reviews*, vol. 43, 2022.
- [23] A. Azarpour, O. Mohammadzadeh, N. Rezaei, and S. Zendejboudi, “Current status and future prospects of renewable and sustainable energy in north america: Progress and challenges,” *Energy Conversion and Management*, 2022.
- [24] N. D. Laws and B. P. Epps, “Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 1245–1259, 2016.
- [25] J. Khan, T. Iqbal, and J. Quaicoe, “Evaluation of maximum power point tracking in hydrokinetic energy conversion systems,” *The Journal of Engineering*, vol. 2015, no. 11, pp. 331–338, 2015.
- [26] H. J. Vermaak, K. Kusakana, and S. P. Koko, “Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 625–633, 2014.
- [27] M. P. Païdoussis, S. J. Price, and E. De Langre, *Fluid-structure interactions: cross-flow-induced instabilities*. Cambridge University Press, 2010.
- [28] A. B. Rostami and M. Armandei, “Renewable energy harvesting by vortex-induced motions: Review and benchmarking of technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 193–214, 2017.
- [29] M. Armandei, A. C. Fernandes, and A. B. Rostami, “Hydroelastic buffeting assessment over a vertically hinged flat plate,” *Experimental Techniques*, vol. 40, pp. 833–839, 2016.
- [30] H.-J. Jung and S.-W. Lee, “The experimental validation of a new energy harvesting system based on the wake galloping phenomenon,” *Smart Materials and Structures*, vol. 20, no. 5, 2011.
- [31] M. Armandei and A. C. Fernandes, “Marine current energy extraction through buffeting,” *International Journal of Marine Energy*, vol. 14, pp. 52–67, 2016.
- [32] P. Koumoutsakos and A. Leonard, “High-resolution simulations of the flow around an impulsively started cylinder using vortex methods,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 296, pp. 1–38, 1995.
- [33] L. Yan, X.-h. Chang, N.-h. Wang, R.-y. Tian, L.-p. Zhang, and W. Liu, “Computational analysis of fluid-structure interaction in case of fish swimming in the vortex street,” *Journal of Hydrodynamics*, vol. 33, no. 4, pp. 747–762, 2021.
- [34] R. D. Blevins, “Flow-induced vibration,” *New York*, 1977.
- [35] J. Young, J. C. Lai, and M. F. Platzer, “A review of progress and challenges in flapping foil power generation,” *Progress in aerospace sciences*, vol. 67, pp. 2–28, 2014.
- [36] K. Y. Blillah, “Resonance, tacoma narrows bridge failure, and undergraduate physics textbook,” *Am. J. Phys.*, vol. 59, no. 2, 1991.
- [37] F. DN-Beal, “Hover, m, triantafyllou, gv lauder; passive propulsion in vortex wakes; feb 2006,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 549, 2006.
- [38] L. Teng, J. Deng, D. Pan, and X. Shao, “Effects of non-sinusoidal pitching motion on energy extraction performance of a semi-active flapping foil,” *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 810–818, 2016.
- [39] S. Y. Shinde and J. H. Arakeri, “Jet meandering by a foil pitching in quiescent fluid,” *Physics of Fluids*, vol. 25, no. 4, p. 041701, 2013.

- [40] X. Wu, X. Zhang, X. Tian, X. Li, and W. Lu, "A review on fluid dynamics of flapping foils," *Ocean Engineering*, vol. 195, p. 106712, 2020.
- [41] T. Boye and Z.-T. Xie, "Aerodynamics of a pitching wind turbine blade at high reduced frequencies," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 223, p. 104935, 2022.
- [42] G. Wang and B. F. Ng, "Energy harvesting performance of a tandem-hydrofoil based closely-interconnected tidal array," *Energy Conversion and Management*, vol. 280, p. 116796, 2023.
- [43] Q. Xiao and Q. Zhu, "A review on flow energy harvesters based on flapping foils," *Journal of fluids and structures*, vol. 46, pp. 174–191, 2014.
- [44] J.-M. Lehn and J. Benyus, *Bioinspiration and biomimicry in chemistry: reverse-engineering nature*. John Wiley & Sons, 2012.
- [45] M. Pawlyn, *Biomimicry in architecture*. Routledge, 2019.
- [46] Y.-J. Chu, "A new biomimicry marine current turbine: Study of hydrodynamic performance and wake using software openfoam," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 28, no. 1, pp. 125–141, 2016.
- [47] Y. J. Chu and W. T. Chong, "Numerical study of conventional and biomimetic marine current turbines in tandem by using openfoam®," *Journal of Mechanics*, vol. 34, no. 5, pp. 679–693, 2018.
- [48] M. A. Curran, *Overview of goal and scope definition in life cycle assessment*. Springer, 2017.
- [49] G. Sonnemann, B. Vigon, M. Rack, and S. Valdivia, "Global guidance principles for life cycle assessment databases: development of training material and other implementation activities on the publication," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 18, pp. 1169–1172, 2013.
- [50] A. Sanes Orrego, "El análisis de ciclo de vida (acv) en el desarrollo sostenible: propuesta metodológica para la evaluación de la sostenibilidad de sistemas productivos," Ph.D. dissertation, 2012.
- [51] J. G. Villela Buenrostro, "Análisis de ciclo de vida de una planta de digestión anaerobia a partir de nopal para la generación de 1 MW de electricidad," 2018.
- [52] R. Escobar C, J. D. Restrepo, G. R. Brakenridge, and A. J. Kettner, "Satellite-based estimation of water discharge and runoff in the magdalena river, northern andes of colombia," *Remote Sensing of Hydrological Extremes*, pp. 3–19, 2017.
- [53] W. Ocampo-Duque, C. Osorio, C. Piamba, M. Schuhmacher, and J. L. Domingo, "Water quality analysis in rivers with non-parametric probability distributions and fuzzy inference systems: Application to the cauca river, colombia," *Environment international*, vol. 52, pp. 17–28, 2013.
- [54] N. Obregon Neira, "Atlas potencial hidroenergético de colombia. unidad de planeación minero energética, instituto geográfico agustín codazzi, colciencias, pontificia universidad javeriana, bogotá (colombia)," 2015.
- [55] C. Villa and G. Didier, "Plan institucional cuatrienal de investigación ambiental 2019-2022," *Conocimiento para un cambio transformativo. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia*, 2020.
- [56] J. Diaz, D. Escobar, C. Plata, and R. Ortiz, "Informe anual de la red nacional del SiB colombia 2021," 2022.
- [57] J. S. Usma Oviedo, J. A. Maldonado-Ocampo, and R. P. Vari, "Lista de los peces de agua dulce de colombia," 2017.
- [58] L. F. Jiménez Segura and C. Lasso, "Peces de la cuenca del río magdalena, colombia: diversidad, conservación y uso sostenible," 2020.

- [59] Q. Zhu, M. Wolfgang, D. Yue, and M. Triantafyllou, “Three-dimensional flow structures and vorticity control in fish-like swimming,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 468, pp. 1–28, 2002.
- [60] A. P. Maertens, A. Gao, and M. S. Triantafyllou, “Optimal undulatory swimming for a single fish-like body and for a pair of interacting swimmers,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 813, pp. 301–345, 2017.
- [61] F. DN-Beal, “Hover, m, triantafyllou, gv lauder; passive propulsion in vortex wakes; feb 2006,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 549, pp. 385–402.
- [62] S. Nash and A. Phoenix, “A review of the current understanding of the hydro-environmental impacts of energy removal by tidal turbines,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 648–662, 2017.
- [63] A. Miller, B. Chang, R. Issa, and G. Chen, “Review of computer-aided numerical simulation in wind energy,” *Renewable and sustainable energy Reviews*, vol. 25, pp. 122–134, 2013.
- [64] F. Martini, L. T. Contreras Montoya, and A. Ilinca, “Review of wind turbine icing modelling approaches,” *Energies*, vol. 14, no. 16, p. 5207, 2021.
- [65] B. F. Spencer Jr, V. Hoskere, and Y. Narazaki, “Advances in computer vision-based civil infrastructure inspection and monitoring,” *Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 199–222, 2019.
- [66] G. Wang, A. Muhammad, C. Liu, L. Du, and D. Li, “Automatic recognition of fish behavior with a fusion of rgb and optical flow data based on deep learning,” *Animals*, vol. 11, no. 10, p. 2774, 2021.
- [67] E. M. Ditria, E. L. Jinks, and R. M. Connolly, “Automating the analysis of fish grazing behaviour from videos using image classification and optical flow,” *Animal Behaviour*, vol. 177, pp. 31–37, 2021.
- [68] B. Zhu, J. Zhang, and W. Zhang, “Impact of the ground effect on the energy extraction properties of a flapping wing,” *Ocean Engineering*, vol. 209, p. 107376, 2020.
- [69] G. He, W. Mo, Y. Gao, J. Wang, Z. Zhang, H. Yang, and W. Mao, “Numerical study of a semi-passive oscillating hydrofoil on power-extraction with wing-in-ground effect,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 115, p. 103761, 2022.
- [70] Y. Su, M. Miller, S. Mandre, and K. Breuer, “Confinement effects on energy harvesting by a heaving and pitching hydrofoil,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 84, pp. 233–242, 2019.
- [71] H. Sun and M. M. Bernitsas, “Bio-inspired adaptive damping in hydrokinetic energy harnessing using flow-induced oscillations,” *Energy*, vol. 176, pp. 940–960, 2019.
- [72] L. Duarte, N. Dellinger, G. Dellinger, A. Ghenaim, and A. Terfous, “Experimental optimisation of the pitching structural parameters of a fully passive flapping foil turbine,” *Renewable Energy*, vol. 171, pp. 1436–1444, 2021.
- [73] F. Zhao, M. M. Qadri, Z. Wang, and H. Tang, “Flow-energy harvesting using a fully passive flapping foil: A guideline on design and operation,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 197, p. 106323, 2021.
- [74] Z. Liu, H. Qu, and H. Shi, “Energy-harvesting performance of a coupled-pitching hydrofoil under the semi-passive mode,” *Applied Energy*, vol. 267, p. 114889, 2020.
- [75] V. Mathai, G. A. Tzezana, A. Das, and K. S. Breuer, “Fluid–structure interactions of energy-harvesting membrane hydrofoils,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 942, p. R4, 2022.
- [76] D. Kim, B. Strom, S. Mandre, and K. Breuer, “Energy harvesting performance and flow structure of an oscillating hydrofoil with finite span,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 70, pp. 314–326, 2017.
- [77] H. Wang, X. Zheng, S. Pröbsting, C. Hu, Q. Wang, and Y. Li, “An unsteady rans simulation of the performance of an oscillating hydrofoil at a high reynolds number,” *Ocean Engineering*, vol. 274, p. 114097, 2023.

- [78] T. Villeneuve, M. Boudreau, and G. Dumas, “Lift enhancement and drag reduction of lifting blades through the use of end-plates and detached end-plates,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 184, pp. 391–404, 2019.
- [79] —, “Assessing the performance and the wake recovery rate of flapping-foil turbines with end-plates and detached end-plates,” *Renewable Energy*, vol. 179, pp. 206–222, 2021.
- [80] J. Zhou, W. Yan, L. Mei, and W. Shi, “Performance of semi-active flapping hydrofoil with arc trajectory,” *Water*, vol. 15, no. 2, p. 269, 2023.
- [81] W. Jiang, Y. Wang, D. Zhang, and Y. Xie, “Numerical investigation into the energy extraction characteristics of 3d self-induced oscillating foil,” *Renewable Energy*, vol. 148, pp. 60–71, 2020.
- [82] D. Zhou, Y. Cao, and X. Sun, “Numerical study on energy-extraction performance of a flapping hydrofoil with a trailing-edge flap,” *Ocean Engineering*, vol. 224, p. 108756, 2021.
- [83] O. Xie, J. Yao, X. Fan, C. Shen, and C. Zhang, “Numerical and experimental study on the hydrodynamics of a three-dimensional flapping caudal fin in ground effect,” *Ocean Engineering*, vol. 260, p. 112049, 2022.
- [84] A. Krishnadas, S. Ravichandran, and P. Rajagopal, “Analysis of biomimetic caudal fin shapes for optimal propulsive efficiency,” *Ocean Engineering*, vol. 153, pp. 132–142, 2018.
- [85] Z. Xiong, “The essence of generating vortex-within-a-vortex structures behind forked caudal fins,” *AIP Advances*, vol. 12, no. 10, p. 105106, 2022.
- [86] S. Hoerner, S. Abbaszadeh, O. Cleynen, C. Bonamy, T. Maître, and D. Thévenin, “Passive flow control mechanisms with bioinspired flexible blades in cross-flow tidal turbines,” *Experiments in Fluids*, vol. 62, pp. 1–14, 2021.
- [87] R. Ramamurti, J. Geder, K. Viswanath, and M. Pruessner, “Propulsion characteristics of flapping caudal fins and its upstream interaction with pectoral fins,” in *AIAA Scitech 2019 Forum*, 2019, p. 1618.
- [88] I. Hashem and B. Zhu, “Metamodeling-based parametric optimization of a bio-inspired savonius-type hydrokinetic turbine,” *Renewable Energy*, vol. 180, pp. 560–576, 2021.
- [89] B. F. Lima Rodríguez, “Parametric modelling of a biomimetic propulsion system using additive manufacturing for autonomous underwater vehicles.”
- [90] F. Xie, Z. Li, Y. Ding, Y. Zhong, and R. Du, “An experimental study on the fish body flapping patterns by using a biomimetic robot fish,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 1, pp. 64–71, 2019.
- [91] Z. Wang, Y. Wang, and M. Zhuang, “Improvement of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines with leading-edge serrations and helical blades using cfd and taguchi method,” *Energy conversion and management*, vol. 177, pp. 107–121, 2018.
- [92] C. Eloy, “Optimal strouhal number for swimming animals,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 30, pp. 205–218, 2012.
- [93] L. Zapata and J. Usma, “Guía de las especies migratorias de la biodiversidad en colombia,” *Peces. Bogota: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible/WWF-Colombia*, 2013.
- [94] U. Jaramillo-Villa and L. F. Jiménez-Segura, “Algunos aspectos biológicos de la población de prochilodus magdalanae en las ciénagas de tumaradó (río atrato), colombia,” *Actualidades Biológicas*, vol. 30, no. 88, pp. 55–66, 2008.
- [95] V. A. García, E. Kerguelén, L. Wadnipar, and A. Narváez, “Manejo de la primera alimentación del bocachico (prochilodus magdalanae),” *Revista MVZ Córdoba*, vol. 8, no. 1, pp. 254–260, 2003.

- [96] L. Zapata, J. Usma, T. Rodríguez, X. Moreno, M. Franco-Jaramillo, C. García, and G. Castellanos, “Recursos pesqueros de Colombia, principales especies, conservación y pesca responsable,” *AUNAP, WWF Colombia, Cali*, 2015.
- [97] M. Estrada Estrada, M. Valderrama Barco, I. Beltrán Galeano *et al.*, *Plan de ordenación: manejo y aprovechamiento sostenible pesquero y acuícola en la cuenca del río Grande de la Magdalena*. INPA, 2000.
- [98] A. L. Roa Lazaro *et al.*, “Evaluación del desempeño reproductivo del bocachico *prochilodus magdalenae* cultivado con tecnología biofloc,” 2021.
- [99] M. Lateb, R. N. Meroney, M. Yataghene, H. Fellouah, F. Saleh, and M. Boufadel, “On the use of numerical modelling for near-field pollutant dispersion in urban environments- a review,” *Environmental Pollution*, vol. 208, pp. 271–283, 2016.
- [100] H. Xiao and P. Cinnella, “Quantification of model uncertainty in RANS simulations: A review,” *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 108, pp. 1–31, 2019.
- [101] T. S. Phillips and C. J. Roy, “Richardson extrapolation-based discretization uncertainty estimation for computational fluid dynamics,” *Journal of Fluids Engineering*, vol. 136, no. 12, p. 121401, 2014.
- [102] W.-H. Chen, J.-S. Wang, M.-H. Chang, A. T. Hoang, S. S. Lam, E. E. Kwon, and V. Ashokkumar, “Optimization of a vertical axis wind turbine with a deflector under unsteady wind conditions via Taguchi and neural network applications,” *Energy Conversion and Management*, vol. 254, p. 115209, 2022.