

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y DE ENERGÍA**

**UNIDAD DE INVESTIGACIÓN**



**INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**“MODELO DE MINISUBMARINO CON PROPULSIÓN  
MAGNETOHIDRODINAMICA”**

**AUTOR: Nelson Alberto Diaz Leiva**

**PERIODO DE EJECUCIÓN: Del 01 de mayo de 2018 al 30 de abril de 2020**

**Resolución de aprobación N° 475-2018-R**

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'A. Leiva'.

**Callao, 2020**

*Am*

## DEDICATORIA

A mi Esposa Flor, mis Hijas Dianaliz y Claudia quienes con su amor, comprensión y apoyo invaluable, me alentaron a realizar este proyecto que lo tenía en mente desde hace mucho tiempo y que se ha convertido en una gratificante realidad.

A handwritten signature in black ink, appearing to be the name 'Ama', written in a cursive style with a horizontal line extending to the right.

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue patrocinado por el fondo de desarrollo en ciencia y tecnología de la Universidad Nacional del Callao, a través del Vicerrectorado de investigación y de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería Mecánica y de Energía.

Los datos experimentales los obtuvimos utilizando los equipos de los Laboratorios de Física de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas.

A mis colegas de Física e Ingeniería de la Universidad Nacional del Callao quienes con su apoyo y recomendaciones hicieron posible la culminación de este proyecto.

A mis estudiantes de la Facultad de Ingeniería Mecánica y de Energía, quienes con su ímpetu indismayable por aprender e investigar en campos relacionados con su formación profesional apoyaron con sus conocimientos y trabajo en la realización de este proyecto

A handwritten signature in black ink, appearing to be the name 'Andrés', written in a cursive style.

# TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	5
1.1. Descripción de la realidad problemática .....	5
1.2. Formulación del problema (problema general y específicos si los hubiera) ..	6
1.2.1. Problema general .....	6
1.2.2. Problemas específicos .....	6
1.3. Objetivos .....	6
1.3.1. Objetivo General .....	7
1.3.2. Objetivos Específicos .....	7
1.4. Limitantes de la investigación .....	7
1.4.1. Limitantes de la investigación teórica .....	7
1.4.2. Limitantes de la investigación temporal .....	7
1.4.3. Limitantes de la investigación espacial .....	7
II. MARCO TEÓRICO .....	8
2.1. Antecedentes .....	8
2.1.1. Internacional .....	8
2.1.2. Nacional .....	9
2.2. Marco .....	9
2.2.1. Marco Teórico .....	9
2.2.2. Marco conceptual .....	12
La fuerza de Lorentz y la Magnetohidrodinámica .....	12
Funcionamiento de un Propulsor MHD en un buque .....	13
2.3. Definición de términos básicos .....	15
2.3.1. Sistema .....	15
2.3.2. Propulsión .....	15
2.3.3. Empuje magnetohidrodinámico .....	15
2.3.4. Modelo de minisubmarino .....	15
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES .....	15
3.1. Hipótesis .....	15
3.1.1. Hipótesis General .....	15
3.1.2. Hipótesis Específicas .....	16
3.2. Definición conceptual de variables .....	16
3.2.1. Variable Independiente X: .....	16
3.2.2. Variable dependiente Y: .....	16
3.3. Operacionalización de variables .....	16
3.3.1. Sistema de propulsión magnetohidrodinámico para modelo de minisubmarino: .....	16

3.3.2. Modelo de minisubmarino: .....	17
IV. DISEÑO METODOLÓGICO .....	17
4.1. Tipo y diseño de la investigación .....	17
4.1.1. Tipo de Investigación. ....	17
4.1.2. Diseño de investigación. ....	17
4.2. Método de investigación .....	17
(a) Determinación del campo magnético. ....	19
(b) Determinación del campo Eléctrico. ....	20
(c) Determinación del empuje .....	20
(d) Principio de Inmersión de un minisubmarino .....	25
4.3. Población y muestra .....	26
4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado.....	26
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información. ....	26
4.6. Análisis y procesamiento de datos. ....	26
V. RESULTADOS.....	26
5.1. Resultados descriptivos.....	26
5.1.1. Para el casco del modelo de minisubmarino .....	26
5.1.2. Para el propulsor MHD .....	27
5.2. Resultados inferenciales .....	28
5.3. Resultados experimentales .....	30
5.3.1. De las pruebas estáticas del propulsor. ....	31
5.3.2. Del modelo de minisubmarino con propulsión MHD.....	33
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	35
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados .....	35
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares. ....	36
6.3. Responsabilidad ética .....	37
CONCLUSIONES .....	37
RECOMENDACIONES .....	38
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	39
ANEXOS A:Matriz de consistencia.....	42
Anexo B: Planos de las partes del prototipo de modelo de minisubmarino. Cola del prototipo.....	43
Anexo C. Primer prototipo de casco del propulsor MHD .....	44
Anexo D. Prototipo final del casco del propulsor MHD .....	45
Anexo E: Fotografías .....	46
ANEXO F: Registros Experimentales del propulsor canal derecho: .....	47
ANEXO G: Registros Experimentales del propulsor canal izquierdo: .....	48
ANEXO H: Registros Experimentales del modelo de minisubmarino .....	49



## RESUMEN

Los sistemas de propulsión magnetohidrodinámica para embarcaciones marinas tienen ventajas significativas sobre la propulsión por hélice, tales como menor ruido, maniobrabilidad, eliminación de límites de cavitación, mayor capacidad de carga útil, y constituye otra opción de sistema de propulsión alternativo.

Utilizamos un modelo de minisubmarino con simetría cilíndrica el sistema de propulsión tiene simetría rectangular con dos canales de propulsión independientes que juntas generan una potencia de propulsión de  $233 \mu W$ , con campos magnéticos uniformes de  $0,100 T$  entre dos imanes permanentes de Neodimio paralelos y un campo eléctrico generado entre dos placas paralelas conductoras de acero inoxidable desmagnetizadas alimentada con una fuente de voltaje de corriente continua de  $12,0$  Voltios, que produce un campo eléctrico uniforme de aproximadamente  $429 V/m$ .

El propulsor con doble salida genera una potencia de propulsión que vence satisfactoriamente la resistencia al avance por arrastre que ofrece el agua de mar al modelo de minisubmarino de  $202 \mu W$ , generando una rapidez de avance de aproximadamente  $0,0224 m/s$ . Este sistema de propulsión magnetohidrodinámica ofrece una alternativa de propulsión submarina que puede ser una contribución importante al desarrollo de las naves marinas en el país.

Palabras clave: Modelo de minisubmarino, Propulsión Magnetohidrodinamica, Potencia de arrastre.



## ABSTRACT

Magnetohydrodynamic propulsion systems for marine vessels have significant advantages over propeller propulsion, such as lower noise, manoeuvrability, removal of cavitation limits, higher payload capacity, and is another alternative propulsion system option.

We use a model of minisubmarine with cylindrical symmetry the propulsion system has rectangular symmetry with two independent propulsion channels that together generate a propulsion power of 233  $\mu\text{W}$ , with uniform magnetic fields of 0,100 T between two parallel permanent Neodymium magnets and an electric field generated between two demagnetized stainless steel conducting parallel plates powered by a 12,0 DC voltage source Volts, which produces a uniform electric field of approximately 429 V/m.

The dual-output propellant generates propulsion power that satisfactorily overcomes the drag-forward strength offered by seawater to the 202  $\mu\text{W}$  minisubmarine model, generating a feed rate of approximately 0,0224 m/s. This magnetohydrodynamic propulsion system offers an alternative underwater propulsion that can be an important contribution to the development of marine vessels in the country.

Keywords: Minisubmarine model, Magnetohydrodynamic propulsion, Drag power.



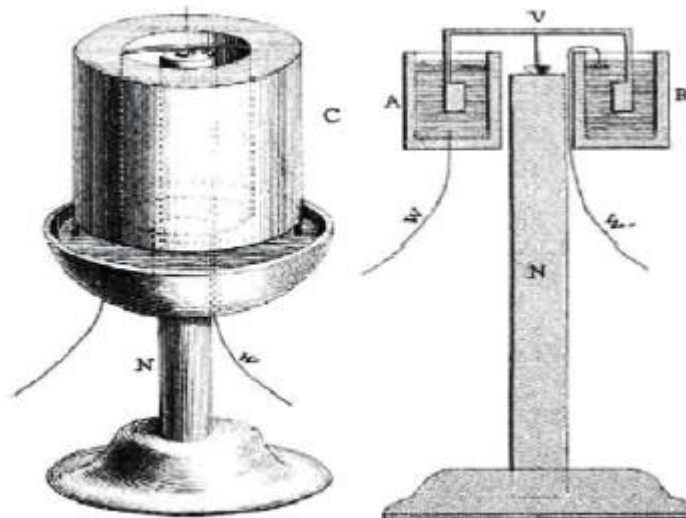


## INTRODUCCIÓN

La posibilidad ofrecida de actuar para producir movimiento sobre un flujo de fluidos sin hacer contacto por la magnetohidrodinámica (MHD), estimuló relativamente temprano la imaginación de Físicos, Ingenieros Aerodinámicos y Navales.

W. Ritchie [1] parece ser el primero en utilizar fuerzas electromagnéticas para bombear electrolitos en 1832. La figura 1 muestra dos de sus aparatos. Básicamente, el componente de campo magnético horizontal cerca del polo de un imán permanente (N) interactúa con el campo eléctrico principalmente vertical entre dos electrodos en forma de anillo (w, w) en cuyo interior hay ácido diluido en cavidad cilíndrica (AB) en movimiento de rotación.

Figura 1. Columnas electrolíticas de Ritchie con movimiento rotacional accionadas electromagnéticamente.



Fuente: W. Ritchie, «Experimental researches in voltaic electricity and electromagnetism,» *Phil Trans Roy Soc London*, nº 122, pp. 279-298, 1832.

En la década de 1950, una multitud de aplicaciones aeroespaciales de las técnicas de control de flujo de MHD se ha previsto utilizando el hecho de que a velocidades lo suficientemente altas el aire se ioniza por la acción de ondas de choque y el calentamiento por fricción, y por lo tanto se convierte en un conductor. Tales condiciones de alta-velocidad son típicas para los problemas de reingreso. Resler y Sears [2] y Busemann [3] propusieron, entre otras cosas, utilizar campos magnéticos para controlar la transferencia de calor, desacelerar o acelerar los vehículos y evitar la separación de los flujos. Aunque el entusiasmo por la aplicación

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'A. ...'.

práctica de estas ideas disminuyó más adelante, el tema está ahora de nuevo bajo investigación en relación con el estatorreactor de combustión supersónica (scramjets) [4, 5], para la mitigación de transferencia de calor [6] y frenado electromagnético para vehículos de reingreso [7]. Una visión general de la investigación magnetoaerodinámica (MAD) se puede encontrar en los procedimientos de una reciente serie de conferencias del Instituto Von Kármán [8]. En la actualidad, la discusión se limita a fluidos incomprensibles, principalmente agua de mar.

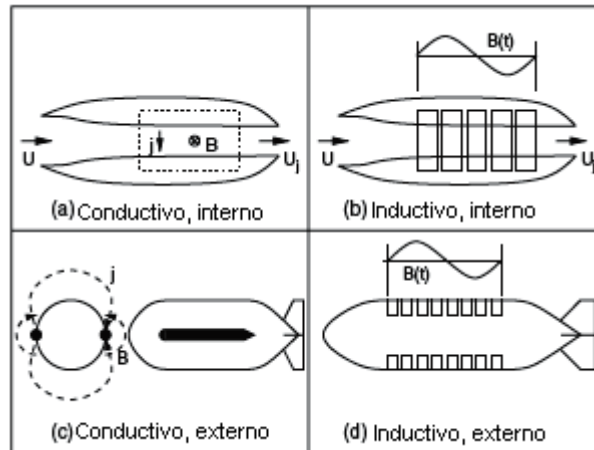
La propulsión electromagnética en agua de mar ha sido propuesta por Rice [9] ya en 1961. Según Friauf [10] y Way [11] la idea había atraído la atención de varios inventores en ese momento. La razón principal de esta atracción ha sido el principio de funcionamiento aparentemente elegante sin partes móviles. Las aplicaciones propuestas incluyen la propulsión silenciosa de submarinos navales [12], el uso en submarinos de carga de alta velocidad [11], y la propulsión de futuros buques de superficie de alta velocidad sin el peligro de cavitación [13].

Convencionalmente [14, 11], los métodos de propulsión electromagnética se subdividen en cuatro grupos, como se muestra esquemáticamente en la Figura 2. Si se imponen los campos eléctricos y magnéticos, el esquema de propulsión se denomina "conductivo" (Figura. 2 (a), (c)); si sólo se aplica un campo magnético alternante, el método se conoce como "inductivo" (Figura 2 (b), (d)). Los sistemas de flujo interno (Figura 2 (a), (b)) utilizan un conducto con una bomba electromagnética, mientras que los campos penetran en el mar circundante para sistemas externos (Figura 2 (c), (d)).

La disposición de electrodos e imanes empotrados y montados al ras sugeridos por Rice [9], y mostrada en la Figura 3, pertenece a la categoría c, la propulsión conductiva externa. En 1966, Way [11] construyó un submarino modelo llamado EMS-1 con un propulsor electromagnético del tipo conductor externo en la Universidad de California, Santa Barbara. El modelo era de aproximadamente 3m de largo y tenía un desplazamiento de aproximadamente 400 kg. Un electroimán dipolo proporcionó una inducción magnética en el casco de 0.015 T. Alimentado por el plomo-baterías ácidas, el submarino alcanzó una velocidad máxima de aproximadamente 0.8 nudos (0.4m/s).

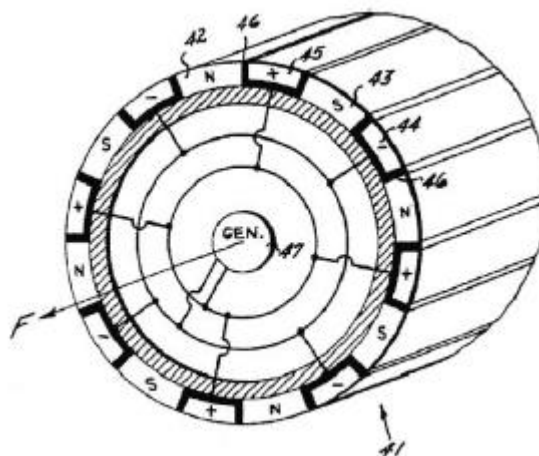


Figura 2. Clasificación de los métodos de propulsión electromagnética.



Fuente: S. Way, «Electromagnetic propulsion for cargo submarines,» *AIAA-paper* 1963, p. 0363, 1967.

Figura 3. Disposición de electrodos (45) e imanes permanentes (42) propuesta por Rice para propulsar un cuerpo cilíndrico en agua de mar.



Fuente: W. Rice, «Propulsion system,» *US Patent*, pp. 2,997,013, 1961.

Este experimento incluso llamó la atención de los medios de comunicación en ese momento. No obstante, además de la posibilidad principal de propulsar un buque marítimo por las fuerzas electromagnéticas, algunos problemas fundamentales inherentes a la propulsión electromagnética en el agua de mar, ya señalados por Friauf [10] y Phillips [15], ahora se han demostrado en la práctica. Especialmente, la proporción desfavorable de la entrada de energía a los impulsos disponibles era sorprendente. Después de un período de investigación activa, las actividades estadounidenses en propulsión electromagnética disminuyeron, aparentemente hacia finales de los años 60.

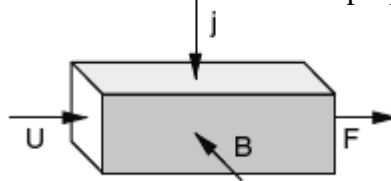
La razón del déficit de eficiencia se explica fácilmente. Independientemente del método de propulsión electromagnética, la densidad de fuerza de Lorentz  $f$  ( $N/m^3$ ) que produce el empuje se debe a una densidad de corriente  $j$  y una inducción magnética  $B$ , a saber

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (1)$$

Puesto que en las aplicaciones de agua de mar el número magnético de Reynolds es pequeño, los campos magnéticos inducidos se pueden despreciar y  $B$  se convierte en el campo aplicado solamente. La densidad de corriente está dada por la ley de Ohm

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{U} \times \vec{B}) \quad (2)$$

Figura 4 Principio de funcionamiento de un propulsor conductor interno



Fuente: Elaboración propia.

Aquí,  $E$  denota la intensidad del campo eléctrico,  $U$  la velocidad del campo de flujo, y  $\sigma$  la conductividad eléctrica del medio, respectivamente. Debido a su sencillez, se elige la propulsión conductiva interna (tipo a) como se describe en la Figura 4 para ilustrar los principales criterios de rendimiento de la propulsión electromagnética en agua de mar siguiendo Thibault [16].

De interés primario son la entrada de energía necesaria para lograr un empuje específico (balance de energía) y el empuje total disponible para impulsar la nave a una velocidad específica (balance de impulso). El empuje por volumen unitario equivale a la densidad de fuerza de Lorentz con el valor absoluto  $f = jB$  ( $f = |f|$ ) en el caso esbozado en la Fig. 4, suponiendo campos electromagnéticos de flujos uniformes y ortogonales. La eficiencia eléctrica ideal  $\eta$  es la relación de potencia propulsora o empuje por unidad de volumen  $p_T = jBU$  a la potencia total suministrada por unidad de volumen  $p_E = jE$ , donde  $U$  denota la velocidad de flujo y  $E$  la intensidad del campo eléctrico. Esto da como resultado:

$$\eta = \frac{p_T}{p_E} = \frac{UB}{E} = \frac{1}{\phi} \quad (3)$$

Por lo tanto, tenemos que la eficiencia ideal es la inversa del factor de carga  $\phi$

$$\phi = \frac{E}{UB} \quad (4)$$

Dando la relación entre E aplicado y el campo eléctrico inducido de producto UB [17]. Expresando la densidad de corriente en la Ecuación (1) por la ley de Ohm (2) y teniendo en cuenta que el campo eléctrico inducido actúa contra el aplicado, el empuje electromagnético total F se puede expresar como sigue:

$$F = \sigma UB^2(\phi - 1)V \quad (5)$$

Aquí V denota el volumen del conducto. Así, para una eficiencia ideal máxima ( $\eta = \phi = 1$ ), el empuje alcanzable es cero. Sin embargo, para propulsar un recipiente, el arrastre hidrodinámico total D generalmente no-cero tiene que ser equilibrado por el empuje. En una estimación aproximada, el arrastre total en flujos turbulentos es proporcional al cuadrado de la velocidad de flujo:  $D = kU^2$ . Teniendo en cuenta la relación  $D = F$  y las ecuaciones (3) y (5), se deduce que la eficiencia eléctrica ideal es:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{kU}{\sigma VB^2}} \quad (6)$$

Para maximizar la eficiencia a una velocidad determinada U, el producto  $V B^2$  debe elegirse lo más amplio posible. Esto se ha realizado bastante pronto. Doragh, consciente de la necesidad de campos magnéticos elevados, sugirió utilizar imanes superconductores ya en 1963 [18].

## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Descripción de la realidad problemática

Muchos de los sistemas de propulsión del futuro así como subsistemas bajo investigación actual trabajan con campos magnéticos para contención, dirección y control de flujo de líquidos, gases calientes y plasmas. Incluidos están los sistemas de propulsión de líquidos ionizados, fusión nuclear (eléctrico y núcleo de gas), plasma y sistemas pulsados de plasma/nuclear.

Dentro de los sistemas de propulsión de naves marítimas en nuestro medio solo trabajan con sistemas de propulsión electromecánica es decir con hélices como



elemento propulsor accionados por un motor diesel o eléctrico. En el presente proyecto planteamos construir un modelo de minisubmarino con propulsión magnetohidrodinámica que trabaja con campos electromagnéticos utilizando como fluidos ionizados el agua de mar.

El Perú limita al Oeste con el Océano Pacífico por lo que cuenta con un extenso litoral costero de 2850 km donde tenemos una riqueza marina que debemos explotar y cautelar con nuestras Naves militares que tiene una tradición submarinista reconocida por ser el primer país de América del Sur [19] en utilizar submarinos (dos unidades clase Labeuf construidas por los astilleros Schneider) en 1911.

Actualmente el SIMA – Perú ubicada en el Callao cuenta con un moderno hangar de submarinos donde se están modernizando cuatro submarinos, con nuevos sistemas de guerra electrónica los buques son B.A.P. Angamos, Chipana, Antofagasta y Pisagua gracias a un contrato firmado con la empresa Alemana Thyssenkrupp Marine Systems [20]. Nuestra universidad no puede mantenerse al margen del desarrollo de nuevos sistemas de propulsión marina ni de los avances tecnológicos en la construcción de submarinos, por lo que este trabajo pretende familiarizarnos con los conceptos básicos de la electrodinámica, así como investigar este sistema de propulsión magnetohidrodinámica para aplicarlos en naves submarinas. La facultad de Ingeniería Mecánica y de Energía debe mantenerse vigente en estos procesos haciendo uso de la construcción de modelos con máquinas y herramientas modernas automatizadas que simplifican y disminuyen el costo y tiempo de fabricación para facilitar el análisis de funcionamiento del modelo de minisubmarino con propulsión magnetohidrodinámica relacionada con las variables electromagnéticas y de la mecánica de fluidos.

## 1.2. Formulación del problema (problema general y específicos si los hubiera)

### 1.2.1. Problema general

¿Cómo construir un modelo de minisubmarino con propulsión magnetohidrodinámica?

### 1.2.2. Problemas específicos

¿Cómo construir un modelo mini submarino?

¿Cómo construir un sistema de propulsión magnetohidrodinámica para un modelo de minisubmarino?

## 1.3. Objetivos



#### 1.3.1. Objetivo General

Construir un modelo de minisubmarino con propulsión magnetohidrodinámica.

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

Construir un modelo de minisubmarino.

Construir un sistema de propulsión magnetohidrodinámica para un modelo de mini submarino.

#### 1.4. Limitantes de la investigación.

##### 1.4.1. Limitantes de la investigación teórica.

El desarrollo del sistema de propulsión magnetohidrodinámica puede considerarse una aplicación de alto riesgo y alta rentabilidad de la tecnología avanzada para proporcionar mejoras revolucionarias en el sigilo submarino y la eficacia de la misión. Ninguno de los resultados numéricos que se presentan en el presente documento se ha verificado mediante ensayos de prototipos en alta mar. Como se indica en la introducción, las eficiencias y el rendimiento de propulsión pueden ser calculados con valores mayores que el sistema real. En el área de hidrodinámica, el propulsor es compatible con el uso de cualquier técnica de control de flujo laminar propuesto. En las áreas de sigilo y velocidad, el propulsor magnetohidrodinámico ofrece el potencial de una firma acústica muy reducida y una firma de activación sustancialmente reducida.

##### 1.4.2. Limitantes de la investigación temporal.

En este caso la limitación temporal vendría dada por el desgaste que sufren las placas de acero inoxidable al producirse las reacciones electroquímicas con el agua de mar, también afectaría a los imanes permanentes de Neodimio que al interactuar con el agua de mar se corroen rápidamente, afectando la intensidad y regularidad del campo magnético.

##### 1.4.3. Limitantes de la investigación espacial.

Para evaluar la performance del modelo de submarino con propulsión MHD, se necesita de un recipiente de laboratorio con una longitud apreciable mucho mayor que la longitud del prototipo, así como una alimentación de energía a través de baterías y control inalámbrico.



## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

#### 2.1.1. Internacional

Entre los antecedentes internacionales tenemos a Armo Pohjavirta y Lauri Kettunen presentan un estudio comprensivo de factibilidad computacional [21], para un propulsor electromagnético tipo externo para propulsión de naves marinas. Un propulsor previamente presentado en la literatura es modelada de forma tal que mantiene el cálculo de potencia necesario en límites razonables a pesar de la amplia cobertura de eficiencias estimadas. Para este propósito se adopta una aproximación bidimensional. También muestra como generalizar los resultados para navíos similares por medio de modelamiento. La salinidad del agua y la densidad de flujo magnético generado por las bobinas son incluidas en el modelo a escala. Los resultados son presentados en una forma sencilla para comparar con los propulsores convencionales de barcos. Así mismo D. L. Mitchell y D.U. Gubser [22] revisaron la factibilidad de la propulsión magnetohidrodinámica (MHD) para naves marinas a la luz de los recientes avances de la superconductividad a altas temperaturas. Las relaciones de escala para las eficiencias eléctricas e hidráulicas de motores de bomba MHD muestran que en general eficiencias  $> 50\%$  son factibles a velocidades de 40 nudos (20,6 m/s) y eficiencias más altas proporcionados por los campos magnéticos  $> 5$  T pueden ser mantenidos sobre volúmenes de propulsión del orden de  $100 \text{ m}^3$ . El desarrollo de maquinaria eléctrica a gran escala y manetos usando superconductores a alta temperatura ahora bajo desarrollo podrían hacer que sea práctico construir sumergibles de alta velocidad y operación silenciosa. Los petroleros de baja velocidad para el movimiento de carga en grandes cantidades serían eficientes aun con campos más bajos. Por otro lado Daniel W. Swallow y colaboradores [23], mencionan que el uso de los propulsores magnetohidrodinámicos recibió considerable publicidad por el supuesto sistema de movimiento del avanzado submarino soviético destacado en la película: "La caza del Octubre Rojo". En un tema más serio, su trabajo





emprende un análisis de la aplicación de este tipo de sistema de propulsión para submarinos. Ellos afirman que el MHD promete importantes contribuciones al desarrollo de la fuerza de submarinos del siglo XXI y su trabajo representa una contribución constructiva para el debate que sería centro inevitable de esta proposición.

#### 2.1.2. Nacional

El antecedente nacional más reciente en trabajos de magnetohidrodinámica lo presenta N. Diaz [24] muestra la construcción 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 utilizando un arreglo de placas planas paralelas de acero inoxidable sometida a una "diferencia de potencial entre 5,00 V- 48,0 V, Este empuje magnetohidrodinámico se determinó a través de la medición experimental de la velocidad del flujo que circula entre las placas conductoras utilizando software para análisis de video, para diferentes valores de diferencia de potencial entre las placas conductoras, manteniendo el valor de campo magnético constante obteniéndose valores de empuje entre 1,09 hasta 6,55 mN.

#### 2.2. Marco

##### 2.2.1. Marco Teórico

El trabajo realizado se fundamenta en la concepción filosófica del positivismo, relacionado con el concepto de realidad, como representación y como entidad influenciada por el observador. Más aún, el investigador debe seleccionar entre diferentes marcos explicativos, pues lo real no puede ser abordado por medio de un único aparato teórico y metodológico [25]. La explicación de la realidad que significa en este caso demostrar la posibilidad de propulsión utilizando la fuerza de Lorentz, también la podemos abordar desde el enfoque teórico de conservación de la energía. El propulsor magnetohidrodinámico trabaja con campos eléctricos y magnéticos estacionarios aplicados a un volumen definido de fluido (agua de mar) en constante movimiento, haremos un breve análisis de las energías que portan estos campos, ahora



la energía eléctrica almacenada por un condensador de placas planas paralelas está dada por:

$$U = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} Q \Delta V = \frac{1}{2} C (\Delta V)^2 \quad (7)$$

Podemos considerar la energía almacenada en un condensador como almacenado en el campo eléctrico creado en el volumen entre las placas a medida que se carga el condensador. Esta descripción es razonable porque el campo eléctrico es proporcional a la carga del condensador. Para un condensador de placas planas paralelas de área  $A$  separadas una distancia  $d$ , la diferencia de potencial está relacionada con el campo eléctrico a través de la relación  $\Delta V = Ed$ . Además, su capacitancia es  $C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$  con  $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$  como la permisividad eléctrica del vacío. Sustituyendo estas expresiones en la Ecuación (7), obtenemos:

$$U = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 A}{d} (E^2 d^2) = \frac{1}{2} (\varepsilon_0 A d) E^2$$

Debido a que el volumen ocupado por el campo eléctrico es  $Ad$ , la energía por unidad de volumen  $u_E = \frac{U}{Ad}$ , conocido como la densidad de energía expresada en el Sistema Internacional de unidades en  $J/m^3$ , es:

$$u_E = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 \quad (8)$$

Aunque la Ecuación (8) fue derivada para un condensador de placas paralelas, la expresión es generalmente válida, independientemente de la fuente del campo eléctrico. Es decir, la densidad de energía en cualquier campo eléctrico es proporcional al cuadrado de la magnitud del campo eléctrico en un punto dado.

Para el agua de mar tenemos que la permitividad eléctrica relativa es:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = 70 \quad (9)$$

Para el caso de la energía magnética tenemos de manera similar que para un inductor:

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \quad (10)$$

Donde  $L$  es constante e  $I$  es la intensidad de corriente eléctrica que circula en el inductor. Esta expresión representa la energía almacenada en el campo magnético del inductor. Note que esta ecuación es similar en forma a la Ecuación (7) para la energía almacenada en el campo eléctrico de un condensador:



$$U = \frac{1}{2} C(\Delta V)^2$$

En cualquier caso, vemos que se requiere energía para establecer un campo.

También podemos determinar la densidad de energía de un campo magnético. Para simplificar, considere un solenoide de sección transversal  $A$ , longitud  $l$  y  $n$  el número de vueltas por unidad de longitud cuya inductancia es:

$$L = \mu_0 n^2 Al$$

Con  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$  como la permisibilidad magnética del vacío. El campo magnético de un solenoide viene dado por:

$$B = \mu_0 nI$$

Substituyendo la expresión para  $L$  e  $I = \frac{B}{\mu_0 n}$  en la ecuación (9) da:

$$U = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \mu_0 n^2 Al \left( \frac{B}{\mu_0 n} \right)^2 = \frac{B^2}{2\mu_0} Al$$

Donde  $Al$  es el volumen del solenoide, la densidad de energía magnética, o la energía almacenada por unidad de volumen para el campo magnético del inductor es

$$u_B = \frac{U}{Al} = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (10)$$

Aunque esta expresión se derivó para el caso especial de un solenoide, es válida para cualquier región del espacio en el que exista un campo magnético. Ahora la densidad de energía total al considerar los campos eléctricos y magnéticos estacionarios estaría dada por [26]:

$$u_T = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{B^2}{2\mu_0}$$

Para el caso ideal de conservación de energía en un sistema sin pérdidas se debe cumplir que:

$$\frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{1}{2} \rho v^2$$

A los fines prácticos, la permeabilidad magnética del aire o del agua es  $\mu_0$ , para el caso de la permeabilidad eléctrica del agua de mar es  $70\epsilon_0$ , por lo tanto



$$\begin{aligned}
u_T &= \frac{1}{2} (70 \times 8,85 \times 10^{-12}) \times (429)^2 + \frac{0.1^2}{2 \times 4\pi \times 10^{-7}} \\
&= 3,98 \frac{kJ}{m^3} \\
3,98 \times 10^3 &= \frac{1}{2} \times 1030 \times v^2 \\
v &= 2,78 \frac{m}{s}
\end{aligned}$$

Que sería la velocidad obtenida por un propulsor en condiciones ideales, la realidad es que en el propulsor MHD se comporta como un sistema abierto o volumen de control donde se presenta transferencia de calor, transferencia de masa en las reacciones electroquímicas así como variación de energía interna pérdidas que disminuyen significativamente la velocidad del flujo de fluido.

### 2.2.2. Marco conceptual

La fuerza de Lorentz y la Magnetohidrodinámica

En un campo eléctrico, la definición de intensidad de campo eléctrico muestra que la fuerza sobre una partícula cargada es

$$\vec{F} = Q\vec{E} \quad (11)$$

La fuerza está en la misma dirección que la intensidad del campo eléctrico (para una carga positiva), y es directamente proporcional a E y Q. Si la carga está en movimiento, la fuerza en cualquier punto de su trayectoria estará dada también por la ecuación anterior [23].

Experimentalmente, se encuentra que una partícula cargada y en movimiento, en un campo magnético de densidad de flujo B, experimenta una fuerza cuya magnitud es proporcional al producto de las magnitudes de la carga Q, su velocidad v, la densidad de flujo B y el seno del ángulo comprendido entre los dos vectores. La dirección de la fuerza es perpendicular a v y B, y está dada por un vector unitario en la dirección de  $\vec{v} \times \vec{B}$ . La fuerza puede expresarse como:

$$\vec{F} = Q\vec{v} \times \vec{B} \quad (12)$$

Esto muestra una diferencia fundamental en el efecto de los campos eléctrico y magnético sobre partículas cargadas, puesto que la fuerza, que siempre se aplica en una dirección perpendicular a la dirección en la cual la partícula se mueve, la velocidad nunca cambiará su magnitud. En otras



palabras, el vector aceleración es siempre normal al vector velocidad. La energía cinética de la partícula permanece invariable, y de esto se sigue que el campo magnético estable es incapaz de transferir energía a la carga en movimiento. El campo eléctrico, por otra parte, ejerce una fuerza sobre la partícula que es independiente de la dirección en la cual la partícula está avanzando y por tanto efectúa una transferencia de energía entre el campo y la partícula, por lo general.

La fuerza sobre una partícula en movimiento debido a campos eléctricos y magnéticos combinados se obtiene fácilmente por superposición.

$$\vec{F} = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (13)$$

Esta ecuación se conoce como la ecuación de la fuerza de Lorentz, y su empleo se requiere para la determinación de las órbitas del electrón en el magnetrón, las trayectorias del protón en el ciclotrón, de las características del fluido en el generador magnetohidrodinámico (MHD), ó, en general, en el movimiento de partículas cargadas en campos eléctricos y magnéticos combinados.

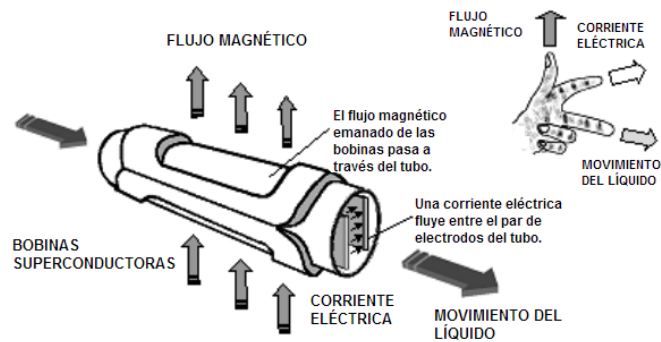
Funcionamiento de un Propulsor MHD en un buque

El motor MHD funciona bajo el mismo principio que un generador MHD, la diferencia está que en el primero se ingresa un gas ionizado para producir corriente eléctrica, ahora se usa corriente eléctrica y el mismo campo magnético para mover a las partículas de un fluido ionizado [27].

En lugar de una hélice ó paletas propulsoras, se usa un chorro de agua producido por un sistema de propulsión magnetohidrodinámico (MHD). La tecnología MHD está basada en una ley fundamental del electromagnetismo: cuando un campo magnético y una corriente eléctrica se intersecan en un fluido, la interacción repulsiva entre ambos, empuja al fluido en dirección perpendicular a ambos, al campo magnético y a la corriente eléctrica, conforme se muestra en la figura 5. (Regla de la mano izquierda).



Figura 5. Sistema de propulsión magnetohidrodinámico

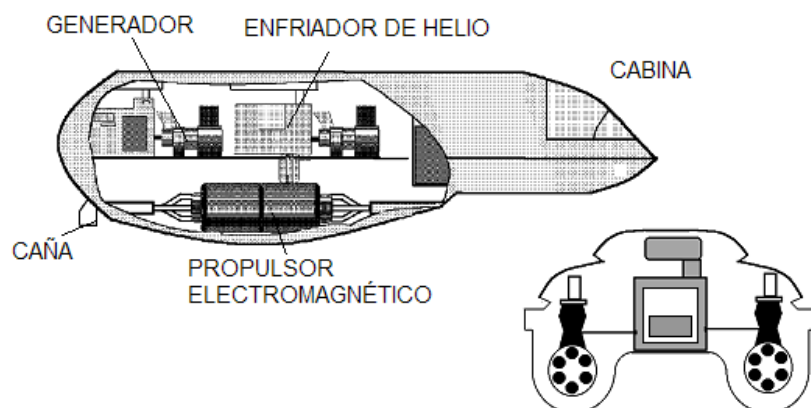


Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Propulsi%C3%B3n\\_magnetohidrodin%C3%A1mica](https://es.wikipedia.org/wiki/Propulsi%C3%B3n_magnetohidrodin%C3%A1mica)

El líquido es el agua de mar, la cual conduce la electricidad debido a la sal que contiene. Dentro de cada propulsor el agua fluye por tubos, arreglados de tal forma como si fueran las toberas de un cohete. Los tubos se encuentran envueltos en su contorno por bobinas superconductoras hechas de una aleación especial (Niobio y Titanio) sobre un núcleo de cobre. Helio líquido puede ser usado como refrigerante para las bobinas a una temperatura de  $-452.13\text{ }^{\circ}\text{F}$ , solo unos pocos grados sobre el cero absoluto, manteniéndolas en un estado de superconductividad donde no casi no existe resistencia al flujo de la electricidad.

La electricidad fluyendo a través de las bobinas genera un poderoso campo magnético dentro de los tubos propulsores. Cuando la corriente eléctrica circula por un par de electrodos dentro de cada tubo, el agua de mar es impulsada con fuerza desde los tubos, haciendo que el buque vaya adelante en la figura 6 se muestra el esquema de la nave marina Yamato .

Figura 6: Esquema de la nave Yamato construida con propulsión magnetohidrodinámica.



*Am*

Fuente: **Bosch, Josep Ramon Vidal.** Estudio sobre sistemas de propulsión naval no convencionales: Perspectivas y aplicaciones nauticas basadas en magnetohidrodinamica y electrohidrodinamica. Cartagena : Universidad

## 2.3. Definición de términos básicos

### 2.3.1. Sistema

Del latín systema, conjunto ordenado de elementos o partes que se encuentran interrelacionados y que muestran dependencia entre sí. Se utiliza para definir a un ente abstracto como un conjunto de conceptos o como algo real tales como objetos dotados con un arreglo específico.

### 2.3.2. Propulsión

Es el proceso y el resultado de impulsar o cambiar el estado de movimiento. Este término se refiere a la fuerza que se le da a un cuerpo para que cambie su velocidad y se desplace en el sentido físico.

### 2.3.3. Empuje magnetohidrodinámico

Fuerza no equilibrada a que es sometido un cuerpo inmerso en el seno de un fluido ionizado. Dicha fuerza, generada por la interacción de los campos eléctricos y magnéticos con el movimiento de un fluido ionizado, tanto los campos como la velocidad del fluido son mutuamente perpendiculares es paralela a las líneas de corriente y perpendicular al peso.

### 2.3.4. Modelo de minisubmarino

Es una copia de la forma a escala de mini submarino, que se utiliza para establecer las condiciones de inmersión y estabilidad del modelo en el seno del fluido, la interacción del fluido con la estructura y el funcionamiento de los sistemas de propulsión para el movimiento de esta.

## III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

### 3.1. Hipótesis

#### 3.1.1. Hipótesis General

La teoría electromagnética y de la Mecánica de Fluidos permite la construcción de un modelo de minisubmarino con propulsión magnetohidrodinámica.



### 3.1.2. Hipótesis Específicas

La teoría de la Mecánica de Fluidos permite la construcción de un modelo de minisubmarino.

La teoría electromagnética y la Dinámica de fluidos para flujo laminar y estacionario permite la construcción del sistema de Propulsión Magnetohidrodinámico.

### 3.2. Definición conceptual de variables

#### 3.2.1. Variable Independiente X:

Sistema de propulsión magnetohidrodinámico para modelo de minisubmarino.

Dispositivo compuesto por dos imanes permanentes de Neodimio ubicados en planos paralelos con la polaridad opuesta para generar un campo magnético uniforme, perpendicular a los imanes se ubican placas conductoras de acero inoxidable conectados a una fuente de voltaje DC para obtener un campo eléctrico constante perpendicular al campo magnético de forma que al interactuar con el fluido ionizado (agua de mar) la interacción electromagnética de la fuerza de Lorentz produzca el movimiento del fluido y genere el empuje necesario.

#### 3.2.2. Variable dependiente Y:

Modelo de minisubmarino.

Dispositivo de dimensiones pequeñas construidas de plástico y PVC que mantenga la forma de un submarino real para poder hacer estudios en escala pequeña del funcionamiento del submarino impulsado con un propulsor MHD.

### 3.3. Operacionalización de variables

#### 3.3.1. Sistema de propulsión magnetohidrodinámico para modelo de minisubmarino:

Constituido por una corriente eléctrica que pasa a través del agua de mar generado por el campo eléctrico de dos placas conductoras cargadas de acero inoxidable en la presencia de un intenso campo magnético producido por imanes permanentes de Neodimio, el cual interactúa con los iones disueltos que forman una corriente a través del agua. El agua de mar es entonces la parte móvil, el rotor de un motor eléctrico. Al empujar el agua hacia la parte trasera el vehículo se acelera en la dirección de avance.





### 3.3.2. Modelo de minisubmarino:

Sistema compuesto de un casco externo con la forma de un submarino real cuyas dimensiones son pequeñas, herméticamente sellado con una densidad promedio similar a la densidad de agua de mar que es el objeto de estudio para analizar el movimiento del modelo al interior del agua impulsado con el sistema de propulsión MHD.

## IV. DISEÑO METODOLÓGICO

### 4.1. Tipo y diseño de la investigación

#### 4.1.1. Tipo de Investigación.

La investigación a realizar es de tipo Cuantitativo, la que pretende y permite la determinación de indicadores y tendencias presentes en la realidad, es decir, datos representativos y objetivos, oponiéndose a la ciencia aristotélica, con la desconfianza sistemática de las evidencias y experiencia inmediata [28]. Su eje central es la materialización físico-numérica en el momento de la explicación, con una devaluación de la subjetividad y de la individualidad. Es una investigación aplicada porque se plantea problemas concretos que requieren soluciones inmediatas e iguales de específicas [29], tiene como objeto el estudio de un problema destinado a la acción, concentra su atención en las posibilidades concretas de llevar a la práctica las teorías generales, y destina sus esfuerzos a resolver las necesidades que se plantean la sociedad y los hombres.

#### 4.1.2. Diseño de investigación.

El diseño de la investigación es experimental que se presenta mediante la manipulación de una variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento particular [29]. En los diseños experimentales, el investigador no sólo se encuentra en condiciones prácticas de llevar a cabo un experimento sino que conoce también, en buena medida, la naturaleza del fenómeno que investiga.

### 4.2. Método de investigación

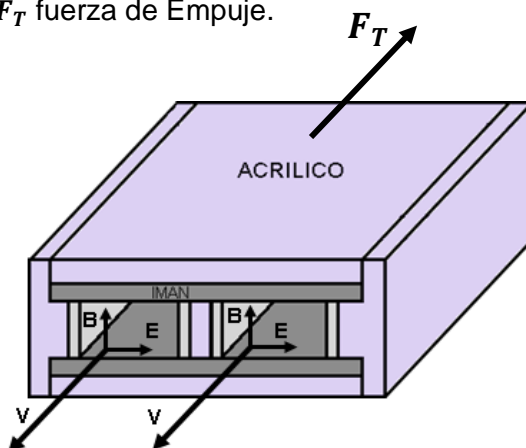
El método a utilizar es el Hipotético-Deductivo, este método desarrolla varios pasos primordiales: observación del fenómeno a estudiar,



creación de una hipótesis para explicar el fenómeno en estudio, deducción de las consecuencias o proposiciones más elementales que la propia hipótesis y verificación o comprobación de la verdad de los enunciados deducidos comparándolos con la experiencia [30].

El propulsor MHD está constituido por dos imanes permanentes de neodimio que produce aproximadamente un campo de 0,10 Teslas, formamos canales propulsores utilizando láminas de material no conductor como elementos de soporte y cuatro placas de acero inoxidable como conductores para la formación del campo eléctrico perpendicular al campo magnético que son los responsables de iniciar el movimiento de las moléculas ionizadas del agua de mar conforme mostramos en el siguiente esquema.

Figura 7: Esquema del sistema de propulsión magnetohidrodinámico para el modelo de minisubmarino. E: Campo eléctrico, B: Campo Magnético, V velocidad del flujo de fluido y  $F_T$  fuerza de Empuje.



Fuente:: Elaborado por el autor.

El funcionamiento de este propulsor está basado en la teoría electromagnética de interacción simultánea de la fuerza eléctrica y la fuerza magnética expresada matemáticamente a través de la fuerza de Lorentz [31] a través de la siguiente ecuación:

$$\vec{F}_L = q(\vec{E} + v \times \vec{B}) \quad (14)$$

Esta fuerza de Lorentz es la genera el movimiento del fluido conductor que por la tercera ley de Newton da origen a el empuje necesario para el movimiento del modelo de minisubmarino en dirección contraria al flujo de

fluido [22]. Consideramos en nuestro análisis el fluido analizado es de régimen permanente con líneas de corriente de perfil plano [32].

Construimos un dispositivo en el cual el conductor por el que circula la corriente es un fluido, por ejemplo, el agua de mar (hidro), se produce el movimiento (dinámico) del agua de mar, debido a la interacción del campo magnético (magneto) y a la corriente que circula por el agua. A este dispositivo le llamamos motor magnetohidrodinámico. Los motores magnetohidrodinámicos clásicos [33] trabajan con campos eléctricos y magnéticos constantes con el tiempo que son generados por corriente continua.

El líquido es el agua de mar (sustancia de trabajo), quien conduce la electricidad debido a la sal que contiene poseyendo una conductividad eléctrica del orden de  $0,22 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ . Los primeros estudios datan de los años 60 y tratan de la propulsión de los buques de superficie o de los submarinos [27]. El desarrollo de la propulsión MHD se vio frenada por la necesidad de tener inducciones magnéticas importantes (5,0 Teslas) dentro de grandes volúmenes (centenares de  $\text{m}^3$ ) para obtener un rendimiento interesante. El magnetismo de la tierra tiene influencia en el propulsor MHD, por lo que se requiere de un gran flujo magnético generado a fin de contrarrestar el mismo [34]. Con el avance de la ingeniería de materiales se dispone de imanes permanentes en el mercado nacional con campos magnéticos considerables y está la tecnología cerca de obtener mejoras sustanciales con las fuentes artificiales de campo magnético lo que hace aún más interesante el trabajo en propulsores MHD [21].

Este sistema construido nos permite tener un flujo de fluido dirigido en sentidos opuestos con la finalidad de generar un torque de giro en el modelo de minisubmarino, esto se logra solo con cambiar la polaridad de las placas conductoras. Así mismo podríamos generar giros drásticos si hacemos que el sistema de propulsión este pivoteado con un eje perpendicular al plano de los imanes.

(a) Determinación del campo magnético.

El campo magnético  $B$  del electroimán en el prototipo construido lo determinamos directamente haciendo uso de un sensor de campo magnético



previamente calibrado en Teslas, con ayuda de una interface y el software Data Studio, este sensor será colocado entre los dos imanes permanentes de Neodimio ubicados en planos paralelos con las polaridades opuestas.

(b) Determinación del campo Eléctrico.

El campo eléctrico  $E$  lo determinamos indirectamente haciendo uso de la ecuación:

$$E = \frac{\Delta V}{d} \quad (15)$$

Donde la diferencia de potencial  $\Delta V$  es el suministrado por la fuente de voltaje de corriente continua y medida con un voltímetro,  $d$  representa la separación en metros entre las placas conductoras de acero inoxidable, obteniendo el resultado del campo eléctrico  $E$  en V/m

(c) Determinación del empuje

La obtención del empuje lo hacemos indirectamente, a través de la determinación experimental de la velocidad del fluido considerando esta con movimiento constante.

Utilizamos para esto el software Vernier que permite procesar los videos en formato mp4. Al registrar el video con ayuda de una cámara digital establecemos una escala apropiada de un objeto en la imagen congelada del sistema propulsor para nuestro caso fue la longitud de la placa conductora, luego insertamos un origen de coordenadas y comenzamos a pasar el video cuadro por cuadro marcando las partículas de referencia conforme transcurre el tiempo en el registro de video y el software nos presenta los datos de posición en función del tiempo y a través de un ajuste de curva lineal obtenemos la velocidad del fluido.

Esta velocidad nos permite determinar el flujo másico  $\dot{m}$  en kg/s producido por la fuerza de Lorentz midiendo la sección transversal  $S$  en metros cuadrados por donde pasa el flujo de agua salada utilizando la siguiente expresión [23]:

$$\dot{m} = \rho u_d S \quad (16)$$

Por lo que finalmente determinamos el empuje  $F$  producido en Newton utilizando la siguiente expresión [31]:

$$F = \dot{m}(\beta_d u_d - \beta_\infty u_\infty) \quad (17)$$

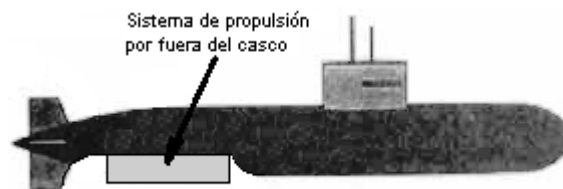


Para nuestro caso  $\beta_d = 1$  [11] por considerar flujo constante,  $u_d$  es la velocidad del fluido al interior del propulsor la cual vamos a determinar y  $u_\infty = 0$  es la velocidad del fluido a la entrada del propulsor que en este caso está en condiciones estáticas. Quedando la ecuación (17) como:

$$F = \dot{m}u_d \quad (18)$$

El casco del prototipo será construido de tubo de pvc, de 3,0 pulgadas de diámetro, la parte cónica está unida a presión con el casco cilíndrico y está hecha de plástico, madera y masilla para pintura de auto, que será lijada para darle la forma cónica, la parte posterior también se le dio la forma deseada utilizando el diseño y fabricación con la impresora 3D. Un esquema de cómo debe quedar al final del trabajo el modelo de minisubmarino lo mostramos en la figura 8

Figura 8. Esquema del prototipo a construir deseado con el propulsor MHD.

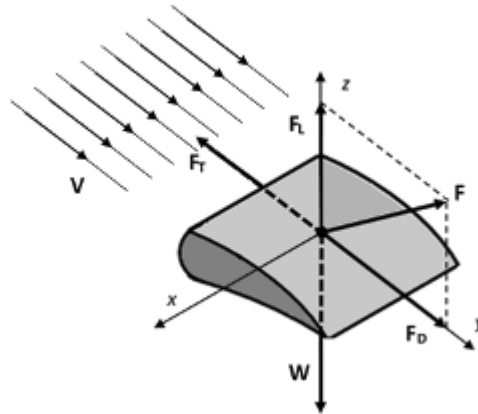


Fuente: Elaboración propia.

Las consideraciones relacionados con cálculos para la potencia necesaria que necesitamos en el propulsor y del sistema de inmersión y emersión lo presentamos a continuación.

El movimiento de submarinos es regido por el fenómeno de Flujo de fluidos sobre Cuerpos Rígidos donde se analizan las fuerzas de sustentación  $F_L$  (Lift: sustentación) y arrastre  $F_D$  (Drag: Arrastre), fuerzas que mostramos en la figura 9 junto con la fuerza de empuje  $F_T$  (Thrust: empuje) y el peso  $W$  (Weight: peso)

Figura 9: Fuerzas  $F_D$  y  $F_L$  que afectan el movimiento de un cuerpo rígido a través de un fluido que se mueve a velocidad  $V$  (velocidad de corriente libre), por la fuerza de empuje  $F_T$ .



Fuente: Elaboración propia

Este fenómeno explica que cuando un fluido se desplaza sobre un cuerpo sólido o viceversa, se ejercen fuerzas de presión normales a la superficie y fuerzas de corte paralelas a la superficie exterior del cuerpo a lo largo de éste. Usualmente existe interés en la resultante [32] de estas fuerzas de presión y de corte que actúan sobre el cuerpo.

La componente de la fuerza de presión y corte resultante que actúa en la dirección del flujo se llama Fuerza de Arrastre  $F_D$  y la componente que actúa perpendicular a la dirección del flujo se llama Fuerza de Sustentación  $F_L$ . Siempre debe existir un movimiento relativo entre el fluido y el cuerpo. Cuando se analiza este movimiento con el sistema coordenado fijado sobre el cuerpo, se le conoce como flujo sobre cuerpos o flujo externo.

Los campos de flujo y geometrías de los cuerpos dificultan el análisis y determinación analítica de estas fuerzas de arrastre y sustentación, por lo tanto, se apoya en correlaciones basadas en datos experimentales, como por ejemplo pruebas en túneles de viento o programas de computadora. La velocidad del fluido que se aproxima a un cuerpo, o del cuerpo que se mueve a través de un fluido se llama velocidad de flujo o corriente libre y se denota con  $V$ .

Las fuerzas de arrastre y sustentación dependen de la densidad  $\rho$  del fluido, la velocidad corriente arriba  $V$  y el tamaño, forma y orientación del cuerpo, entre otras cosas.

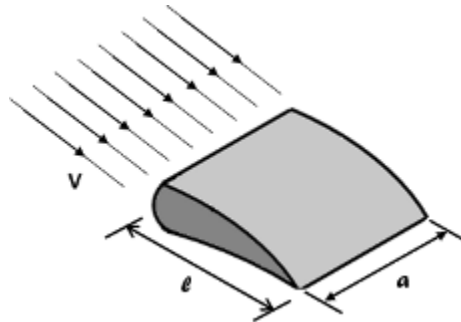
Convenientemente se trabaja con parámetros adimensionales adecuados que representan las características de arrastre y sustentación del cuerpo. Estos parámetros son el coeficiente de arrastre  $C_D$  y de sustentación  $C_L$ . Las expresiones matemáticas para la fuerza de arrastre y de sustentación son las siguientes.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 A_D C_D \quad (19)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho V^2 A_L C_L \quad (20)$$

El término  $\frac{1}{2} \rho V^2$  es la presión dinámica. Para el caso del cálculo de la fuerza de sustentación consideramos el área  $A_L$  como el área de planta del cuerpo (el área proyectada sobre un plano paralelo a la dirección del flujo) para un perfil en forma de ala de avión tendríamos que  $A_L = \ell \cdot a$  conforme lo mostramos en la figura 10.

Figura 10: Área considerada para el cálculo de la fuerza de sustentación, en el ala de avión

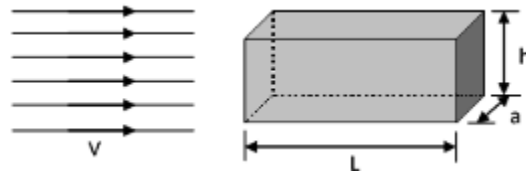


Fuente: Elaboración propia

En el caso del área de arrastre  $A_D$  tenemos tres posibilidades:

Para cuerpos romos como el que mostramos en la figura 11, se considera el área transversal del cuerpo rígido perpendicular a la dirección de la corriente que en este caso sería  $A_D = a \cdot h$ .

Figura 11: Área considerada para el cálculo de la fuerza de arrastre, en un cuerpo romo.



Fuente: Elaboración propia

Para cuerpos de forma aerodinámica como el mostrado por la figura 10 el área considerada es el área de planta, es decir es el área proyectada del cuerpo en la dirección paralela a la dirección de la corriente de fluido libre en este caso  $A_D = l \cdot a$

Para el caso de embarcaciones o hidronaves se considera el área mojada representada con la sección rayada conforme lo mostramos en la figura 12,

Figura 12: Área considerada para el cálculo de la fuerza de arrastre, para hidronaves.



Fuente: Elaboración propia

El coeficiente de arrastre depende del tipo de flujo que deseamos analizar este puede ser laminar, de transición y turbulento y se caracteriza a través de valor adimensional conocido como numero de Reynolds. El número de Reynolds está definido por:

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (21)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $V$  es la velocidad del fluido libre,  $D$  parámetro de longitud y  $\mu$  es la viscosidad.

A números de Reynolds mayores que  $10^4$ , los coeficientes permanecen en esencia constantes. Los efectos inerciales son despreciables en flujos con número de Reynolds bajo de  $Re < 1$  y son llamados flujos de Stokes. Por ello es necesario recurrir a tablas que proporcionan los coeficientes de arrastre para flujos con distintos números de Reynolds que pasan sobre cuerpos bidimensionales y tridimensionales con geometría conocida.

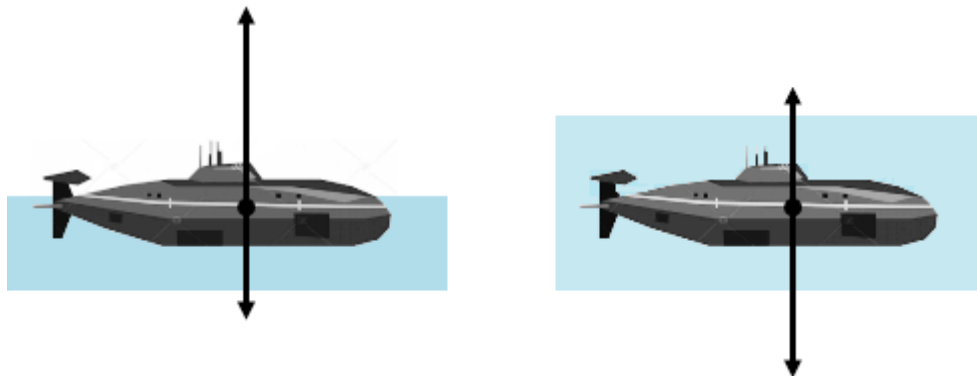


Por experiencia se sabe que para mover un cuerpo en un líquido es necesario generar un mayor esfuerzo debido a la resistencia que éste opone que es mayor que la del fluido. Aplicándolo a los submarinos o vehículos sumergibles es vital conocer esta resistencia o fuerza de arrastre que el agua le ofrece al submarino, esto para tener el conocimiento de que cantidad de fuerza debe tener el sistema propulsor, para vencer la resistencia del agua a deformarse producto del movimiento del submarino.

(d) Principio de Inmersión de un minisubmarino

El sistema de inmersión está regido por otro principio físico tratado por el área de la Mecánica de Fluidos y es el de la Fuerza de Empuje o Fuerza Boyante. Este fenómeno es explicado por el principio de Arquímedes (Figura 13) el cual se expone a continuación:

Figura 13. El desequilibrio entre las fuerzas de Empuje E y el peso produce la inmersión o emersión de un submarino.



Fuente: Elaboración propia

El principio de Arquímedes afirma [35] que todo cuerpo sumergido en un fluido estático experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso de fluido desalojado.

Se conoce entonces que sobre un cuerpo sumergido actúan dos fuerzas, una de ellas es el Peso del cuerpo que es vertical y dirigida hacia abajo. La otra fuerza es la Fuerza de Empuje vertical pero dirigida hacia arriba. Esta fuerza de empuje es igual al peso del fluido desalojado por el cuerpo sumergido. Las Expresiones matemáticas de estas fuerzas son las siguientes:

$$\text{Peso} = W = mg \tag{22}$$

$$\text{Empuje} = E = \rho g V_s \tag{23}$$

Siendo:

$m$  = masa

$g$  = aceleración de la gravedad

$\rho$  = densidad del medio en el que se encuentra el cuerpo

$V_s$  = volumen de agua desalojado por el cuerpo

#### 4.3. Población y muestra

Por ser un trabajo de investigación aplicada con desarrollo tecnológico la población y muestra lo constituye el prototipo construido.

#### 4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado

El estudio se realizó en la Universidad Nacional del Callao, en los laboratorios de Física, en el periodo comprendido entre el 01 de mayo de 2018 al 30 de abril de 2020

#### 4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.

Comprobaremos el funcionamiento del modelo de minisubmarino y la propulsión magnetohidrodinámica diseñando estructuras base conformada por el casco externo hermético con su sistema de embolo pistón, así como para el propulsor MHD por donde pasaría el agua de mar para poder realizar la recolección de datos en estado estacionario y en pleno funcionamiento; nos ayudaremos de software de procesamiento de imágenes; así como medidores de corriente eléctrica disponibles en los laboratorios de Física e Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional del Callao

#### 4.6. Análisis y procesamiento de datos.

Los datos obtenidos con ayuda de los sensores e instrumentos de medición eléctrica los procesaremos utilizando las herramientas de estadística que posee el software Data Studio del Laboratorio de Física, realizando los cálculos y pruebas estadísticas para dar los resultados con validez científica.

## V. RESULTADOS

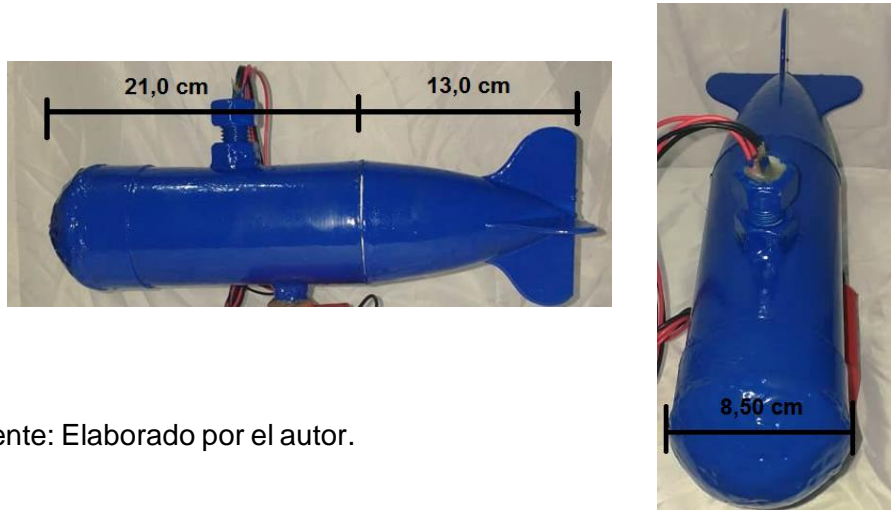
### 5.1. Resultados descriptivos

#### 5.1.1. Para el casco del modelo de minisubmarino

Teniendo las consideraciones teóricas expuestas en la sección anterior determinados las dimensiones para el modelo de minisubmarino que mostramos en la figura 14 mostrando las vistas de planta y lateral.



Figura 14. Fotografías con (a) vistas lateral (b) de planta para el modelo de minisubmarino con propulsión MHD, donde mostramos las dimensiones.



Fuente: Elaborado por el autor.

### 5.1.2. Para el propulsor MHD

En la construcción del propulsor se construyeron dos prototipos de los cuales mostramos el último de ellos que aseguraba el funcionamiento ya que el primer prototipo tenía la separación central muy poca distancia entre los cables de alimentación y la corriente circulaba con menos dificultad por la parte central por lo que se decidió que la distancia de espacio entre los dos canales de propulsión debe ser mayor que la distancia entre las placas de acero de cada canal, los canales de propulsión están articulados a través de un casco de plástico elaborado y diseñado utilizando una impresora 3D. Los canales de propulsión tienen alimentación de energía eléctrica.

En la fotografía mostramos el prototipo utilizado en las pruebas, donde mostramos sus partes y las dimensiones se muestran en los anexos.

Figura 15: Vistas del propulsor MHD (a) Vista frontal con (1) placas de acero inoxidable (2) imanes de Neodimio (3) Unión roscada para el casco del modelo de minisubmarino (4) Carcasa del propulsor MHD (b) Vista posterior del propulsor MHD donde apreciamos las conexiones para el paso de la corriente eléctrica.



Fuente: Elaborado por el autor.

## 5.2. Resultados inferenciales

Ahora determinamos el número de Reynolds para las condiciones en que vamos a hacer las pruebas del modelo del minisubmarino a fin de determinar el coeficiente de arrastre que tendrá nuestro modelo.

Considerando [36] una densidad  $\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$  y viscosidad dinámica del agua de mar  $\frac{\mu}{\rho} = 1,112 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ , a  $16,0 \text{ }^\circ\text{C}$  con una longitud característica de  $D = 85,0 \times 10^{-3} \text{ m}$  con una velocidad de desplazamiento de  $V = 0,0224 \text{ m/s}$  tenemos:

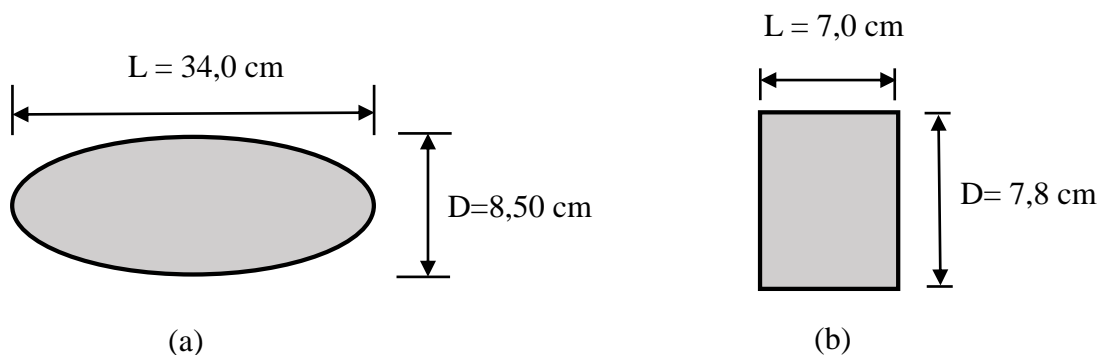
$$Re = \frac{0,0224 \times 85 \times 10^{-3}}{1,112 \times 10^{-6}} = 1,71 \times 10^3 \leq 2300$$

Como  $Re < 2300$  tenemos según las definiciones [35], para régimen laminar y considerando que el modelo de minisubmarino tiene una forma aproximada de elipsoide, tenemos que el coeficiente de arrastre dinámico es  $C_D = 0,35$  y para el propulsor lo aproximamos como barra cuadrada considerando solo un área efectiva restando las área de los canales de propulsión encontramos un coeficiente de arrastre de  $C_D = 2,27$  las formas aproximadas consideradas se muestran en la figura 16. Las áreas de arrastre son:

$$A_{DS} = \pi \frac{D^2}{4} = 5,67 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_{DP} = bD = 6,08 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Figura 16: Dimensiones aproximadas para (a) el casco del modelo de minisubmarino (b) para el propulsor MHD.



Fuente: Elaborado por el autor.

Entonces las fuerzas de arrastre serían:

$$F_{DS} = \frac{1}{2} \times 1030 \times 0,0224^2 \times 0,35 \times 5,67 \times 10^{-3} = 5,13 \text{ mN}$$

$$F_{DP} = \frac{1}{2} \times 1030 \times 0,0224^2 \times 2,27 \times 6,08 \times 10^{-3} = 3,57 \text{ mN}$$

La fuerza de arrastre total es:

$$F_{DT} = F_{DS} + F_{DP} = 9,00 \text{ mN}$$

Por lo que se necesitaría una potencia efectiva mínima de:

$$P = F_{DT} \times V = 202 \text{ } \mu\text{W}$$

Determinemos ahora utilizando el principio de Arquímedes la masa crítica  $m_c$  que debe tener el modelo de minisubmarino para tener una operación adecuada con el sistema propulsor MHD, al sumergir el prototipo en un recipiente completamente lleno el prototipo que mostramos en la figura 17 desaloja  $1700 \text{ cm}^3$  de agua y tiene una masa de 1400 gramos.

Figura 17. Prototipo de modelo de minisubmarino, el casco se muestra de color azul y el propulsor MHD en color rojo.



Fuente: Elaborado por el autor.

Vamos a considerar una densidad del agua de mar igual a [37]  $\rho = 1,03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  entonces para saber la masa crítica a incorporar en el modelo tenemos:

$$\text{Fuente: Elaborado por el autor } 1,03 = \frac{1400 + m_c}{1700}$$

$$m_c = 351 \text{ gr}$$

Es la masa que debe incorporarse en el modelo de minisubmarino para trabajar correctamente con el propulsor MHD diseñado. En la figura 18 mostramos las pruebas hidrostáticas utilizando los resultados de los cálculos anteriores con el prototipo, podemos apreciar claramente la estabilidad y que está casi sumergido en el fluido.

Figura 18. Pruebas hidrostáticas con una toma lateral (a) y una toma de planta (b) donde se aprecia la estabilidad para el prototipo de modelo de minisubmarino con propulsión MHD



(a)



(b)

Fuente: Elaborado por el autor.

### 5.3. Resultados experimentales

Para las pruebas experimentales y la recopilación de datos no nos fue posible hacer uso de instalaciones y equipamiento adecuado disponible en la universidad por encontrarnos en plena crisis de la pandemia del coronavirus COVID-19 que obliga a todo el personal a mantenerse en cuarentena y la distancia social obligatoria como medidas de seguridad para no contagiarse por lo que se realizaron estas pruebas en mi domicilio adaptando ambiente y equipamiento de acuerdo a mi disponibilidad, para lo cual utilizamos el esquema experimental mostrado en la figura 19, el recipiente utilizado es una caja organizadora de plástico transparente de 50,0 litros de capacidad en los cuales se ha agregado 1,00 kg de sal de cocina, para simular el agua de mar ya que por el confinamiento social y el riesgo de contagio me fue imposible conseguir agua de mar sustancia de trabajo que fue inicialmente planteado en el proyecto de investigación, como suministro de energía eléctrica se utilizó una fuente de voltaje DC de 12,0 voltios y 5,00 amperios conectados a la red domiciliaria.

Figura 19 Esquema experimental para la prueba de propulsión MHD del modelo de minisubmarino donde mostramos (1) Casco del modelo de minisubmarino, (2) Propulsor MHD, (3) Fuente de alimentación 12 VDC, (4) Extensión, (5) Cables de alimentación, (6) recipiente de agua con sal de 50 L

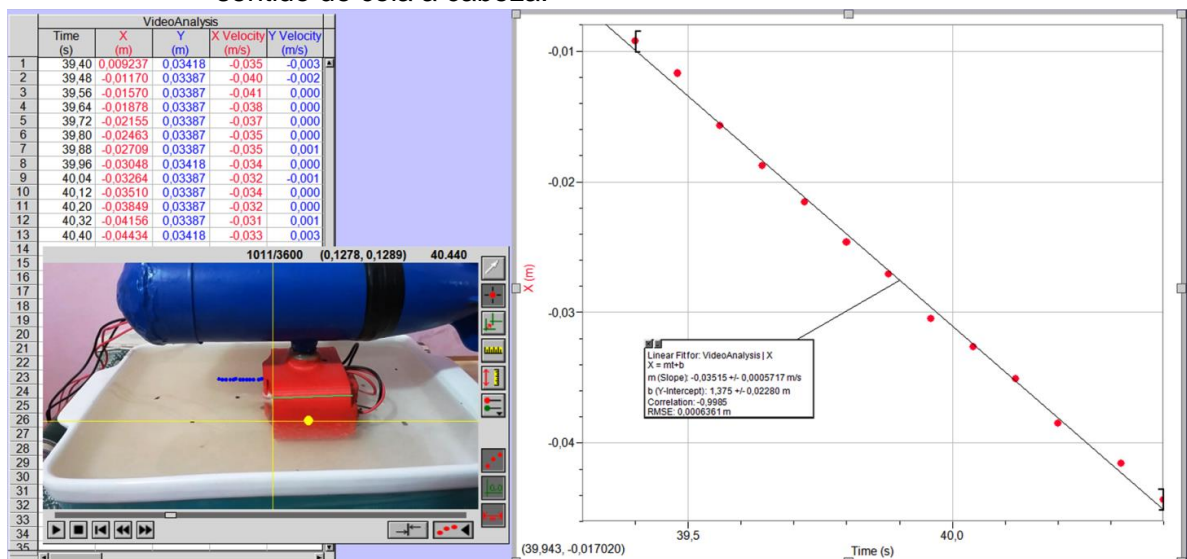


Fuente: Elaborado por el autor.

### 5.3.1. De las pruebas estáticas del propulsor.

Iniciamos las pruebas experimentales con el propulsor en condiciones estáticas e hicimos las mediciones de la velocidad de salida para cada uno de los canales propulsores, en la figura 20 mostramos el registro de posición versus tiempo para el canal propulsor de la derecha considerando el sentido de cola a cabeza del modelo de minisubmarino.

Figura 20. Datos de posición x versus tiempo para determinar la velocidad del flujo de fluido en el canal propulsor derecho considerando el sentido de cola a cabeza.



Fuente: Elaborado por el autor.

Encontramos que este canal propulsor genera una corriente de fluido con una velocidad de:

$$v_{PD} = 0,0352 \frac{m}{s}$$

Con este valor de velocidad determinamos la fuerza de empuje de acuerdo a la ecuación 5, con una área efectiva de  $A = 7,00 \times 10^{-4} m^2$

$$\dot{m} = \rho v A = 0.0254 \frac{kg}{s}$$

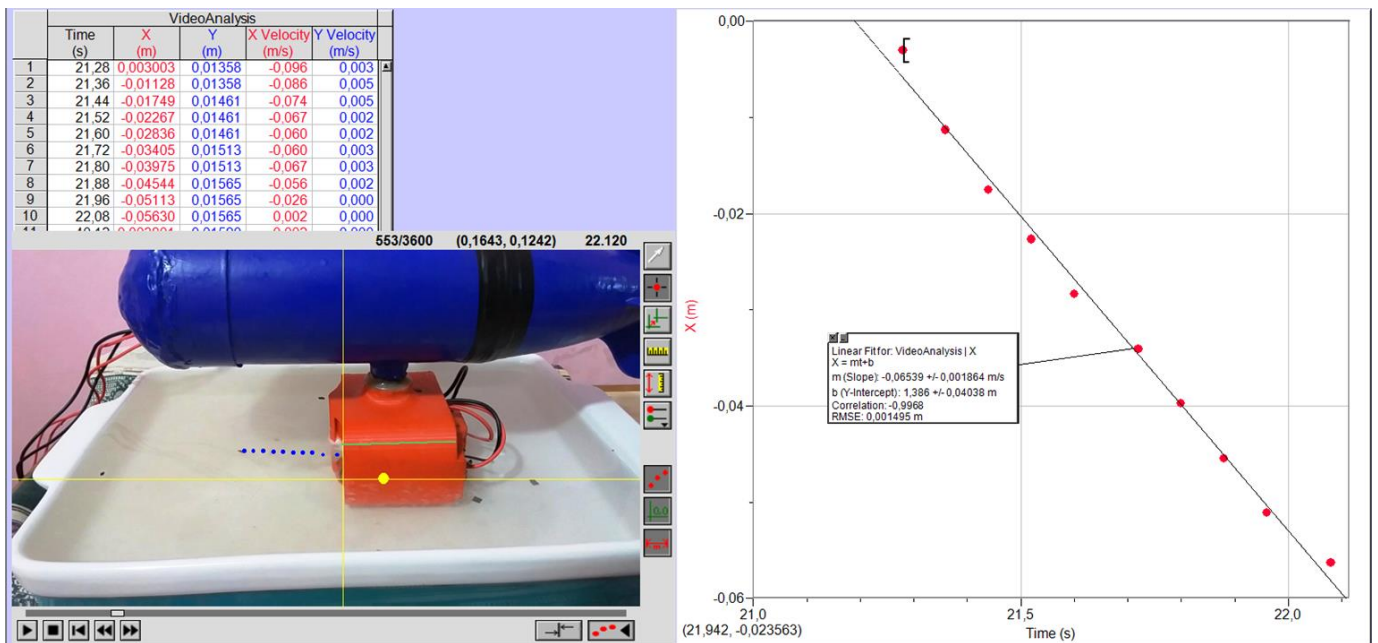
$$F_{PD} = 0,893 mN$$

Con una potencia de:

$$P_{PD} = 31,4 \mu W$$

Realizando el mismo análisis para el canal propulsor izquierdo encontramos que según muestra la figura 21

Figura 21. Datos de posición x versus tiempo para determinar la velocidad del flujo de fluido en el canal propulsor izquierdo considerando el sentido de cola a cabeza.



Fuente: Elaborado por el autor.

$$v_{PI} = 0,0654 \frac{m}{s}$$

Con este valor de velocidad determinamos la fuerza de empuje de acuerdo a la ecuación (18), con una área efectiva de  $A = 7,00 \times 10^{-4} m^2$

$$\dot{m} = \rho v A = 0.0472 \frac{kg}{s}$$



$$F_{PD} = 3,08 \text{ mN}$$

Con una potencia de:

$$P_{PD} = 202 \mu W$$

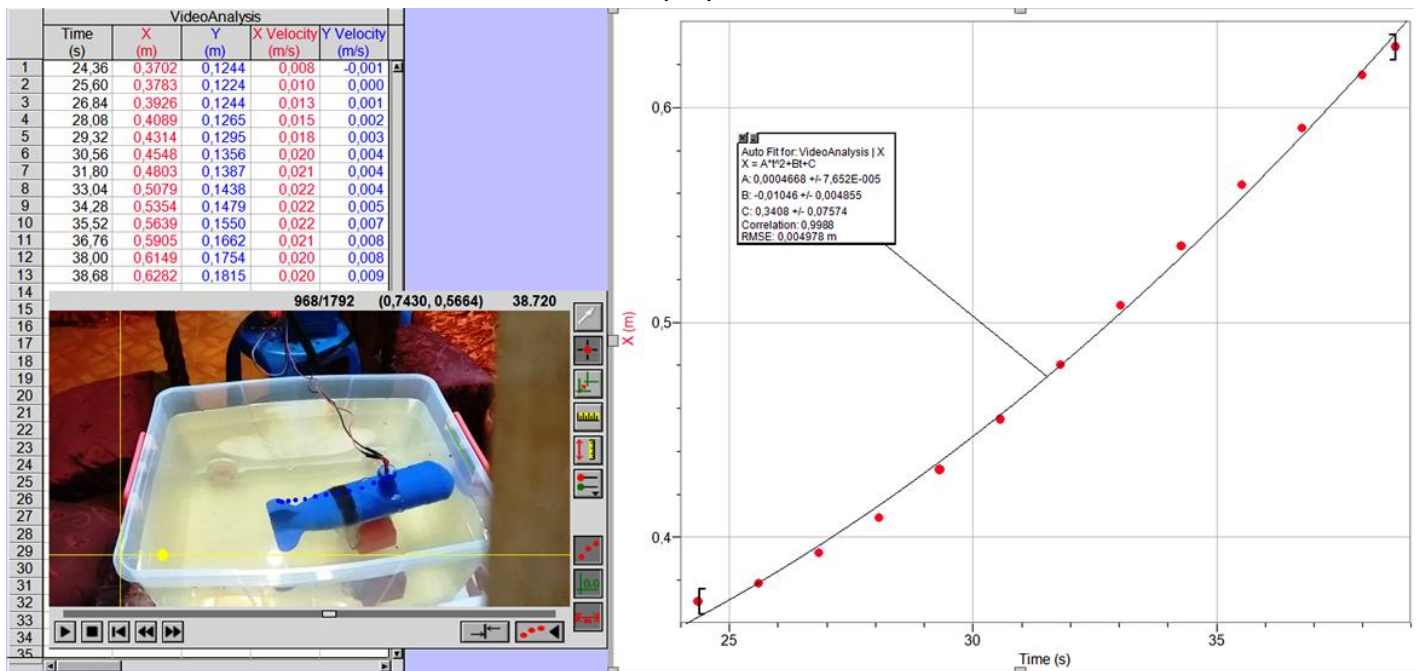
Por lo que el propulsor genera una potencia de:

$$P_{PT} = 233 \mu W$$

### 5.3.2. Del modelo de minisubmarino con propulsión MHD.

Realizadas las pruebas experimentales, obtuvimos los siguientes resultados, en la gráfica de posición x versus tiempo en la figura 22 encontramos un comportamiento acelerado, que al realizar el ajuste de curva nos dio como resultado un coeficiente de correlación de 0,999 y con un error cuadrático medio de 0,00498, que es aceptable desde el punto de vista estadístico.

Figura 22. Gráfica de posición x versus tiempo para el modelo de minisubmarino con propulsión MHD.

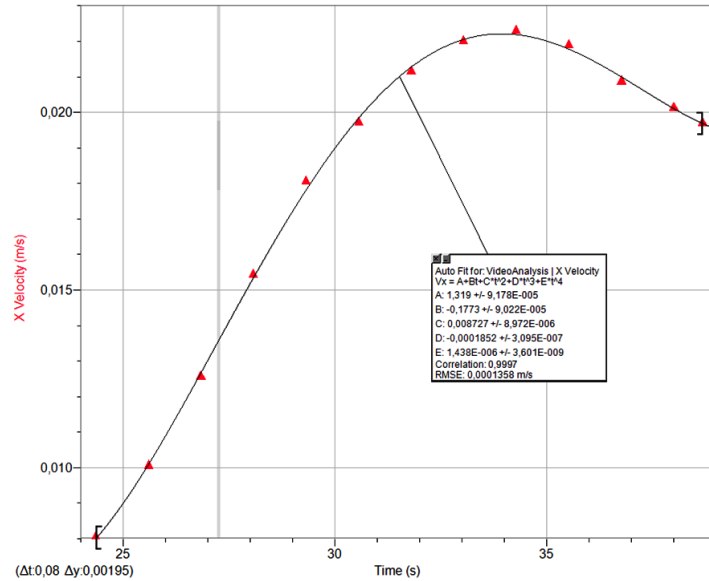


Fuente: Elaborado por el autor.

En la gráfica de velocidad en el eje x en función del tiempo mostrada en la figura 23, observamos un comportamiento ascendente claramente acelerado con una variación en función del tiempo con un comportamiento lineal llegando a una rapidez máxima y luego comienza a disminuir, como consecuencia de la acción del cable de alimentación. De los datos registrados encontramos que la velocidad máxima en el eje x libre de la acción del cable es:

$$v_{x\text{máx}} = 0,022 \frac{m}{s}$$

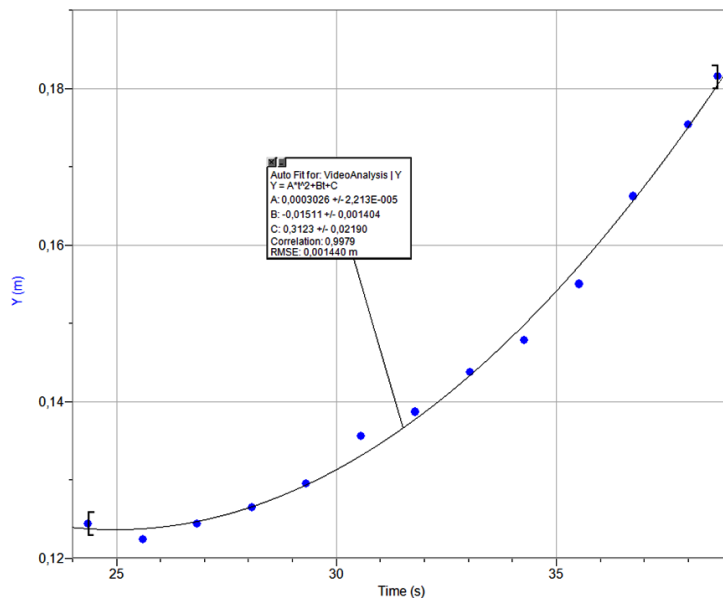
Figura 23. Comportamiento de la velocidad en x versus tiempo para el modelo de minisubmarino con propulsión MHD.



Fuente: Elaborado por el autor.

En la gráfica de posición y en función del tiempo mostrada en la figura 24, observamos un comportamiento acelerado con un comportamiento cuadrático cuyo ajuste de la nube de puntos arroja un coeficiente de correlación de 0,998 con un error cuadrático medio de 0,00144, que es aceptable desde el punto de vista estadístico.

Figura 24. Grafica de posición y versus tiempo para el modelo de minisubmarino con propulsión MHD.



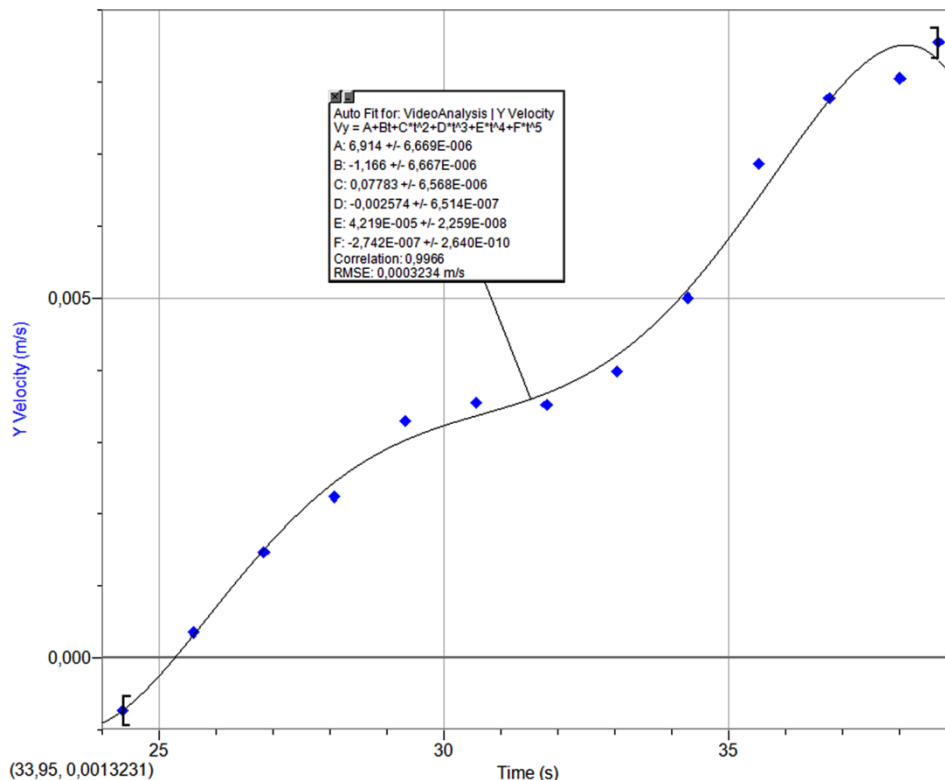
Fuente: Elaborado por el autor.

En la gráfica de velocidad en el eje y en función del tiempo mostrada en la figura 25, observamos un comportamiento ascendente llegando a una zona

en la cual la aceleración se hace cero, y luego aparece para incrementar nuevamente la velocidad esto es como consecuencia de la acción del cable de alimentación, donde podemos considerar un valor aproximado de la rapidez máxima en el eje y del modelo en condiciones libres del cable de alimentación según los datos de la gráfica 25 obtenemos

$$v_{y\max} = 0,004 \frac{m}{s}.$$

Figura 25. Grafica de velocidad y versus tiempo para el modelo de minisubmarino con propulsión MHD.



Fuente: Elaborado por el autor.

Por lo que tenemos como resultado que la rapidez máxima desarrollada por el modelo de minisubmarino con propulsión MHD es:

$$v_{m\acute{a}x} = \sqrt{v_{xm\acute{a}x}^2 + v_{ym\acute{a}x}^2} = 0,0224 \frac{m}{s}$$

## VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

La construcción del modelo de minisubmarino y la estructura del propulsor magnetohidrodinámico se hizo posible gracias a los nuevos procesos de

manufactura que disponemos actualmente con es el de la impresora 3D, elaborar las piezas necesarias con métodos de fabricación convencionales serían muy costosos y no tendría la versatilidad con la que se cuenta, este proceso moderno nos permitirá elaborar prototipos mejorados en relación a la obtención de mayores empuje modificando la geometría y reduciendo el área a la salida del propulsor con dos canales.

La teoría electromagnética y la mecánica de fluidos es aplicable para la determinación del empuje, el cálculo de la potencia generada y la potencia mínima necesaria para producir desplazamiento apreciable calculando la potencia de arrastre en el modelo de mini submarino con propulsión magnetohidrodinámica, en relación al cálculo de valores de rapidez de desplazamiento los cálculos realizados difiere de los valores de rapidez encontrados para el modelo, dando resultados con una significación muy baja para efectos de predicción, pero si es referencial para determinar la factibilidad.

Es muy importante mencionar que como consecuencia de la pandemia del coronavirus, las capacidades para profundizar aún más sobre el tema se vieron mermados ya que no dispusimos de equipamiento e infraestructura adecuada para la obtención de información a través de la experimentación.

## 6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares.

El propulsor construido con dos canales de propulsión alimentados impediénte permite además de los movimientos de avance y retroceso permite también generar giros más pronunciados que los giros convencionales, como los presenta en sus diseños Swalom Daniel y otros [23], que presentan una salida de propulsión trabajando con electroimanes que para el caso de un modelo es más práctico trabajar con imanes permanentes, el modelo presentado permitirá trabajar con expresiones menos complejas para el cálculo de la eficiencia que autores como Mitchell D.L. y Gudser D. U. [38] ofrecen resultados teóricos con eficiencias mayores al 50% trabajando con campos magnéticos mayores a 5,0 Teslas con velocidades de desplazamiento sobre los 20 m/s, a pesar del escepticismo de algunos físicos como Font, Gabriel y Dudley Scott [27] sobre la factibilidad de propulsores práctico de uso real por la tecnología magnética aun no disponible necesaria para la propulsión magnetohidrodinámica, es



necesario para mejorar la eficiencia de propulsión en el modelo de minisubmarino pensar en otras variables como a través de la geometría y diferentes secciones transversales como los propone Naooyuki Niwa y otros [39] que encontraron que la onda de compresión generada depende de la forma del canal; Los tratamientos teóricos del Electromagnetismo y de la Mecánica de Fluidos, también es importante hacer trabajos con modelamiento computacional del propulsor como los propuestos por Pohjavirta, Armo y Kuttenen, Lauri [21], que permitirá mejorar el diseño construido.

### 6.3. Responsabilidad ética

El trabajo presentado es una investigación cuantitativa donde las relaciones de diferentes variables se miden y se prueban estadísticamente. Este trabajo de investigación se atribuye más hacia la noción positivista de la causalidad teoría - realidad. El objetivo principal de este tipo de investigación es proporcionar un método objetivo para el estudio de fenómenos de interés científico [40]. El aumento de información disponible en Internet así como en bibliotecas virtuales nos obliga a ser más cuidadosos con el respeto a la autoría de los trabajos de investigación para no reclamarlos como propia, a pesar de compartir con la generación milenio, cuyos miembros están acostumbrados a la eficiencia, la gratificación instantánea y el trabajo colaborativo, por lo tanto, es primordial entender el proceso de descifrar la información antes de difundir. Es esencial, que el personal universitario y los docentes promuevan y modelen una cultura de integridad investigadora para los estudiantes [41].

## CONCLUSIONES

La construcción del modelo de minisubmarino con propulsión magnetohidrodinámica es compatible con las arquitecturas submarinas actuales y previstas.

La construcción del modelo de minisubmarino y el propulsor MHD se construyeron utilizando los procesos de manufactura más modernos como es la impresión 3D.

El propulsor magnetohidrodinámico genera una potencia de empuje de 233  $\mu\text{W}$ , que es mayor a la potencia mínima de arrastre necesaria para el movimiento del modelo de mini submarino.



El modelo de minisubmarino con propulsión MHD alcanzo una rapidez de movimiento de 0,0244 m/s.

El propulsor magnetohidrodinámico construido tiene dos canales de propulsión que no solo generan empuje de avance y retroceso si no también la posibilidad de giros menos pronunciados que la propulsión convencional.

El propulsor magnetohidrodinámico por ser un sistema de accionamiento eléctrico permite que los componentes del sistema de propulsión se pueden ubicar donde sea conveniente.

## RECOMENDACIONES

La construcción de un nuevo modelo de minisubmarino debe realizarse íntegramente con una impresora 3D, donde el cuerpo del modelo de minisubmarino y el propulsor siempre deben ser independientes, es necesario construir un circuito regulador para la propulsión de cada uno de los canales a fin de no solo controlar el avance o retroceso sino también el giro. La forma que debe adoptar un nuevo prototipo de propulsor es la de una tobera para cada canal propulsor con la sección mayor a la entrada de cada propulsor. Las pruebas experimentales se deben realizar en un laboratorio que cuente con una poza de fluido de dimensiones mucho mayores que las del prototipo construido así como los equipos e instrumentos necesarios para realizar las mediciones experimentales.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. Ritchie, «Experimental researches in voltaic electricity and electromagnetism,» *Phil Trans Roy Soc London*, nº 122, pp. 279-298, 1832.
- [2] E. J. Resler y S. WR, «The prospects for magneto-aerodynamics,» *J Aero Sci*, nº 25, pp. 235-245, 258, 1958.
- [3] A. Busemann, «Is aerodynamics breaking an ionic barrier,» *NASA-TM-X-56147*, 1961.
- [4] A. Fraishtadt, A. Kuranov y E. Sheikin, «Use of MHD systems in hypersonic aircraft,» *Tech Phys*, nº 43, pp. 1309-1313, 1998.
- [5] S. Macheret, M. Shneider y R. Miles, «Magneto-hydrodynamic control of hypersonic flow and scramjet inlets using electron beam ionization,» *AIAA J*, nº 40, pp. 74-81, 2002.
- [6] J. Poggie y D. Gaitonde, «Magnetic control of flow past a blunt body: Numerical validation and exploration,» *Phys Fluids*, nº 14, p. 1720–1731, 2002.
- [7] R. Moses, «Regenerative aerobraking,» *Space Technology and Applications International Forum, Albuquerque*, 2005.
- [8] O. Chazot y M. Zuber, «Introduction to Magneto–Fluid–Dynamics for Aerospace Applications,» *VKI LS 2004–01, Rhode-Saint-Genève*.
- [9] W. Rice, «Propulsion system,» *US Patent*, pp. 2,997,013, 1961.
- [10] J. Friauf, «Electromagnetic ship propulsion,» *ASNE J*, p. 139–142, 1961.
- [11] S. Way, «Electromagnetic propulsion for cargo submarines,» *AIAA–paper 1963*, p. 0363, 1967.
- [12] T. Lin y G. J., «Studies of helical magneto-hydrodynamic seawater flow in fields up to twelve teslas,» *J Prop Power*, nº 11, p. 1349–1355, 1995.
- [13] K. Nishigaki, C. Sha, M. Takeda, Y. Peng, K. Zhou, D. Yang, A. Suyama, Q. Qing, L. Yan, T. Kiyoshi y H. Wada, «Elementary study on superconducting electromagnetic ships with helical insulating wall,» *Cryogenics*, nº 40, p. 353–359, 2000.
- [14] D. Convert, «Propulsion Magneto-hydrodynamique,» Université Joseph Fourier, Grenoble, 1995.
- [15] O. Phillips, «The prospects for magneto-hydrodynamic ship propulsion,» *J Ship Res*, nº 5, p. 43–51, 1962.
- [16] J. Thibault, «Status of MHD ship propulsion,» *In: 2nd International Conference on Energy Transfer in MHD Flows*, 1994.
- [17] G. Sutton y A. Sherman, *Engineering Magneto-hydrodynamics*, New York: McGraw-Hill, 1965.
- [18] E. Doss y H. Geyer, «The need for superconducting magnets for MHD seawater propulsion,» de *Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Reno, 1990.
- [19] J. Bonilla, «Convencionales o de propulsión nuclear, los nuevos submarinos brasileños toman forma,» *Tecnología militar - TECMIL*, nº 2, pp. 16-17, 2012.



- [20] L. Mejia, «Los proyectos de la Marina de Guerra del Perú,» *Tecnología Militar*, nº 2, pp. 38-40, 2018.
- [21] A. Phjavirta y L. Kettunen, «Feasibility study of an Electromagnetic Thruster for Ship Propulsion,» *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 27, nº 4, pp. 3735-3742, 1991.
- [22] M. D.L y G. D.U, «Magnetohydrodynamic Ship Propulsion with Superconducting Magnets,» *Journal of Superconductivity*, vol. 1, nº 4, pp. 349-364, 1988.
- [23] D. Swallon, I. Sadovnik, J. Gibbs, H. Guroid y L. & V. D. B. H. Nguyen, «Magnetohydrodynamic Submarine Propulsion Systems,» *Naval Engineering Journal*, pp. 141-157, May 1991.
- [24] N. Diaz, «Sistema de propulsión Magnetohidrodinámica y determinación del empuje,» *Ciencia y Tecnología*, vol. 18, nº 2, 2015.
- [25] D. Nani, «La realidad según la Física Cuántica y la investigación - acción,» *Universitas Philosophica* 70, pp. 65-83, 2018.
- [26] M. W. Zemansky y R. Freedman, Física Universitaria, vol. I, México: Pearson Education, 2009.
- [27] G. I. Font y S. C. Dudley, «Magnetohydrodynamic propulsion for the classroom,» *The Physics Teacher*, vol. 42, pp. 410-415, 2004.
- [28] R. de Freitas, L. Teixeira, E. Cotrim y C. Pinto, «Pesquisa Quantitativa e/ou Qualitativa: distanciamentos, aproximações e possibilidades,» *SUSTINERE*, vol. 7, nº 2, pp. 414-430, jul-dez 2019.
- [29] G. Baena, Metodología de la investigación, Tercera ed., Mexico: Grupo Editorial Patria, 2017.
- [30] E. Cabezas, D. Andrade y T. Johana, Introducción a la metodología de la investigación Científica, Sangolquí: Comisión Editorial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 2018.
- [31] D. Cebro, S. Viroulet, J. Vidal, M. Jean-Paul y V. Philippe, «Experimental and theoretical study of magnetohydrodynamic ship models,» *Plos one*, pp. 1-34, June 2017.
- [32] J. M. C. Yunus A. Cengel, Mecanica de Fluidos, Primera ed., P. E. R. Vazquez, Ed., Mexico: McGraw - Hill, 2006, pp. 561-598.
- [33] S. V. J. V. J.-P. M. P. V. David Cebon, «Experimental and theoretical study of magnetohydrodynamic ship models,» *Journal, pone*, 30 June 2017.
- [34] J. B. Friauf, «Electromagnetic ship propulsion,» *A.S.N.E. Journal*, pp. 139-142, 1961.
- [35] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, Mecánica de Fluidos fundamentos y aplicaciones, Segunda ed., México: Mc Graw Hill, 2017, pp. 571-579.
- [36] T. Weier, V. Shatrov y G. Gerbeth, «Flow Control and Propulsion in Poor Conductors,» *Magnetohydrodynamics: Historical Evolution and Trends*, pp. 295-312, 2007.
- [37] R. A. Serway y J. W. Jewett, Física para Ciencias e Ingeniería, vol. I, México: Cengage Learning, 2015, p. 419.
- [38] D. Mitchell y D. Gubser, «Magnetohydrodynamic Ship Propulsion with Superconducting Magnets,» *Journal of Superconductivity*, vol. 1, nº 4, pp. 349-364, 1988.





- [39] N. Naoyuki, T. Takahashi, F. Takayasu y M. Ishikawa, «Performance Comparison of Scranjet-Driven Experimental DCW-MHD Generators with Different Cross-Sections,» *Electrical Engineering in Japan*, vol. 187, nº 2, pp. 220-225, 2014.
- [40] I. Lock y P. Seele, «Quantitative content analysis as a method for business ethics research,» *Business Ethics: A European Review*, vol. 24, nº S1, pp. 24-40, 2015.
- [41] M. Twist, E. Buchanan y C. D' Aniello, «Exploration of University Members' Perceptions of Institutional Research Integrity Practices,» *Teaching Ethics*, vol. 18, nº 1, pp. 63-78, 2018.

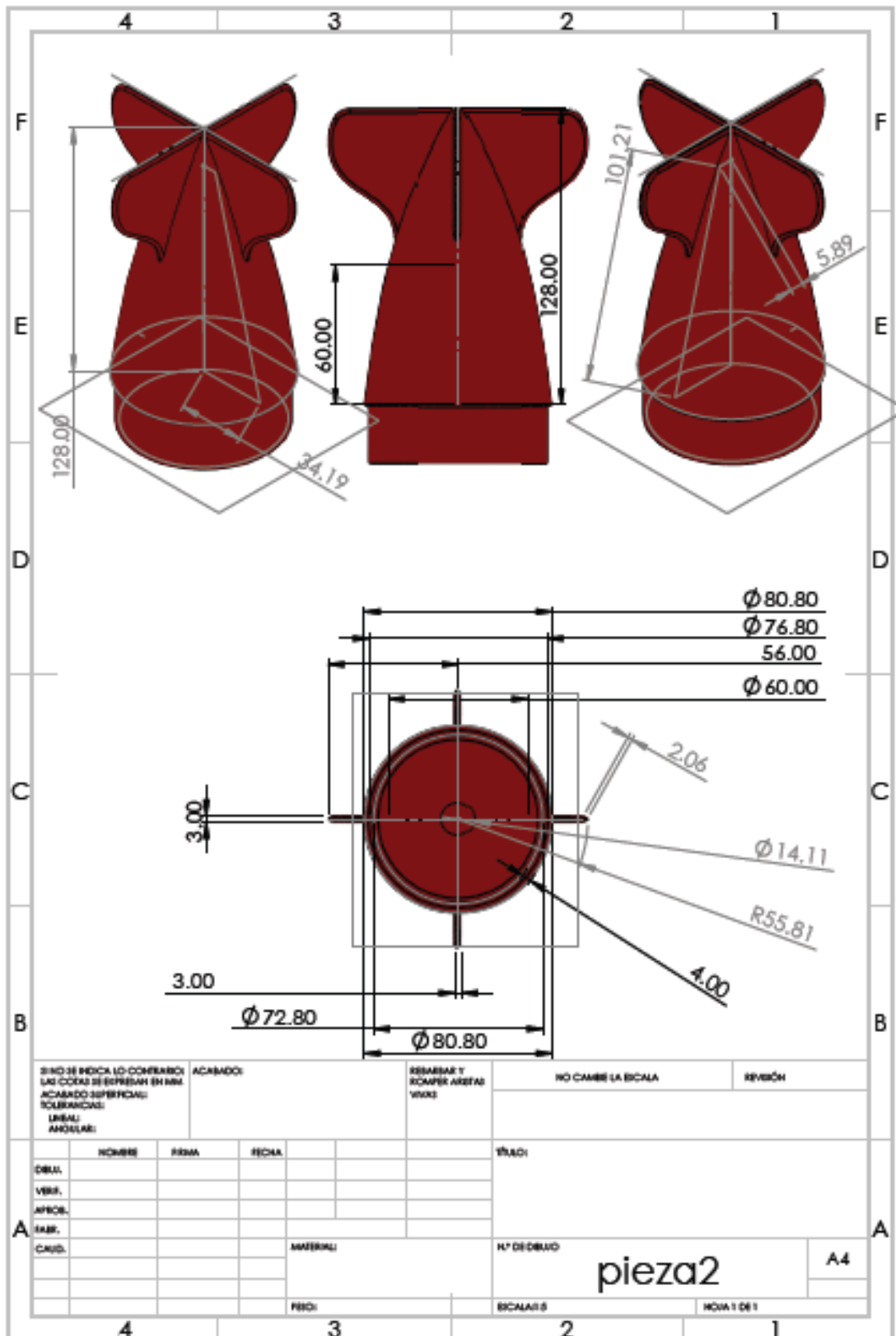
A handwritten signature in black ink, appearing to be 'A. An', located in the lower right quadrant of the page.

ANEXOS A:  
Matriz de consistencia



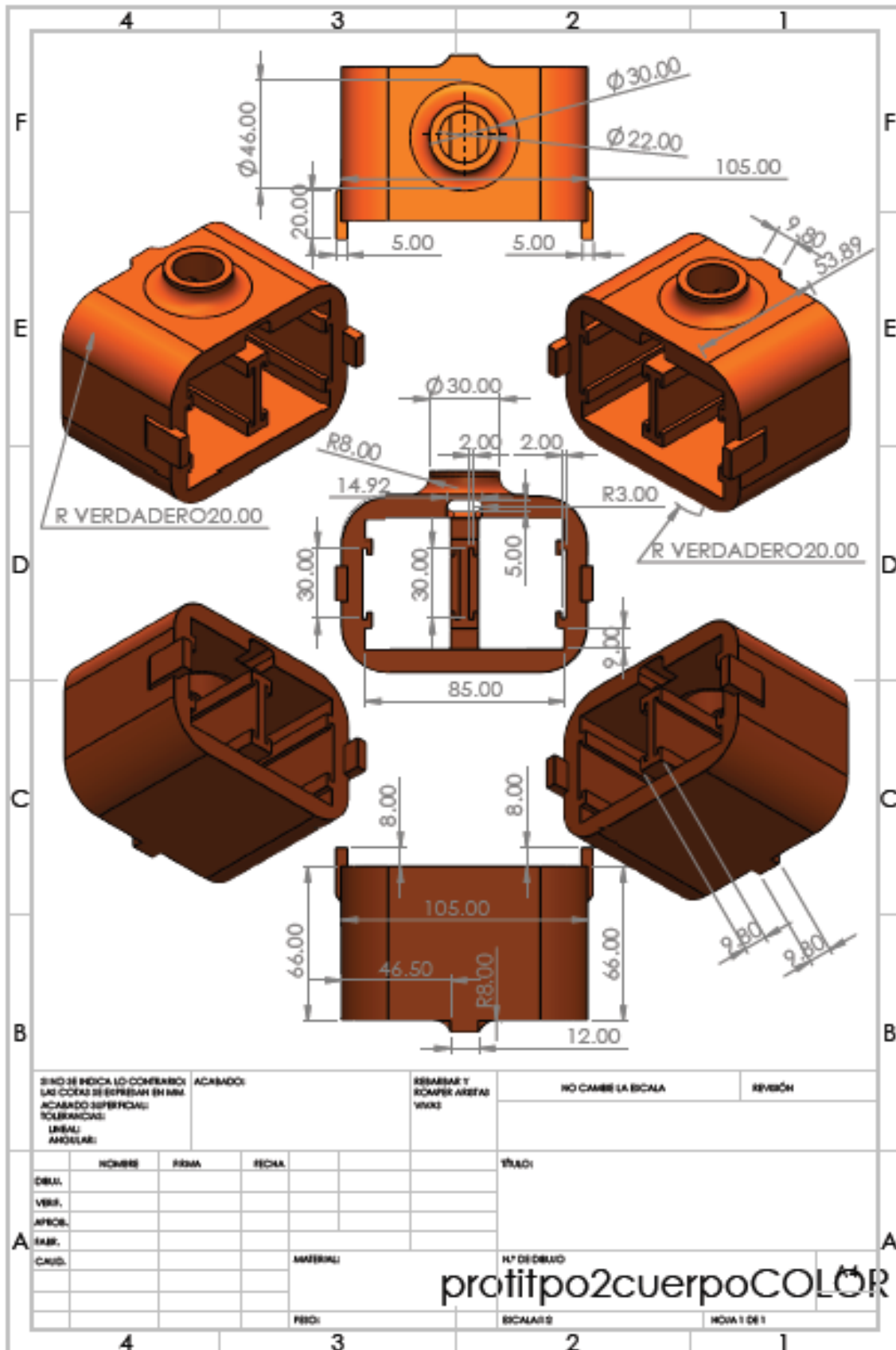
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
<p><b>GENERAL</b> ¿Cómo construir un modelo minisubmarino con propulsión magnetohidrodinámica?</p> <p><b>ESPECÍFICOS</b> ¿Cómo construir un modelo minisubmarino?</p> <p>¿Cómo construir un sistema de propulsión magnetohidrodinámica para un modelo de minisubmarino?</p>	<p><b>GENERAL</b> Construir un modelo minisubmarino con propulsión magnetohidrodinámica</p> <p><b>ESPECÍFICOS</b> Construir un modelo minisubmarino.</p> <p>Construir un sistema de propulsión magnetohidrodinámica para un modelo de minisubmarino.</p>	<p><b>GENERAL</b> La teoría electromagnética y de la Mecánica de Fluidos permite la construcción de un modelo de minisubmarino con propulsión magnetohidrodinámica.</p> <p><b>ESPECÍFICAS</b> La teoría de la Mecánica de Fluidos permite la construcción de un modelo de minisubmarino.</p> <p>La teoría electromagnética y la Dinámica de fluidos para flujo laminar y estacionario permite la construcción del sistema de Propulsión Magnetohidrodinámico.</p>	<p><b>INDEPENDIENT</b> <b>E X:</b> Sistema de propulsión magnetohidrodinámica para modelo de minisubmarino.</p> <p><b>DEPENDIENTE</b> <b>Y:</b> Modelo de minisubmarino.</p>	<p><b>TIPO DE INVESTIGACIÓN</b> Cuantitativa Tecnológica - Aplicada</p> <p><b>DISEÑO DE ESTUDIO</b> Experimental</p> <p><b>MÉTODO</b> Deductivo</p> <p><b>TECNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN</b> Registro de datos utilizando análisis de video</p> <p><b>INSTRUMENTOS</b> Máquinas y herramientas de Ingeniería mecánica Interface, sensores y Software de procesamiento de datos experimentales</p> <p><b>FUENTES</b> Artículos científicos Bibliografías Web</p>

Anexo B: Planos de las partes del prototipo de modelo de minisubmarino. Cola del prototipo

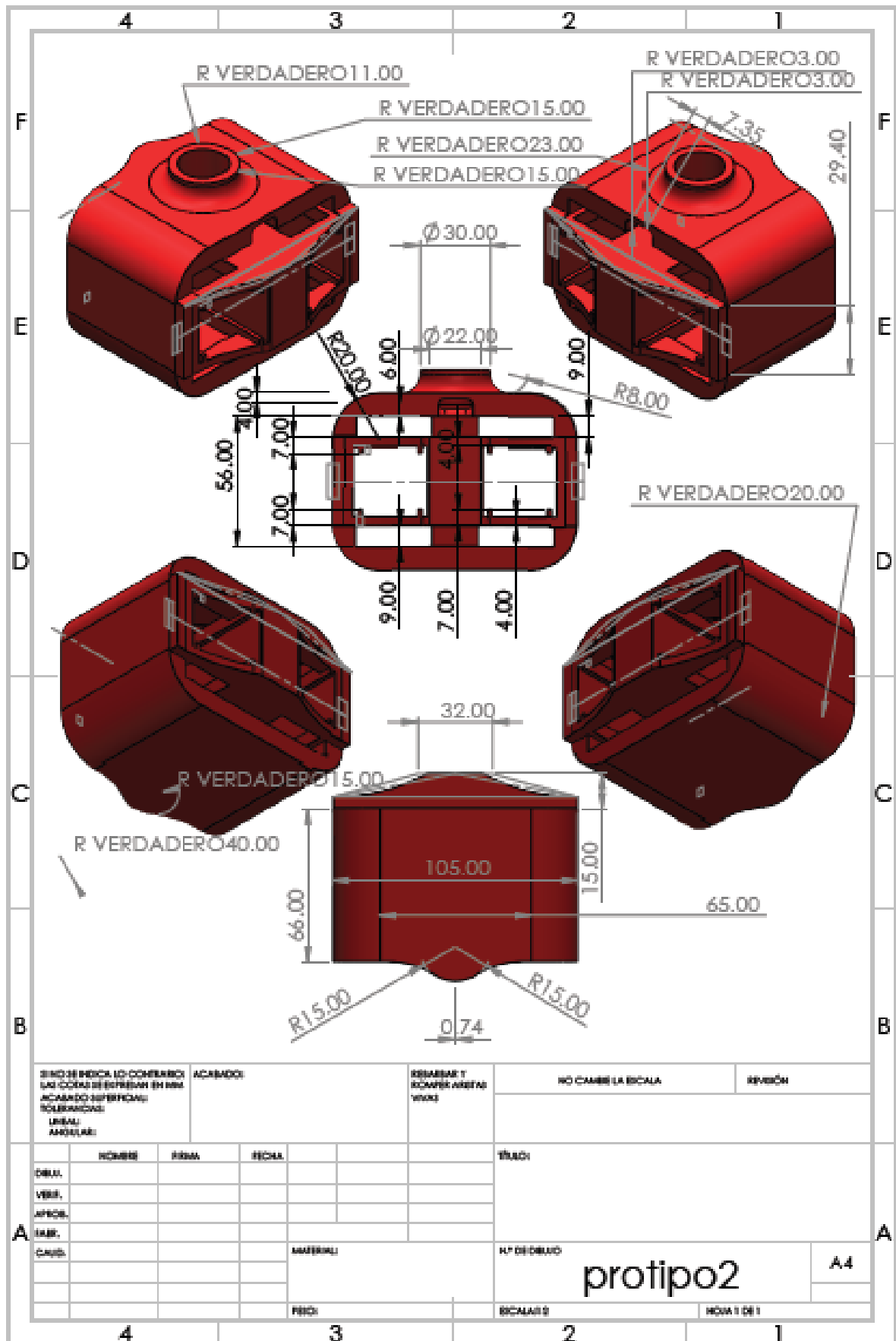


*Handwritten signature*

Anexo C. Primer prototipo de casco del propulsor MHD

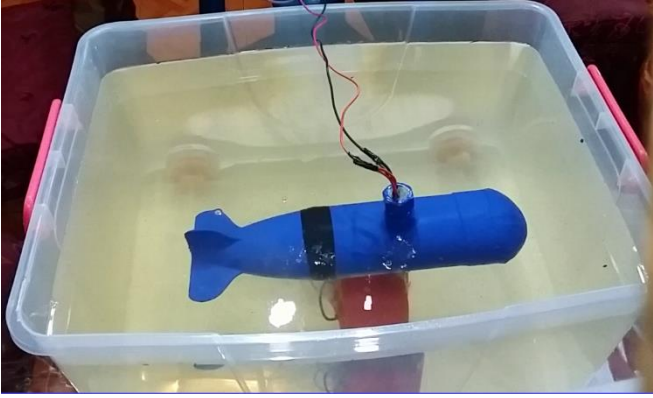
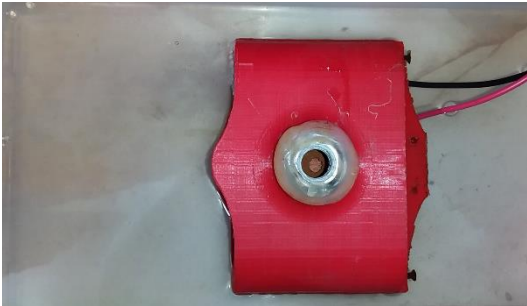


Anexo D. Prototipo final del casco del propulsor MHD



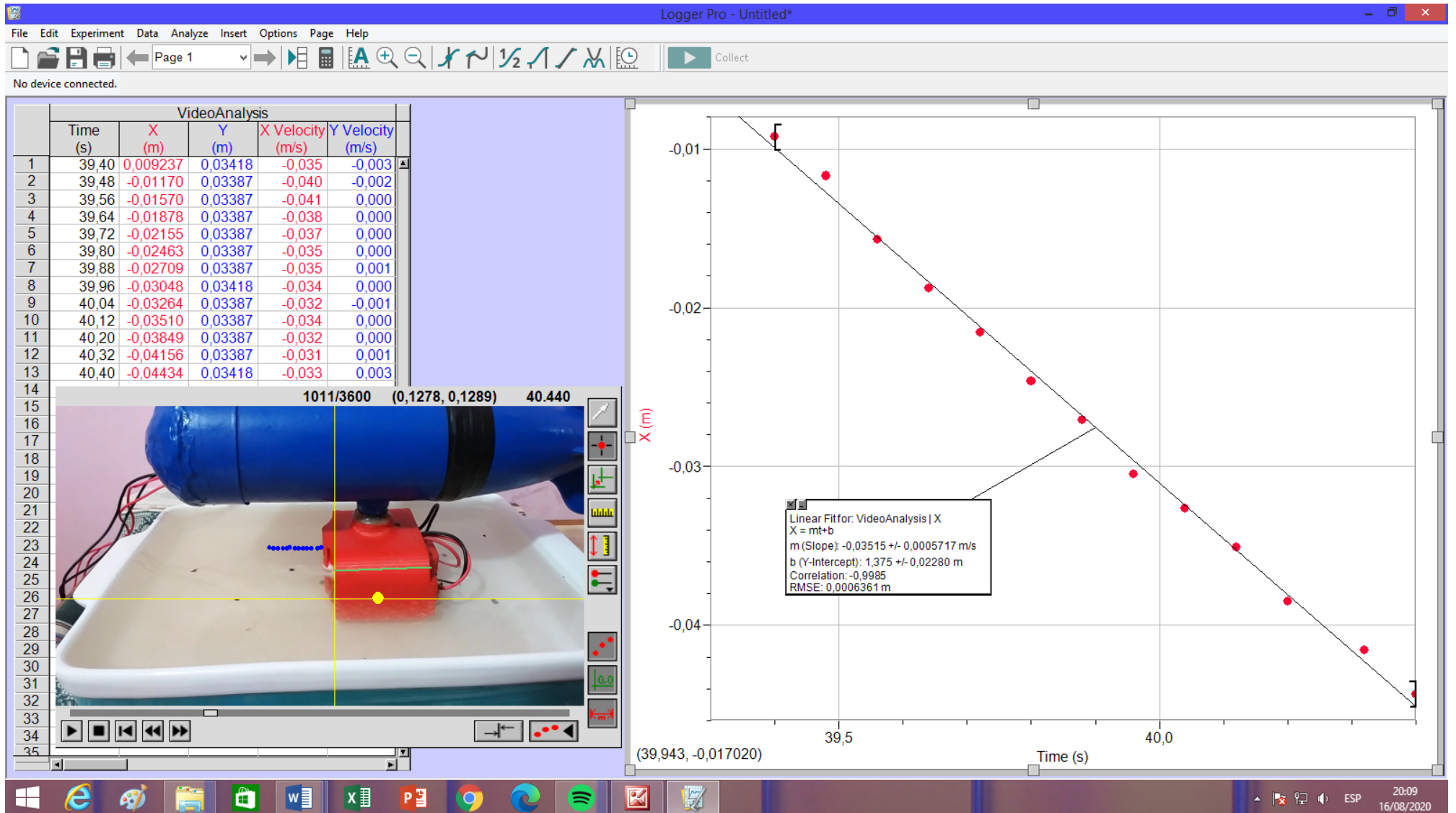
*[Handwritten signature]*

Anexo E: Fotografías



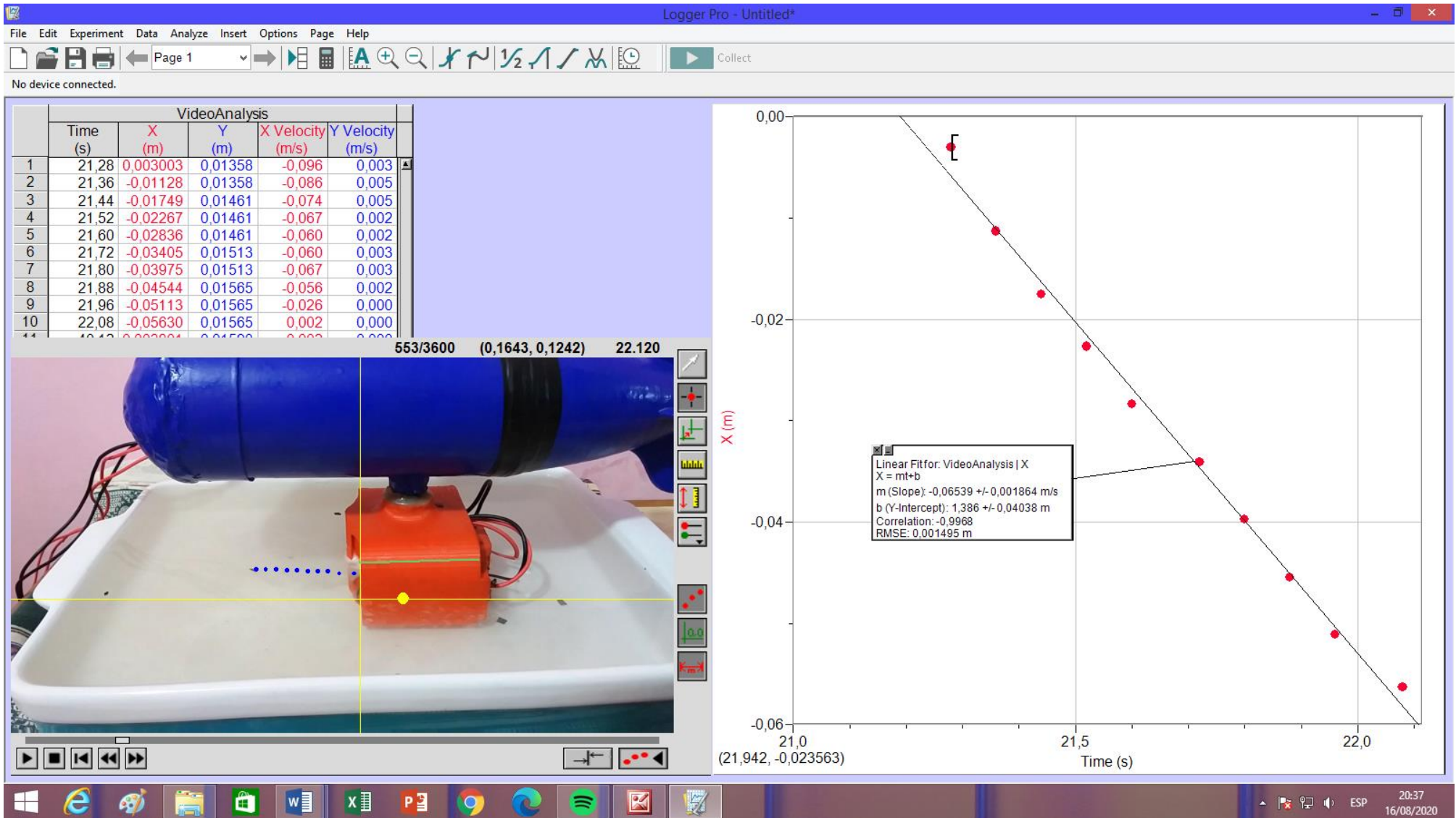
*Amor*

# ANEXO F: Registros Experimentales del propulsor canal derecho:



*Am*

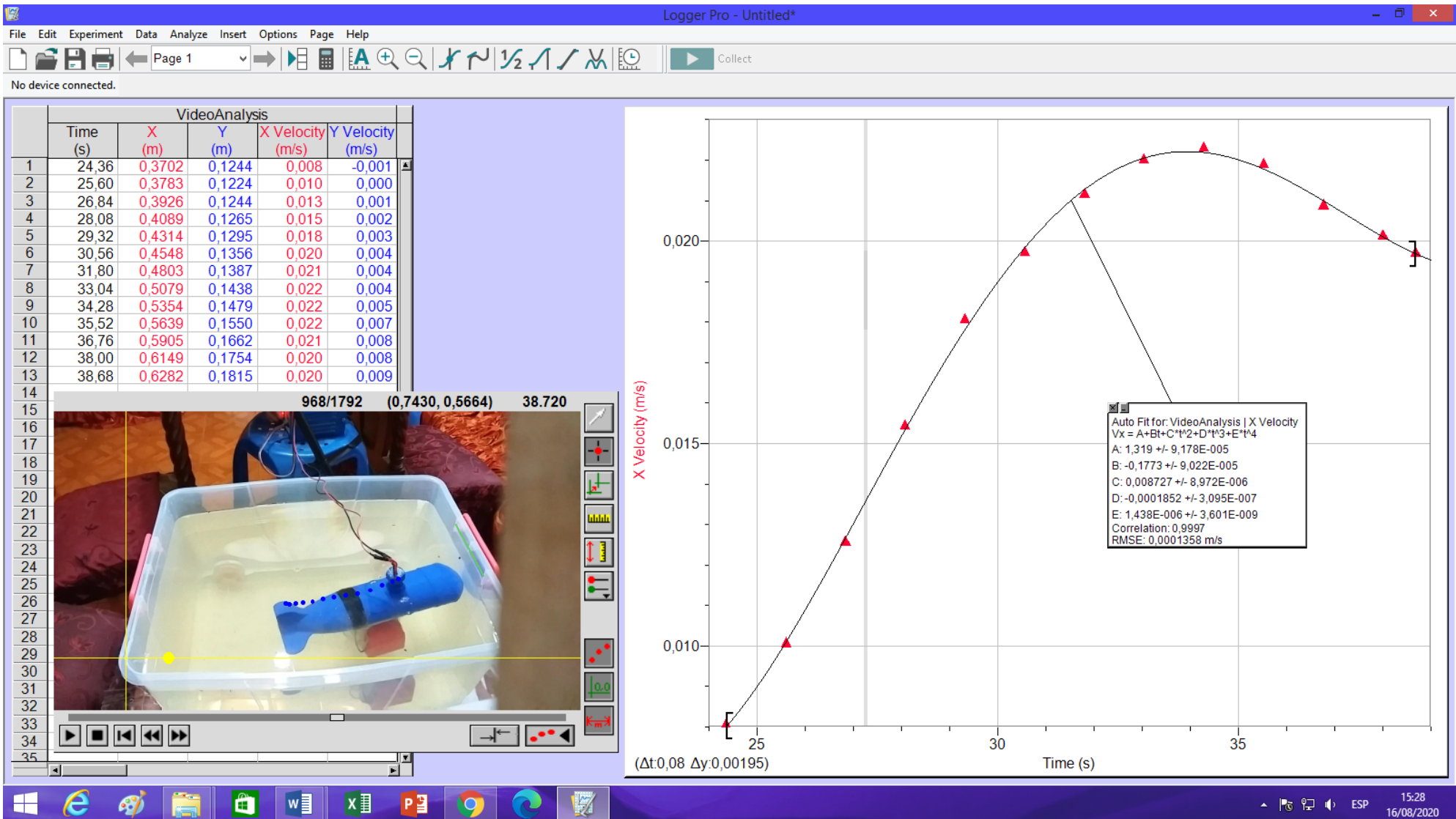
# ANEXO G: Registros Experimentales del propulsor canal izquierdo:



*[Handwritten signature]*



# ANEXO H: Registros Experimentales del modelo de minisubmarino



*Am*