

Sistema de propulsión magnetohidrodinámica y determinación del empuje Magnetohydrodynamic propulsion system and determination of the thrust

Nelson Diaz Leiva¹

Resumen

Presentamos el funcionamiento de un sistema de propulsión magnetohidrodinámico en condiciones estáticas utilizando como fuente de campo magnético un electroimán en forma de C que produce un campo magnético constante de 17,6 mT y el campo eléctrico lo generamos entre placas planas paralelas de acero inoxidable desmagnetizado sometida a seis valores diferentes de potencial eléctrico, con un valor inicial de 5,00 V y un valor final de 48,0 V, ambas fuentes alimentados con corriente continua, la sustancia de trabajo utilizada fue agua de mar que al interactuar con la fuerza de Lorentz produce empuje magnetohidrodinámico de 1,09 hasta 6,55 mN respectivamente.

Palabras clave: Magnetohidrodinámica, fuerza de Lorentz, empuje.

Abstract

We presented the operating of a system of propulsion magnetohydrodynamic in static conditions using as source of magnetic field an electromagnet in the shape of C that produces a magnetic constant field of 17,6 mT and the electrical field we it generate between flat parallel plates of stainless steel demagnetized submitted to six values different from electrical potential, with an initial value of 5,00 V and a final value of 48,0 V, both sources fed on direct current, the substance of work used was a water of sea that on having interacted with the force of Lorentz produces thrust magnetohydrodynamic of 1,09 up to 6,55 mN respectively.

Key words: Magnetohydrodynamic, forces of Lorentz, thrust.

¹Universidad Nacional del Callao, Facultad de Ingeniería Mecánica y Energía. Av. Juan Pablo II 306-308, Callao, Perú.

Introducción

La magnetohidrodinámica (MHD) tiene entre sus interacciones a la fuerza de Lorentz que se manifiestan en el movimiento de fluidos conductores, los fenómenos de este tipo no son comunes en la vida diaria pero permiten explicar el campo magnético global terrestre que tiene su origen en el núcleo líquido en movimiento de la tierra que se comporta como un gigantesco anillo conductor de corriente.

La propulsión MHD es una propuesta aplicable en agua de mar para impulsar submarinos de carga de alta velocidad (1), donde la propulsión silenciosa es muy útil en submarinos militares (2), o en barcos de alta velocidad (3) que funcionan sin generar vibración mecánica o cavitación en las hélices, si la hélice gira muy rápido, se forma un área de baja presión frente a las aspas de la hélice, causando vaporización (4). Esto no solo reduce la eficiencia del buque sino que puede destruir a la hélice.

No se conoce información de cómo determinar experimentalmente el empuje o fuerza generada por un sistema propulsor MHD en condiciones estáticas (5). En ese sentido, se ha construido un sistema básico de propulsión MHD que consiste de una bandeja con un par de placas planas paralelas de acero inoxidable desmagnetizado que actúan como fuente de campo eléctrico, estas placas están inmersas dentro de agua de mar, el campo magnético perpendicular al campo eléctrico es proporcionado por un electroimán con núcleo de hierro laminado en forma de C, ambos son alimentados con corriente continua, este sistema nos permitirá demostrar la acción de la fuerza de Lorentz actuando sobre el fluido conductor que es el agua de mar que adquiere una velocidad de flujo que se determinó a través del análisis de video lo cual permite la determinación del empuje.

La ventaja de contar con este sistema de propulsión MHD es que al no requerir de partes móviles como ejes y hélices (6), es de fácil

mantenimiento y silencioso por lo que no puede ser detectado por los sistemas de radar de tipo submarino. También no tiene limitante en la velocidad alcanzada por la nave por lo que resultaría interesante en la construcción de naves de uso militar y civil. El sistema de propulsión permitiría mayor capacidad de maniobra en los buques ya que se podrían generar ángulos de giro con mayor rapidez que el sistema convencional.

Velocidad del fluido y empuje del propulsor

El sistema de propulsión (2) magnetohidrodinámica combina circuitos eléctricos y magnéticos, la corriente eléctrica a lo largo del eje y , el campo magnético en la dirección del eje z genera una fuerza de Lorentz en la dirección x . Esta fuerza genera un flujo que impulsa el propulsor $-u_{\infty} e_x$, por lo que puede mover una nave en la dirección opuesta por conservación del momento lineal, con una velocidad $-u_{\infty} e_x$. En una estructura moviéndose con el propulsor a u_d . Una representación esquemática del propulsor y áreas de sección transversal usadas para este estudio se muestra en la figura 1.

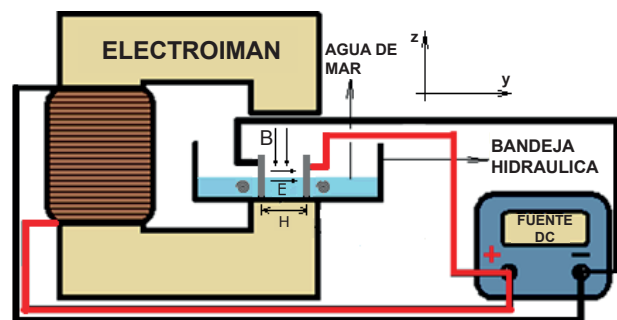


Figura 1. Vista lateral del propulsor. Se utilizan dos vórtices para representar las pérdidas en los bordes a la entrada y salida del propulsor

El empuje medio es dado por (5):

$$F = m (\beta_d u_d - \beta_{\infty} u_{\infty}) \quad (1)$$

En la ecuación (1), β_d (y por lo tanto β_{∞}) son los coeficientes de momentum, o factor de corrección de momentum de flujo en el propulsor

(flujo de salida). Para un perfil de flujo dado u a través de la sección S , este coeficiente es definido por:

$$\beta = \frac{1}{S} \int_S \left[\frac{u}{\bar{u}} \right]^2 d\tau \quad (2)$$

donde u es el flujo medio. Este factor de corrección es usado para tomar en cuenta el perfil de velocidades no uniformes cuando integramos la ecuación de momentum. Valores típicos son, $\beta_d=4/3$ (y respectivamente $\beta_\infty=6/5$) para un flujo de Poiseville en un ducto cilíndrico (en un plano 2D), y $\beta_d=1,0$ para un perfil de velocidades uniformes.

Es de interés estimar como varía la eficiencia eléctrica del propulsor:

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} \quad (3)$$

Donde $P_m=IBHu_d$ es la potencia mecánica impartida sobre el fluido y $P_e=U_0I$ la potencia eléctrica dada por la fuente. En la literatura (6) se encuentra un factor de carga que se introduce a menudo:

$$K = \frac{U_0 - E_0}{ku_dBH} \quad (4)$$

el cual es la razón entre el voltaje efectivo impuesto al fluido y el voltaje inducido por el flujo. Usando el factor de carga K , la eficiencia η puede convenientemente ser escrito como

$$\eta = \frac{BH u_d}{U_0} = \frac{1}{k(K+K_0)} \quad (5)$$

Donde $K_0 = \frac{E_0}{ku_dBH}$ es usualmente despreciado

en la literatura ($E_0 \ll U_0$). Puesto que $K > 1$ para un propulsor, una buena eficiencia se da para la ec. (5), considerando la ec. (2). Haciendo más simple:

$$U_0 = E_0 + RI + ku_dBH \quad (6)$$

K se reduce a $K = 1 + \frac{RI}{(ku_dBH)}$, la cual da:

$$\eta = \left[k(1 + K_0) + \frac{RI}{u_dBH} \right]^{-1} \quad (7)$$

Es decir

$$\eta = \left[k(1 + K_0) + \frac{\kappa[1+\rho(u_d)]u_d}{B^2} \left(\frac{r_i}{H^2} + \frac{1}{\sigma v} \right) \right]^{-1} \quad (8)$$

Con $v=l_x l_z H$ el volumen de agua en el propulsor. Bajo la asunción usual de la literatura ($K_0=0, k = 0, \rho=0, r_i=0$), la ecuación (8) se reduce a:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\kappa u_d}{\sigma v B^2}} \quad (9)$$

La cual muestra que la eficiencia se aproxima a 1 cuando vB^2 se incrementa (6) maximizando η mediante el campo magnético B .

Material y método

Para la determinación del empuje del sistema magnetohidrodinámico instalamos los equipos como muestra la figura 2 alimentamos el electroimán con una corriente continua de 3,0 Amperios y 30 voltios, a las placas de acero las alimentamos inicialmente con 5,0 Voltios aumentando hasta 48 voltios registrando con la cámara digital el movimiento de las partículas dieléctricas que se desplazan junto con el agua de mar en la bandeja hidráulica; para siete valores diferentes de voltaje.

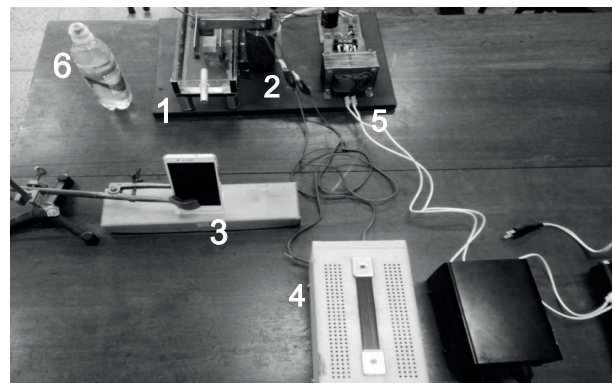


Figura 2 Disposición del equipo experimental para la determinación de la velocidad de flujo de fluido (1) Bandeja hidráulica, (2) Electroimán, (3) Cámara de video digital, (4) Fuente de voltaje DC 0-30 V para el electroimán, (5) Fuente de Voltaje para las placas conductoras, (6) Agua de mar.

Utilizamos el software Vernier para el análisis de los videos registrados a fin de obtener experimentalmente la componente de la velocidad que genera el flujo másico \dot{m} en kg/s midiendo la sección transversal S en metros cuadrados por donde pasa el flujo de agua de mar utilizando la siguiente expresión:

$$\dot{m} = \rho u_d S \quad (10)$$

finalmente determinamos el empuje F producido en Newton utilizando la siguiente expresión (2):

$$F = \dot{m}(\beta_d u_d - \beta_\infty u_\infty) \quad (11)$$

Para nuestro caso $\beta_d=1$ por considerar flujo constante, u_d es la velocidad del fluido al interior del propulsor la cual vamos a determinar y $u_\infty=0$ es la velocidad del sistema propulsor que en este caso está en condiciones estáticas. Quedando la ecuación (11) como:

$$F = \dot{m} u_d \quad (12)$$

Resultados

Para siete valores de diferencia de potencial entre las placas conductoras de acero inoxidable no magnético con un campo magnético constante de 16,7 mT producido por el electroimán, se registró y se procesó la información para la obtención de la velocidad del flujo de fluido por análisis de video conforme se muestra en la figura 3.

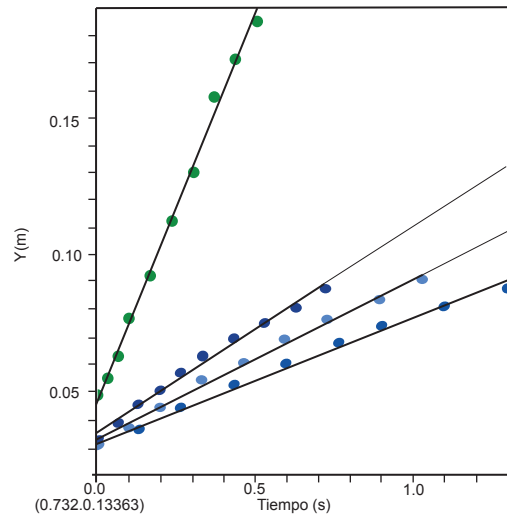
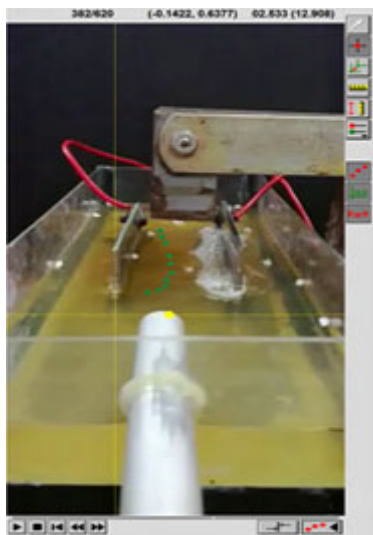


Figura 3. Registro de la posición de las partículas dieléctricas utilizando el procesamiento de video para determinar la velocidad del flujo de fluido. A la derecha el registro de posición en función del tiempo para cuatro valores de diferencia de potencial con su respectivo ajuste lineal.

Considerando la densidad del agua de mar $\rho = 1027 \text{ kg/m}^3$ la superficie transversal del propulsor $S = 6,25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ y utilizando la ecuación (2.3) se obtuvo lo mostrado en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados del procesamiento de los videos para determinar la velocidad de flujo de fluido y el cálculo del empuje generado por el propulsor.

Voltaje (V)	Velocidad (m/s)	Empuje (mN)
5,0	0,0412	1,09
10	0,0633	2,57
15	0,0656	2,76
20	0,0685	3,01
25	0,0756	3,67
30	0,0770	3,81

Si graficamos el voltaje aplicado en función del empuje determinado de la tabla 1 obtenemos:

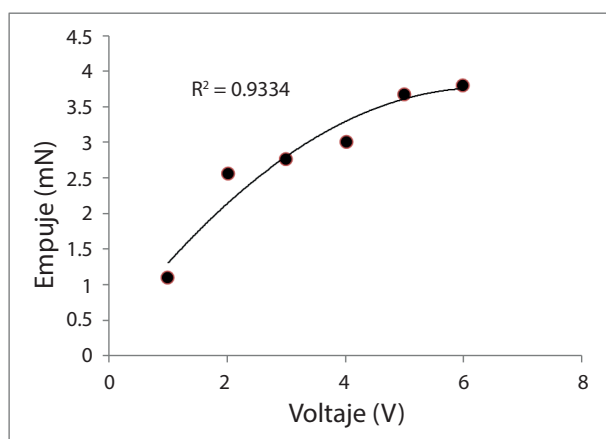


Figura 4. Gráfico de relación del voltaje aplicado a las placas y el empuje generado por el propulsor en condiciones estáticas

Vemos en la figura 4 que la dependencia entre el voltaje y el empuje obtenido obedece a un ajuste cuadrático por presentar un mayor valor de R^2 con respecto a la tendencia lineal.

Discusión

El sistema de propulsión magnetohidrodinámica construido nos muestra con claridad la interacción del agua de mar con la fuerza de Lorentz produciendo el movimiento del flujo de fluido que lo podemos apreciar gracias a que el electroimán en forma de C nos provee una zona de luz en donde se encuentra el campo magnético, este flujo de fluido lo pudimos cuantificar determinando experimentalmente la velocidad del flujo a través del análisis de video.

La fuente de campo magnético limita la obtención de campos más intensos por la histéresis que presentan las placas de acero laminado, trabajar con materiales superconductores sería ideal pero por los costos y poca o ninguna disponibilidad en el mercado nacional es por ahora irrealizable, la propuesta factible sería de trabajar con imanes permanentes como los de Neodimio que en la práctica producen campos magnéticos más intensos.

Bajo condiciones ideales que es una buena aproximación al fenómeno estudiado podemos

determinar el empuje, este parámetro nos ayuda a cuantificar la fuerza útil que disponemos para producir el movimiento de modelos de naves en agua de mar.

Los resultados obtenidos nos alientan a plantear y trabajar ya en modelos de naves marinas como barcos o submarinos con propulsión magnetohidrodinámica que es una alternativa a los sistemas de propulsión convencionales.

Al graficar el empuje en función del voltaje encontramos que obedece a una relación cuadrática invertida, lo que nos hace plantear la hipótesis de que para este sistema manteniendo el campo magnético constante se presenta un máximo de empuje para un voltaje determinado.

Podemos concluir finalmente en relación a este trabajo experimental que es factible la construcción de un sistema propulsor magnetohidrodinámico que muestra el trabajo que realiza la fuerza de Lorentz sobre el fluido conductor como el agua de mar y que el análisis de video es una herramienta muy importante para la determinación del empuje a través de la determinación experimental de la velocidad del flujo de fluido.

Referencias bibliográficas

- 1 Electromagnetic propulsion for cargo submarines. S, Way. 2, 1968, Vol. 2, págs. 49-57.
- 2 Experimental and theoretical study of magnetohydrodynamic ship models. David Cebon, Sylvain Viroulet, Jeremie Vidal, Jean-Paul Masson, Philippe Viroulet. [ed.] Massachusetts Institute of Technology Ming Dao. Qimper : s.n., 30 de June de 2017, Journal, pone.
- 3 Studies of helical magnetohydrodynamic seawater flow in fields up to twelve teslas. Lin TF, Gilbert JB. 6, 1995, Journal of Propulsion and Power, Vol. 11, págs. 1349-1355.
- 4 Elementary study on superconducting electromagnetic ships with helical

- insulation wall. Nishigaki K, Sha C, Takeda M, Peng Y, Zhou K, Yang A, et al. 40, 2000, Cryogenics, Vol. 6, págs. 353-359.
- 5 Motion of a plane plate of finite width in a viscous conductive liquid, produced by electromagnetic forces. Khonichev VI, Yakovlev VI. 1, 1980, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Vol. 21, págs. 77-84.
 - 6 Magnetohydrodynamic submarine propulsion systems. Swallon DW, Sadovnik I, Gibbs JS, Gurol H, Nguyen LV, Van Den B, et al. 103, 1991, Naval Engineers Journal, Vol. 3, págs. 141-157.
 - 7 Motion of a sphere in an infinite conductive fluid, produced by a variable magnetic dipole located within the sphere. Khonichev VI, Yakovlev VI. 6, 1978, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Vol. 19.
 - 8 Weier T, Shatrov V, Gerbeth G. Flow control and propulsion in poor conductors. In: Magnetohydrodynamics. s.l. : Springer, 2007. págs. 295-312.
 - 9 Magnetohydrodynamics propulsion: a global approach of an inner DC thruster. Energy conversion and management. P, Boissonneau. 17, 1999, Vol. 40, págs. 1783-1802.

Correo electrónico: ndiaz@unav.pe