Estudio sobre la propulsión de MAGBOAT mediante sistema de aleteo alternativo al estilo de un pato

Informe técnico

MAGTEL IDI

13/05/24

ÍNDICE

[1. Introducción 2](#_Toc164682634)

[2. Referencias 2](#_Toc164682635)

[Anexo de cálculo energético para sistema de almacenamiento gravitacional 3](#_Toc164682636)

# Introducción

En la intersección entre la innovación tecnológica y la conservación del medio ambiente, surge la necesidad de desarrollar soluciones que permitan la coexistencia entre la innovación tecnológica y la biodiversidad acuática. En este contexto, los embalses equipados con placas fotovoltaicas flotantes representan una importante fuente de energía renovable, pero también plantean desafíos específicos en términos de su impacto ambiental, especialmente en lo que respecta a la fauna ictiológica.

Los métodos tradicionales de propulsión utilizados en vehículos flotantes, como las hélices, suelen generar turbulencia y niveles de ruido que perturban la vida acuática y afectan la calidad del hábitat en los embalses. Estas perturbaciones no solo afectan a la fauna ictiológica de forma directa, sino que también pueden alterar la dispersión de nutrientes esenciales en el agua, lo que a su vez influye en la salud del ecosistema acuático en su conjunto. En este contexto, la implementación de un diseño de propulsión bioinspirado en el aleteo de un pato puede conducir una solución prometedora. Al imitar la eficiencia y la suavidad del movimiento de estos animales en el agua, se busca no solo mejorar la navegabilidad de los vehículos flotantes, sino también minimizar el impacto ambiental en la fauna ictiológica y en el ecosistema acuático en general.

Básicamente, la propulsión puede generarse por dos mecanismos hidrodinámicos diferentes: sustentación o resistencia (Daniel and Webb, ’87). En el primero de ellos, se origina una fuerza sustentadora perpendicular a la velocidad de avance, cuya proyección en la dirección del movimiento produce el empuje. En la segunda, el movimiento propulsivo tiene lugar porque se desplaza una masa de agua en el sentido opuesto al movimiento. Este último modo de empuje es el que utilizan patos, gaviotas, tortugas marinas, osos, etc. Según las observaciones, se ha detectado que las especies que utilizan este modo de propulsión lo hacen a una frecuencia de batida más o menos constante (Clark y Fish, 1994). Por ejemplo, Prange and Schmidt-Nielsen (’70) identificaron ese patrón en el ánade real, Nadel (’77) en nadadores humanos de competición, Williams (‘83) en visones, Fish (‘84) en comadrejas, y Williams (‘89) en nutrias. La cinemática de este tipo de nado es mediante movimientos alternativos entre las dos patas, y comprende una fase de tirón y otra de recobro de la patada. En la fase de tirón se origina la totalidad de la fuerza de empuje, y mediante el recobro se vuelve a posicionar la aleta para ejecutar de nuevo el movimiento de tirón, ocasionando las menores perturbaciones posibles y reduciendo la resistencia al avance (finalmente tiene que poder generarse una fuerza neta de empuje durante un periodo completo de batida).

Un gran número de investigaciones sobre el nado en superficie y la hidrodinámica de algunas especies de patos se han llevado cabo, principalmente motivados por el consumo energético y eficiencia de estos animales. Por ejemplo, Baudinette y Gill (1985) compararon experimentalmente el gasto metabólico generado por el nado a diferentes velocidades entre una especie de pingüinos pequeños (*EudyptuIa minor*) y el pato *Anas superliciosa*. Resultó que el rendimiento metabólico (potencia mecánica de salida / potencia metabólica de entrada) fue de un 4,5% para la especie de pato en estudio. Sin embargo, ambas especies comparten el valor de la velocidad de nado en superficie a la que el coste del transporte es menor: ~0,5 m/s. Por otra parte, Clark y Fish (1994) estudiaron las escalas características del Ánade real (*Anas platyrhynchos*) mediante un modelo de resonancia.

La presente investigación tiene como objeto analizar numéricamente la geometría circular y triangular (conservando la misma área) de aletas que darían lugar al modo de propulsión más eficiente para su implementación en el vehículo flotante Magboat, con el propósito de facilitar la convivencia de la fauna ictiológica en embalses equipados con placas fotovoltaicas flotantes. La aleta circular que se ha considerado en el estudio es básicamente un disco de espesor delgado, que ejecuta una trayectoria rectilínea durante un movimiento no estacionario, generando una fuerza de empuje que varía en el tiempo. Se ha considerado este tipo de geometría en el estudio por tratarse de una forma canónica sobre la que se ha encontrado previos estudios científicos (Tian et al., 2017) con los que poder validar y verificar los resultados numéricos. Sin embargo, se espera que la geometría triangular sea más efectiva que el disco, ya que de por sí es la forma a la que la evolución ha llevado. Johansson y Norberg (2003), demostraron que la geometría triangular tiene características hidrodinámicas muy interesantes por los torbellinos que se producen en los bordes de la pata. A través de experimentos, observaron que en las batidas reales, donde realmente la trayectoria forma un arco, interaccionan los mecanismos de resistencia y de sustentación. Más tarde, Kim y Gharib (2011) a través de la experimentación midieron las fuerzas instantáneas para tres placas de diferentes geometrías: rectangular, trapezoidal y triangular. Los experimentos se llevaron a cabo a bajos números de Reynolds, comparando diferentes niveles de flexibilidad. Se concluyó que la aleta triangular era la que desplazaba un mayor chorro de fluido, y por tanto la que generaba la mayor fuerza de empuje (sólo analizaron la fase de tirón).

El análisis del movimiento se ha llevado a cabo a través de un modelo matemático sencillo (unidimensional) que considera el movimiento general del vehículo completo, y que integra el propio modelo hidrodinámico de las aletas con las geometrías en estudio. Para el disco circular, se ha puesto a punto un código numérico con el software libre OpenFOAM, y se han ejecutado simulaciones tridimensionales y transitorias para su validación, y como primera aproximación para el cálculo de la fuerza de empuje. Idealmente, se espera contar con mayor potencia de cálculo en estudios futuros para poder elaborar un mapa de fuerzas de empuje, dadas una amplitud y frecuencia de batida determinadas.

A través de un enfoque interdisciplinario que integra la ingeniería, la biología y la conservación del medio ambiente, buscamos ofrecer una solución innovadora y sostenible para promover la coexistencia pacífica entre la actividad humana y la vida acuática en entornos acuáticos artificiales.

# Formulación del problema

El análisis que se ha planteado considera el movimiento unidireccional y puntual de una partícula (barco) que avanza sobre la superficie libre de una masa de agua, propulsada por un par de patas robóticas que baten alternativamente. Suponiendo que el barco se encuentra equilibrado verticalmente (flotabilidad compensa al peso), y que en primera aproximación no se genera momento de cabeceo en el avance de la embarcación, la ecuación de Newton que equilibra fuerzas de empuje  y fuerzas de resistencia  quedaría

,

donde  es la masa equivalente del vehículo,  la aceleración y  el tiempo.

La fuerza total de resistencia es la suma de la fuerza de fricción y de la que oponen las olas, como se utilizó en Prétot et al. (2022). Ésta viene dada por la expresión

Imagen que contiene Texto

Descripción generada automáticamente,

con  la densidad del agua,  la velocidad de avance de Magboat,  la superficie mojada,  es coeficiente de resistencia por fricción turbulenta,  el volumen sumergido, y  el coeficiente de resistencia por ondas. Según el trabajo de Prétot et al. (2022), estos coeficientes de han afinado según resultados experimentales de embarcaciones deportivas tipo kayak a los valores:



Estos coeficientes se considerarán razonables como primera aproximación para el modelo matemático, pero idealmente deberían obtenerse a través de experimentos específicos sobre la geometría real del barco.

Por otra parte, la fuerza de empuje consistirá en cuantificar la masa de agua que las aletas son capaces de desplazar, dadas unas condiciones de nado. Dependiendo de la frecuencia y la amplitud de la batida, y teniendo en cuenta que se desea que el vehículo esté bioinspirado en el nado de un pato, la cinemática de las patadas puede aproximarse por el movimiento armónico simple

,

en el que  representa la posición de la aleta,  es la amplitud de la onda, y  la frecuencia de batida. A esta cinemática le corresponden las siguientes relaciones para expresar la velocidad y aceleración de las batidas, respectivamente:

.

En cuanto al alcance del movimiento, hay que tener en cuenta que este estudio inicial sólo considera movimientos puramente rectilíneos de la pata (paralelos a la superficie libre) durante medio periodo del movimiento. Esto significa que solamente se tiene en cuenta la fase de empuje, pero el recobro de la patada para el siguiente movimiento se haría con la aleta perfectamente paralela a la dirección de avance, gracias a un motor y a un controlador que gestione los movimientos del aleteo. En definitiva, la fuerza de empuje que genera la aleta se puede calcular como

Imagen que contiene objeto, reloj

Descripción generada automáticamente,

con  el coeficiente de resistencia (o propulsión) hidrodinámica de la aleta,  la superficie de la aleta con la que desplaza la masa de agua para impulsarse, y  la velocidad relativa a la aleta, que viene dada por

,

con , la velocidad estacionaria de avance del vehículo. La aceleración de la aleta se puede derivar inmediatamente de la expresión anterior derivando respecto al tiempo:

.

Esta expresión sería útil para estimar la fuerza que ejerce la aleta durante su movimiento, de cara a definir por ejemplo su nivel de rigidez estructural.

Volviendo al movimiento general del vehículo, , se puede reformular en vista de las expresiones anteriores para la fuerza de propulsión y de resistencia,

Gráfico

Descripción generada automáticamente

Que se puede expresar de forma adimensional a través de la fuerza de avance sobre la superficie mojada  , tomando por ejemplo  y  como escalas para la longitud y la velocidad. En ese caso, la ecuación de Newton que gobierna el avance de Magboat quedaría

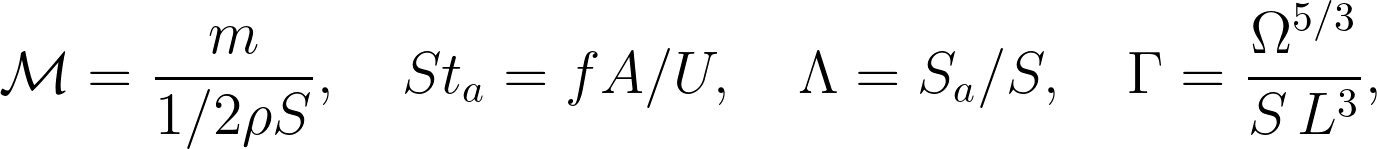
Imagen que contiene objeto, reloj

Descripción generada automáticamente,

Con

,

La velocidad relativa adimensional en términos del número de Strouhal . En resumen, este problema quedaría gobernado por los siguientes parámetros:



Que representan respectivamente la masa adimensional, el número de Strouhal basado en la amplitud del movimiento de la batida, la relación ente la superficie de la aleta y la superficie mojada, y una relación adimensional de volumen.

Estos parámetros proporcionan información de relevancia para la bioinspiración de Magboat, ya que manteniendo los valores típicos que se dan en patos, se podrían escalar las proporciones del modelo real, imponiendo por ejemplo el volumen necesario, la velocidad de avance, o la carga máxima que se debería soportar.

Dada la descripción general del problema, solo quedaría por determinar el coeficiente Imagen que contiene objeto, cadena, reloj

Descripción generada automáticamente, el cual varía con la ejecución del movimiento de nado del barco y con la forma de la aleta. Para determinarlo se ha planteado llevar a cabo simulaciones numéricas directas que resuelvan las ecuaciones de Navier-Stokes, para varias configuraciones de nado, según frecuencia y amplitud.

# Resultados y discusión

## Validación numérica del modelo hidrodinámico de una aleta circular

Para tener conocimiento del error que se comete en la discretización numérica de las ecuaciones para el cálculo de las fuerzas hidrodinámicas, es necesario un estudio de validación y verificación del método. En este caso, se ha tomado como referencia el reciente artículo de Tian et al. (2017), en el que estudian la hidrodinámica no estacionaria de un disco circular que se oscila de manera rectilínea, en una trayectoria perpendicular al plano.

En primer lugar, se ha validado en la Fig. 1 el caso de un flujo incompresible normal a un disco circular de pequeño espesor en un rango de números de Reynolds (basado en el diámetro del disco) . Es importante mencionar que, para este rango, el problema es estacionario, como demuestra la evolución temporal de Imagen que contiene Forma

Descripción generada automáticamente de la Fig. 1(a).

Gráfico

Descripción generada automáticamente

Figura 1: (a) Evolución temporal del coeficiente de resistencia hidrodinámica. (b) Evolución del valor medio del coeficiente de resistencia hidrodinámica con el número de Reynolds.

La Fig. 1(b) muestra que la solución numérica que se ha obtenido con el código numérico puesto a punto por Magtel sobre una malla similar a la de los autores se ajusta perfectamente a los datos experimentales disponibles en la literatura, y en general se observa que, a medida que incrementa el número de Reynolds, el coeficiente de resistencia hidrodinámica disminuye de la forma , con  el valor asintótico al que tiende Imagen que contiene Forma

Descripción generada automáticamente cuando  crece. Sin embargo, estos resultados para un problema estacionario no proporcionan una información relevante frente al problema real ya que no tienen en cuenta las fuerzas de inercia en la aleta.

Para seguir avanzando hacia un caso más parecido al que nos ocupa, se han llevado a cabo simulaciones no estacionarias del mismo modelo de disco, moviéndose alternativamente en un fluido (inicialmente) en reposo, y se han comparado los resultados con los casos correspondientes de Tian et al. (2017), gobernados por el parámetro de Keulegan-Carpenter,

Imagen que contiene Texto

Descripción generada automáticamente,

Que relaciona el desplazamiento máximo que podría efectuar durante un período un cuerpo que se mueve periódicamente, con su longitud característica. Los números  que se han simulado para la validación del disco oscilando han sido ; cuyos números de Reynolds correspondiente basados en la velocidad máxima del movimiento son Texto

Descripción generada automáticamente con confianza baja. Los resultados se muestran en la Fig. 2(a), (b) y (c), a través de sus respectivos diagramas de fase, que relacionan el coeficiente de resistencia hidrodinámica Imagen que contiene Forma

Descripción generada automáticamente con la posición instantánea del disco, escalada con la amplitud del movimiento . Estos resultados numéricos se han calculado durante un total de 10 ciclos para cada uno de los casos, y demuestran un ajuste razonablemente bueno con de los resultados que obtuvieron Tian et al. (2017), por lo que quedaría validado el método numérico y la malla computacional a través de ellos.

Gráfico, Histograma

Descripción generada automáticamente

Figura 2: Diagramas de fase para diferentes configuraciones de oscilación de un disco en un fluido en reposo. (a) Imagen que contiene cadena

Descripción generada automáticamente, (b) Imagen que contiene cadena

Descripción generada automáticamente, (c) Imagen que contiene Texto

Descripción generada automáticamente.

Se puede observar que a medida que se reduce el número , el coeficiente de resistencia hidrodinámica alcanza valores pico mayores, sobre todo en los extremos del movimiento [desde aprox. 1 en (a) hasta 2.5 en (c)]. Precisamente, en la figura (a) el valor máximo no se da en los extremos (-1 ó 1), pero a medida que la amplitud del movimiento disminuye, la inercia cada vez domina más, y Imagen que contiene Forma

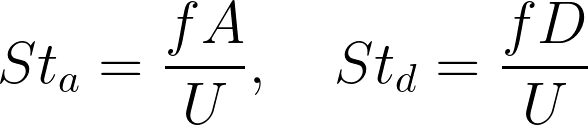
Descripción generada automáticamente alcanza los valores pico exactamente en la posición inicial o final del movimiento (c). La figura (b) muestra una situación intermedia, donde el valor de Imagen que contiene Forma

Descripción generada automáticamente en los extremos es comparable al que se obtiene en posiciones intermedias del movimiento que ejecuta.

## Resultados numéricos para una disco que ejecuta la mitad de un movimiento oscilatorio en un movimiento de avance

Debido a que la capacidad computacional es muy limitada, se han ejecutado simulaciones numéricas para el cálculo del coeficiente Imagen que contiene Forma

Descripción generada automáticamente, considerando que el disco circular ejecuta solamente la mitad del movimiento (es decir, solo la fase de tirón, y no la de recobro de la patada) de un periodo del movimiento, y además experimenta un avance a una velocidad estacionaria. Esta configuración local del nado de la pata es la más realista hasta el momento, y será de gran utilidad poder caracterizar su fuerza para alimentar al modelo general del movimiento de Magboat. Como se ha superpuesto un movimiento de avance estacionario, se han definido un par de nuevos parámetros para definirlo apropiadamente, y poder llevar a cabo (idealmente, quizás en un futuro) un análisis de sensibilidad. Estos parámetros son básicamente dos números de Strouhal,  y , que sirven como escalas para relacionar la amplitud y la frecuencia de la batida, quedando definidos como

.

En la figura se comparan dos a dos, cuatro casos diferentes. En general, se observa a simple vista de que la fuerza media de empuje que se desarrolla en cada semipatada es negativa en todos los casos, lo que indica que en ninguno se conseguiría un empuje neto que hiciera que Magboat pudiera avanzar con una velocidad más o menos estacionaria en el sentido positivo de la marcha. En (a) se ha comparado la influencia del número Imagen que contiene Texto

Descripción generada automáticamente manteniendo fijo el número Imagen que contiene Texto

Descripción generada automáticamente al valor 0,16. Se puede apreciar que el incremento del valor de Imagen que contiene Texto

Descripción generada automáticamente, de 0.16 a 0.24 consigue reducir la fuerza de resistencia media, o lo que es lo mismo, aproximarse más a un empuje neto positivo. Este hecho no significa que nunca se genere empuje positivo. Aproximadamente durante la primera cuarta parte del período del movimiento la fuerza de propulsión alcanza valores positivos, aunque durante el resto de la semipatada se genera resistencia hidrodinámica.

Gráfico, Histograma

Descripción generada automáticamente

Figura 3: Evolución de la fuerza de empuje de la pata en un semiperiodo para los valores de los parámetros Imagen que contiene Texto

Descripción generada automáticamente y Imagen que contiene Texto

Descripción generada automáticamente, a . Líneas continuas: CFD, líneas de trazo-punto: teórico, líneas discontinuas: valor promedio de la simulación CFD.

Este hecho se puede explicar por la velocidad relativa a la que se mueve el disco respecto a la velocidad estacionaria de avance de Magboat. Es evidente, que si se desea que el empuje sea efectivo la velocidad relativa debe ser lo suficientemente grande para que la resistencia que experimenta la aleta sea una mínima parte en el balance de fuerzas. Este cálculo, obviamente, solo puede realizarse a través de las simulaciones numéricas ya que el movimiento que ejecuta el disco no desplaza la masa de agua correspondiente a su superficie completa.

Ésta, por supuesto, sería una limitación del movimiento puramente rectilíneo y paralelo a la dirección de avance del barco que se ha propuesto para su implementación por su simplicidad. Es por esta razón que las especies de patos ejecutan un movimiento de forma arqueada, en el que no solo domina el arrastre de una masa de agua, sino que además se identifican mecanismos de empuje por sustentación (Johansson y Norberg, 2003), justamente en las zonas en las que el arrastre deja de ser efectivo. No obstante, este hecho no imposibilita que se pueda conseguir una fuerza neta de empuje con la cinemática simple que se ha propuesto, aunque por supuesto habría que elaborar un mapa Imagen que contiene Texto

Descripción generada automáticamente vs. Imagen que contiene Texto

Descripción generada automáticamente vs. Un dibujo en blanco y negro

Descripción generada automáticamente con confianza baja, con el fin de poder delimitar las zonas efectivas, el máximo y el óptimo de la propulsión en función de la amplitud y frecuencia del movimiento.

Gráfico, Histograma

Descripción generada automáticamente

Figura 4: Condiciones de diseño y funcionamiento de la aleta: (a) mapa de coeficiente de empuje promedio Un dibujo en blanco y negro

Descripción generada automáticamente con confianza baja vs. Imagen que contiene Texto

Descripción generada automáticamente y Imagen que contiene Texto

Descripción generada automáticamente, (b) evolución del coeficiente de empuje promedio vs. Sta.

En vista de los recursos insuficientes para el cálculo numérico, se ha elaborado el mapa para el coeficiente de propulsión medio [Fig. 4(a)] de forma teórica. La ecuación de Morison, especifica que las fuerzas que actúan sobre un cuerpo en movimiento son la sustentanción, la resistencia y la masa añadida. Puesto que el disco ejecuta un movimiento unidireccional, y con su superficie normal a la dirección de la batida, se considerará que la contribución por sustentación será nula ya que, por definición, la sustentación aparecería perpendicular al vector velocidad, y quedaría compensada por simetría. De esta forma, la fuerza efectiva que experimenta el disco en movimiento vendría dada por la expresión

,

Donde  es el coeficiente de resistencia hidrodinámica del disco, y Imagen que contiene Forma

Descripción generada automáticamente el coeficiente de masa añadida. Para el caso de un disco circular de espesor nulo, que se mueve frontalmente, estos coeficientes se han obtenido de la bibliografía existente: Interfaz de usuario gráfica

Descripción generada automáticamente con confianza media y Imagen que contiene cadena

Descripción generada automáticamente. A través de esta simplificación, se puede aproximar que el valor límite a partir del cual la aleta comenzaría a generar una fuerza de avance neta, que como indica la Fig. 4 sería Forma

Descripción generada automáticamente con confianza media, para cualquier valor de Imagen que contiene Texto

Descripción generada automáticamente.

Finalmente, hay que subrayar que esta información es aproximada, como puede observarse al comparar las evoluciones temporales de CFD vs. teoría en los gráficos (a) y (b) de la Fig. 3. Aún así, a falta de mayor capacidad de cálculo, este enfoque proporciona una estimación útil para el dimensionamiento del prototipo de aletas y actuadores de Magboat.

# Conclusiones

# Referencias

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | BOJA, «Número 247 - Lunes, 24 de diciembre de 2018». |
| [2] | F. C. d. Guatiato, «Fundación Cuenca del Guadiato,» [En línea]. Available: https://fundacioncuencaguadiato.jimdofree.com/. [Último acceso: Septiembre 2023]. |
| [3] | R. Verdú, «Hallan una balsa en una mina con agua para dos años de consumo en el Norte de Córdoba,» *ABC de Córdoba,* Noviembre 2022. |
| [4] | W. Tong, Z. Lu, W. Chen, M. Han, G. Zhao, X. Wang y Z. Deng, «Solid gravity energy storage: A review,» *Journal of Energy Storage,* vol. 53, nº 105226, 2022. |
| [5] | L. Á. d. Prado, J. Menéndez, A. Bernardo-Sánchez, M. Galdo, J. Loredo y J. M. Fernández-Oro, «Thermodynamic Analysis of Compressed Air Energy Storage (CAES) Reservoirs in Abandoned Mines Using Different Sealing Layers,» *Applied Sciences,* vol. 2573, nº 11, 2021. |
| [6] | BOE, «Ley 14/2007, de 26 de noviembre, del Patrimonio Histórico de Andalucía,» 2007. |