

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Diseño preliminar del sistema propulsor de una embarcación interislas cero emisiones para Galápagos empleando energías renovables

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO NAVAL

Presentado por:

Daniel Sebastián Lalaleo Martínez

Andrea Nathaly Loor Mero

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

A Dios por darme fortaleza, paciencia, voluntad y sabiduría para realizar este proyecto, a mi esposa por haberme brindado su comprensión, atención y cariño durante el proceso, a mis padres y hermanos por ser incondicionales y siempre apoyarme. Gracias a todos por ser el pilar fundamental de mi vida.

Daniel Lalaleo

A Dios por ser mi fuente de esperanza, a mi padre que desde el cielo me brinda su infinito amor, a mi madre por todos los esfuerzos realizados y su apoyo incondicional, a mi novio y amigos que han ofrecido una mano solidaria en el momento indicado.

Andrea Loor

AGRADECIMIENTOS

Nuestros más sinceros agradecimientos a los docentes de la carrera de ingeniería naval por los conocimientos impartidos durante los años de formación profesional, en especial al Dr. Rubén Paredes, por la guía brindada en el desarrollo del proyecto.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Daniel Sebastián Lalaleo Martínez* y *Andrea Nathaly Loor Mero* y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Daniel Sebastián
Lalaleo Martínez



Andrea Nathaly Loor
Mero

EVALUADORES

.....
Nadia Muñoz Agila, MSc.

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Rubén Paredes Alvarado, PhD.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Las embarcaciones rápidas, principal medio de transporte en Galápagos, causan el 96% de gases de efecto invernadero al consumir aproximadamente un millón de galones de diésel anualmente. Para reducir la contaminación ambiental, surge la necesidad de reemplazar el combustible fósil por energías alternativas. El presente proyecto diseñó a nivel preliminar el sistema propulsor de una embarcación interislas usando exclusivamente energías renovables.

La energía propulsiva requerida a bordo se estimó a partir de la resistencia total usando Savitsky. Se consideraron 3 fuentes de alimentación: energía solar, hidrógeno líquido y gaseoso; y 3 sistemas: motor eléctrico estacionario, motor intraborda y thruster azimutal. La combinación seleccionada fue aquella que ocupaba menor espacio y peso a bordo y permitía a la embarcación alcanzar la máxima velocidad. Consta de 2 motores intraborda de 104.87 kW cada uno, alimentados por 15 tanques de hidrógeno gaseoso con capacidad de 3.63 kg de H₂, que permitiría a la embarcación alcanzar una velocidad máxima de 13 nudos en estado de mar 4.

Considerando un plazo de 20 años, la inversión inicial para el sistema actual de motores fuera de borda se recupera en 4 años mientras que para el sistema cero emisiones es 8 años. Por lo tanto, se concluye que es posible eliminar por completo las emisiones de gases contaminantes en las embarcaciones interislas existentes, pero la velocidad máxima es inferior a los 28 nudos actuales, sin embargo, se espera que esta tecnología evolucione para, en un futuro cercano, alcanzar la velocidad requerida por los armadores.

Palabras Clave: Efecto invernadero, hidrógeno, resistencia, sistema propulsor.

ABSTRACT

Fast boats, the main means of transportation in Galapagos, cause 96% of greenhouse gases by consuming approximately one million gallons of diesel per year. To reduce environmental pollution, the need arises to replace fossil fuel with alternative energy. This project developed a preliminary level of the propulsion system of an inter-island vessel using exclusively renewable energies.

The propulsive energy required on board is estimated from the total drag using Savitsky. Three power sources were considered: solar, liquid and gaseous energy; and 3 systems: stationary electric motor, inboard motor and azimuth thruster. The selected combination was the one that occupied less space and weight on board and allowed the boat to reach maximum speed. It consists of 2 inboard engines of 104.87 kW each, fed by 15 gaseous hydrogen tanks with a capacity of 3.63 kg of H₂, which would allow the vessel to reach a maximum speed of 13 knots in sea state 4.

Considering a term of 20 years, the initial investment for the current system of outboard motors is recovered in 4 years, while for the zero emissions system it is 8 years. Therefore, it is concluded that it is possible to completely eliminate polluting gas emissions in existing inter-island vessels, but the maximum speed is lower than the current 28 knots, however, this technology is expected to evolve in the near future. , reach the speed required by the shipowners.

Keywords: *Greenhouse effect, hydrogen, resistance, propulsion system.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE PLANOS.....	XI
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Energías Renovables potenciales.....	4
1.4.2 Aplicaciones navales de las energías renovables.....	7
1.4.3 Energía renovable disponible en Galápagos	10
1.4.4 Sistemas de propulsión eléctricos navales	11
1.4.5 Embarcaciones planeadoras.....	13
1.4.6 Potencia en la línea propulsora usando motor estacionario	14
1.4.7 Evaluación Económica de proyectos	14
CAPÍTULO 2.....	16
2. Metodología	16
2.1 Criterios para determinar los regímenes de una embarcación	16

2.2	Perfil de operación de una embarcación Interislas en Galápagos.....	18
2.3	Estimación de la resistencia al avance.....	19
2.3.1	Resistencia Total	19
2.3.2	Resistencia debido a las olas.....	20
2.3.3	Resistencia debido a “Whisker Spray”	22
2.3.4	Resistencia debido al aire	24
2.4	Energía Propulsiva Requerida (EPR)	24
2.5	Coeficientes de rendimiento propulsivos para un motor estacionario	25
2.6	Dimensionamiento del sistema propulsor alimentado por energía solar	28
2.6.1	Cálculo de la irradiación solar en Galápagos.....	28
2.6.2	Perdidas del sistema.....	29
2.6.3	Cálculo de la energía proporcionada por las baterías.....	30
2.6.4	Cálculo de la energía producida por los paneles solares.....	30
2.6.5	Balance de energía.....	32
2.7	Dimensionamiento del sistema propulsor alimentado por hidrógeno	33
2.7.1	Hidrógeno líquido.....	34
2.7.2	Hidrógeno gaseoso.....	35
2.7.3	Celdas de combustible.....	36
2.8	Potencia específica y densidad de potencia de los componentes.....	37
2.8.1	Ecuación para el motor eléctrico.....	38
2.8.2	Ecuación para el Thruster azimutal.....	39
2.8.3	Ecuación para motores Intraborda.....	40
2.8.4	Ecuación para el servomotor	41
2.9	Selección y dimensionamiento de la hélice.	43
2.10	Pala del timón y servomotor	43
2.11	Dimensionamiento del eje	43
CAPÍTULO 3.....		45

3.	Resultados y Análisis	45
3.1	Comparación de la resistencia al avance de 2 prototipos de interislas optimizados	45
3.2	Coeficientes propulsivos obtenidos para la embarcación seleccionada	47
3.3	Energía de propulsión requerida para la embarcación seleccionada	47
3.4	Acomodación de espacios.....	50
3.5	Comparación entre los sistemas de propulsión naval usando las potenciales energías renovables	52
3.6	Velocidad máxima alcanzada por cada sistema usando hidrógeno gaseoso...	54
3.7	Componentes de los sistemas de propulsión eléctricos propuestos	56
3.8	Análisis de factibilidad económica del sistema propuesto	61
3.8.1	Análisis y flujo de caja para el sistema actual y el propuesto	61
CAPÍTULO 4.....		65
4.	Conclusiones y Recomendaciones.....	65
4.1	Conclusiones.....	65
4.2	Recomendaciones.....	67
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

ABREVIATURAS

BHP	Potencia al freno
DHP	Potencia de la hélice
DPNG	Dirección del Parque Nacional Galápagos
DNV	Det Norske Veritas
EHP	Potencia efectiva
EPR	Energía propulsiva requerida
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
IICA	Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
IIGE	Instituto de Investigación Geológico y Energético
IHP	Potencia instalada
IMO	International Maritime Organization
MARPOL	Convenio internacional para prevenir la contaminación de buques
MEER	Ministerio de Electricidad y Energías Renovables
OMI	Organización Marítima Internacional
ONU	Organización de las Naciones Unidas
SHP	Potencia al eje
SLR	Relación velocidad en nudos y raíz cuadrada de la eslora
TIR	Tasa interna de retorno
VAN	Valor Actual Neto
WPS	Wind Propulsion Systems

SIMBOLOGÍA

CO_2	Dióxido de carbono
C_v	Coeficiente de velocidad
C_B	Coeficiente de bloque
D	Puntal de la embarcación
F_v	Número de Froude volumétrico
β	Ángulo de astilla muerta
J	Joule
km	Kilómetro
m	Metro
h	Hora
kJ	Kilojoule
kg	Kilogramo
KG	Posición vertical del centro de gravedad
g	Gramo
C	Carbono
B	Eslora de la embarcación
Bm	Manga de la china
Lwl	Eslora de flotación
LCG	Posición longitudinal del centro de gravedad desde el espejo
$H_{\frac{1}{3}}$	Altura significativa de la ola

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Componentes de una pila de combustible.....	6
Figura 1.2 Embarcaciones en servicio que usan energía eólica.....	8
Figura 1.3 Embarcaciones en servicio que usan hidrógeno gaseoso.....	9
Figura 1.4 Energía solar en la Industria Naval Ecuatoriana	10
Figura 1.5 Insolación promedio de las principales provincias del Ecuador.....	11
Figura 1.6 Motor eléctrico conectado a thruster azimutal	12
Figura 1.7 Thruster azimutal.....	12
Figura 1.8 Motor intraborda	13
Figura 1.9 Embarcación de planeo.....	13
Figura 1.10 Potencias para un motor estacionario	14
Figura 2.1 Perfil de operación representativo de las embarcaciones interislas operando en Galapagos	18
Figura 2.2 Altura Significativa de la Ola.....	20
Figura 2.3 Efecto de Whisker spray.....	22
Figura 2.4 Radiación solar diaria en Galápagos.....	28
Figura 2.5 Diagrama de flujo para el cálculo del sistema fotovoltaico	33
Figura 2.6 Potencia específica del motor eléctrico	38
Figura 2.7 Densidad de potencia del motor eléctrico.....	39
Figura 2.8 Potencia específica del Thruster azimutal	40
Figura 2.9 Potencia específica de motores intraborda	40
Figura 2.10 Densidad de potencia de motores intraborda	41
Figura 2.11 Potencia específica del servomotor.....	42
Figura 2.12 Densidad de potencia del servomotor	42
Figura 3.1 Comparación de la resistencia en régimen de planeo entre los dos modelos considerados	46
Figura 3.2 Ángulo de asiento dinámico	46
Figura 3.3 EHP vs Velocidad embarcación seleccionada	47
Figura 3.4 Distribución de espacios.....	51
Figura 3.5 Espacio designado para sala de máquinas	51
Figura 3.6 Diagrama de flujo para encontrar la velocidad máxima	Error! Bookmark not defined.

Figura 3.7 Resultados del script implementado en Python.....56

Figura 3.8 Componentes de los sistemas de propulsión propuestos57

Figura 3.9 Recuperación de inversión para el modelo con sistema de propulsión tradicional63

Figura 3.10 Recuperación de inversión para el modelo con sistema de propulsión cero emisiones63

Figura 3.11 Comparación entre el sistema actual y el sistema cero emisiones.....64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Comparación energética entre algunos combustibles.	5
Tabla 1.2 Ventajas y desventajas de usar hidrógeno comprimido.....	7
Tabla 1.3 Ventajas y desventajas de usar hidrógeno líquido	7
Tabla 2.1 Perfil de operación.....	19
Tabla 3.1 Datos Comparativos entre las dos lanchas optimizadas	45
Tabla 3.2 Coeficientes obtenidos	47
Tabla 3.3 Requerimientos de energía de la embarcación seleccionada	48
Tabla 3.4 Valores de operación y acomodación de la embarcación de referencia.....	50
Tabla 3.5 Evaluación a 28 nudos de velocidad ida y vuelta	52
Tabla 3.6 Evaluación solo reduciendo a la mitad los pasajeros	53
Tabla 3.7 Evaluación considerando solo el viaje de ida	53
Tabla 3.8 Flujo de caja, VAN y TIR para ambos sistemas	62

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Embarcación con motor eléctrico estacionario	Error! Bookmark not defined.
PLANO 2 Embarcación con motor intraborda.....	59
PLANO 3 Embarcación con motor eléctrico estacionario y thruster azimutal	60

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Las Islas Galápagos fueron incluidas en la lista de patrimonios naturales de la humanidad en el año 2001 por la ONU, convirtiéndolas en un gran atractivo turístico para extranjeros y locales. Los registros del 2019 indican el ingreso de 271.238 turistas de los cuales el 67% representa la población extranjera, mientras que el 33% representa turistas locales. Además, entre los años 2010 y 2019 antes de la pandemia se registró una tasa de incremento de arribos del + 5.10% según el informe anual de visitantes (Dirección del Parque Nacional Galápagos & Observatorio de Turismo de Galápagos., 2020).

El crecimiento turístico del archipiélago representa fuertes ventajas para la economía de sus habitantes, pero también genera aspectos perjudiciales para el medio ambiente, ya que aumenta la demanda del transporte interislas. Esto implica, un mayor consumo de combustibles fósiles, principales responsables las emisiones de gases contaminantes. Por otra parte, el transporte de diésel y gasolina por medio marítimo hacia las Islas ha provocado accidentes por derrame de estos, causando severos perjuicios en el medio marino (EL COMERCIO, 2019).

Una alternativa al sistema de propulsión tradicional para botes de 13 m de eslora, con 900 HP distribuidos en 3 motores fuera de borda que navegan a 28 nudos, es el uso de sistemas eléctricos a base de energías renovables. Un ejemplo en la implementación de estas nuevas tecnologías en las Islas Galápagos fue la primera lancha eléctrica de 7.5 m de eslora a base de energía solar denominada Solaris, que fue desarrollada por la Dirección del Parque Nacional Galápagos, DPNG. El único suministro energético para su propulsión se generó usando 8 paneles fotovoltaicos que alimentan un motor fuera de borda eléctrico que permite a la embarcación desarrollar velocidades de hasta 7 nudos (Moya Cajas, 2019; Zurita, 2020).

Por esta razón, nuestro proyecto busca reducir la contaminación ambiental de las embarcaciones interislas de Galápagos implementando una alternativa ecológicamente sostenible al sistema de propulsión actual.

1.1 Descripción del problema

El transporte marítimo es una de las principales fuentes de ingresos en las islas Galápagos, pero su crecimiento genera efectos secundarios adversos al ecosistema como contaminación acústica, derrame de combustibles o lubricantes y emisiones de gases de efecto invernadero.

Los combustibles usados en el sector de transporte son la mayor fuente de emisiones de gases de efecto invernadero en Galápagos. Por ejemplo, las emisiones en el 2018 proveniente del diésel y gasolina representaron un 74% y 22% respectivamente, mientras que el gas licuado de petróleo apenas tuvo un 4% en el sector residencial (IIGE, 2018).

Otro punto de vital importancia es que el petróleo no es un recurso renovable y a futuro puede llegar a agotarse, causando fuertes incrementos en los precios de los combustibles y volviendo insostenible la capacidad de adquirirlos. Adicionalmente, un factor logístico son los costos relacionados con el transporte del combustible hacia las Islas Galápagos para su distribución (Jara, 2017).

Con todos los antecedentes mencionados, se pretende desarrollar una alternativa para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero debido al uso de combustibles fósiles en el sector de cabotaje empleando un nuevo sistema de propulsión a base de energías renovables para las embarcaciones interislas de Galápagos, que aumente la eficiencia energética y reduzca los costos operativos a largo plazo.

1.2 Justificación del problema

El reducir las emisiones contaminantes hacia la atmósfera por parte de industrias, fábricas y transporte, ha sido uno de los constantes debates entre las principales potencias mundiales, por lo tanto, mediante una serie de disposiciones y tratados internacionales se busca establecer normas que permitan actuar enmarcados en la ley para reducir esta controversia. Algunos tratados importantes a nivel

internacional que son: el tratado de París, el protocolo de Kioto, la Organización Marítima Internacional y el convenio MARPOL.

Uno de los objetivos de la Organización Marítima Internacional es reducir la contaminación que producen las embarcaciones en el mar, para ello se han creado medidas como planes para un consumo eficiente de combustible o sistemas de propulsión que reduzcan el consumo de estos, además de resoluciones como disminuir la velocidad de los buques en un 10% con el objetivo de reducir en un 20% las emisiones generadas.

En el 2005, se revisó el Anexo VI del convenio de MARPOL para frenar la contaminación y se añade puntos importantes como la reducción en un 0.50% de azufre como límite máximo a nivel mundial a partir del 01 de enero del 2020. Además, se establecieron que límites para los óxidos de azufre, óxido de nitrógeno y partículas contaminantes deben ser reducidos en un 0.10%.

En las islas Galápagos se estima que en un año se emplean alrededor de un millón de galones de gasolina, los cuales representan el monto más elevado en los gastos operativos para la flota interislas. El proyecto reduce casi por completo el gasto en consumo de combustible ya que la energía adoptada se obtendrá de fuentes naturales virtualmente inagotables (ESPOL, 2021).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Dimensionar el sistema propulsor de una embarcación interislas para Galápagos empleando exclusivamente energías renovables para la determinación de su velocidad máxima.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Analizar las diferentes opciones tecnológicas de uso marino basadas en energías renovables.

2. Determinar la energía de propulsión requerida de la embarcación optimizada en base al perfil de operación típico utilizando las predicciones semi-empíricas de Savitsky.
3. Calcular el límite de velocidad de navegación sostenida del diseño conceptual optimizado en función de las restricciones de peso y volumen de la máxima energía que puede ser almacenada a bordo.
4. Definir la viabilidad económica del sistema cero emisiones propuesto comparando los gastos con un sistema propulsor tradicional.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Energías Renovables potenciales

Las energías renovables se obtienen de fuentes naturales que producen energía de forma indefinida. Como ejemplos tenemos: la energía solar, la energía eólica, la energía mareomotriz, biocombustibles y la energía a partir de hidrógeno (Línea Verde, 2020).

El uso de amoniaco (NH₃) no será considerado en el presente trabajo según lo expuesto en el **Error! Reference source not found..**

1.4.1.1 Biocombustibles

Entre los biocombustibles líquidos o biocarburantes tenemos el bioetanol con sus derivados y el biodiésel. El primero es empleado como una alternativa para reemplazar la gasolina y el segundo como una alternativa para el gasoil obtenido a partir de combustibles fósiles (Schallenberg Rodríguez, 2008).

1.4.1.2 Energía Eólica

La energía eólica aprovecha el trabajo producido por el viento. El Sol es responsable del calentamiento desigual de zonas en nuestro planeta, lo que provoca la traslación del aire alrededor del mismo produciendo corrientes de viento. Esta energía ha sido usada por embarcaciones propulsadas empleando velas y también ha sido útil para obtener energía eléctrica a partir de energía cinética producto de mover grandes aspas en aerogeneradores modernos (Schallenberg Rodríguez, 2008).

1.4.1.3 Energía Solar

Es una fuente de energía renovable que se obtiene a partir de la radiación solar, mediante un dispositivo llamado panel solar que capta esta radiación transformándola en corriente eléctrica continua que se acumula en un banco de baterías, el cual provee de energía a los consumidores (Ingenieros, 2018).

1.4.1.4 Hidrógeno

El hidrógeno es un elemento químico, muy ligero que puede ser utilizado en pilas de combustible para generar electricidad. Durante su combustión libera 122 kJ/g de energía, lo cual es 2.75 veces mayor que los combustibles de hidrocarburos (Karapinar Kapdan & Kargi, 2006). El hidrógeno se puede obtener a partir del agua mediante el proceso de electrólisis, también se obtiene a partir de combustibles fósiles y finalmente a partir de biomasa (Isgró, 2015).

Como se puede observar en la Tabla 1.1, los combustibles son típicamente comparados considerando 3 aspectos. Estos están relacionados con la energía que genera cada uno de acuerdo con su peso y volumen; en el Apéndice A también se realiza una comparativa entre el hidrógeno y el amoníaco.

El factor de movilidad es un coeficiente adimensional usado en la industria marítima que combina 2 requerimientos importantes. El primero, el combustible debe ser lo más ligero posible (Energía por unidad de masa) y el segundo es que ocupe el mínimo espacio dentro de la embarcación (Energía por unidad de volumen) (Veziroğlu & Şahin, 2008).

Tabla 1.1 Comparación energética entre algunos combustibles

(Veziroğlu & Şahin, 2008).

Combustible	Energía por unidad de masa [J/kg]	Energía por unidad de volumen [J/m ³]	Factor de movilidad
Gasolina	47.4	34.85	0.76
Metanol	22.3	18.10	0.23
Etanol	29.9	23.60	0.37
Hidrógeno líquido	141.9	10.10	1
Gas natural	50.0	0.040	0.75
Hidrógeno gaseoso	141.9	0.013	1

Las celdas de combustible son dispositivos generadores de electricidad que no emiten ningún tipo de gas contaminante. A diferencia de las baterías convencionales que solo almacenan energía, estas, producen energía cuando son provistas de combustible: hidrógeno y oxígeno (Mahecha Rodriguez, 2018). En la Figura 1.1 se muestra los diferentes componentes de la celda de combustible. Este dispositivo es alimentado por hidrógeno como fuente de combustible y al final de la reacción electroquímica se produce energía y agua.

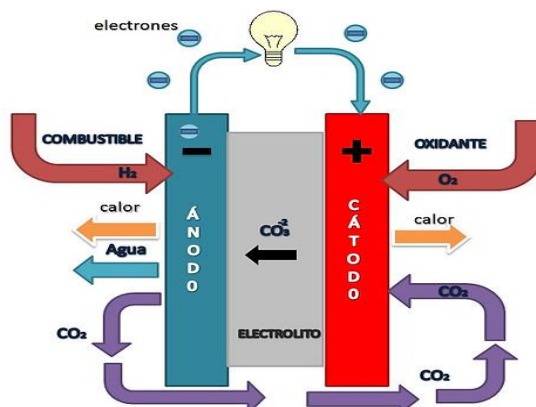
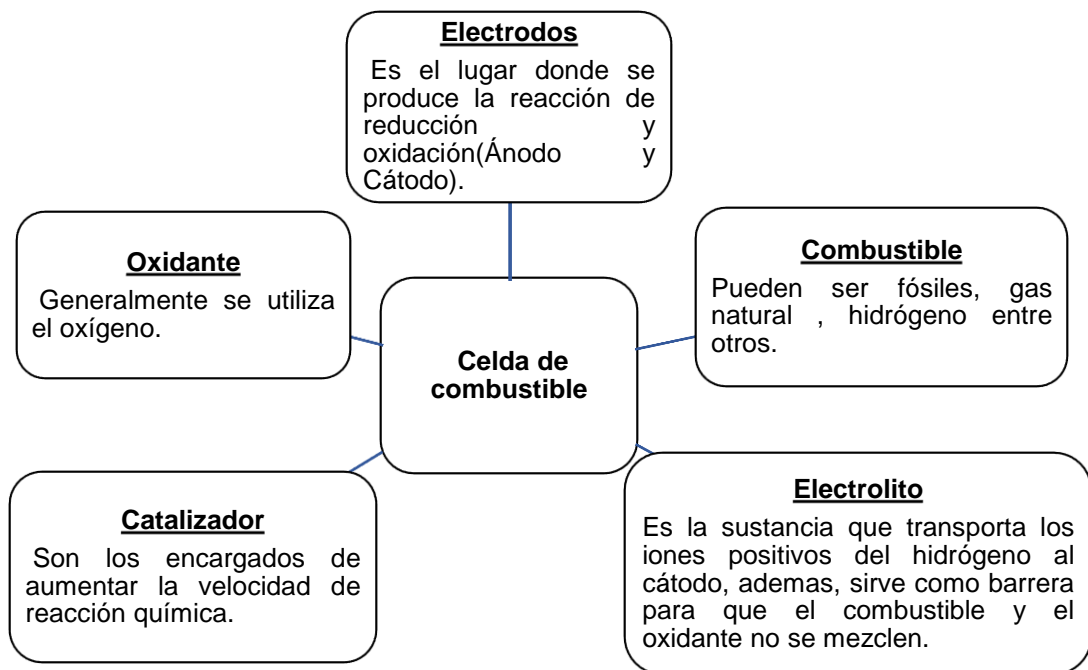


Figura 1.1 Componentes de una pila de combustible

(Chang et al., 2017a; Hidrogeno18, 2020)

1.4.1.5 Hidrógeno gaseoso

El hidrógeno gaseoso puede ser almacenado en tanques presurizados. En la Tabla 1.2 se resume de manera generalizada las principales ventajas y desventajas de esta forma de almacenamiento.

Tabla 1.2 Ventajas y desventajas de usar hidrógeno comprimido
(Isgró, 2015)

Ventajas	Desventajas
Proceso más conocido y comercializado en el mundo.	Altas presiones de hasta 700 bar para los tanques de almacenamiento.
Fácil de transportar por barco, avión, gaseoducto.	Al comprimir el hidrógeno se pierde un 8% de la energía.

1.4.1.6 Hidrógeno líquido

En la Tabla 1.3 se muestra las principales ventajas y desventajas a la hora de optar por utilizar el sistema de almacenamiento a base de tanques de hidrógeno líquido criogénico.

Tabla 1.3 Ventajas y desventajas de usar hidrógeno líquido
(Balbona Calvo, 2014)

Ventajas	Desventajas
Mayor densidad energética que en forma gaseosa.	Al ingresar a la celda de combustible puede aumentar la temperatura lo cual produce pérdida de eficiencia.
Mayor almacenamiento en comparación con el hidrógeno comprimido.	Pequeñas filtraciones de hidrógeno pueden provocar una mezcla explosiva con el aire circundante.
Bajas presiones de trabajo, 340 bar, en comparación con el hidrógeno comprimido.	Riesgo de congelación para operarios. Temperatura de trabajo es de -253 °C.

1.4.2 Aplicaciones navales de las energías renovables

Las energías renovables presentan una amplia gama de aplicaciones en la industria naval. A continuación, se muestra algunas de las iniciativas que se han desarrollado dentro y fuera del país.

1.4.2.1 Embarcaciones que aprovechan la energía eólica

La Figura 1.2 muestra los proyectos construidos que son basados en energía eólica con sus características principales a nivel global.

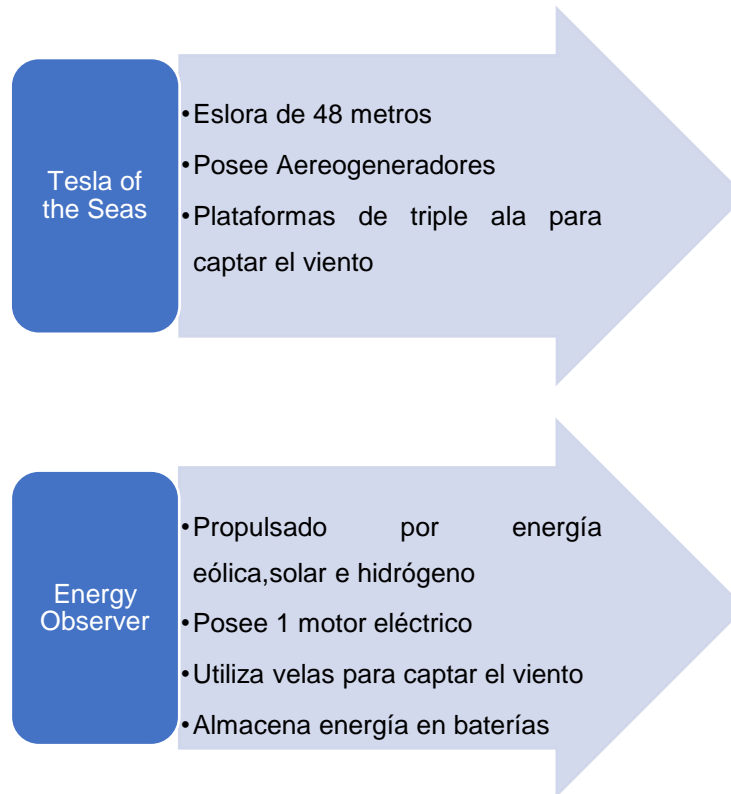


Figura 1.2 Embarcaciones en servicio que usan energía eólica

(García, 2008)

1.4.2.2 Embarcaciones que aprovechan la Energía a partir de Hidrógeno

La Figura 1.3 muestra los diferentes proyectos que se han desarrollado a partir del uso de hidrógeno como fuente alterna de combustible y combinan diferentes fuentes de almacenamiento de hidrógeno.

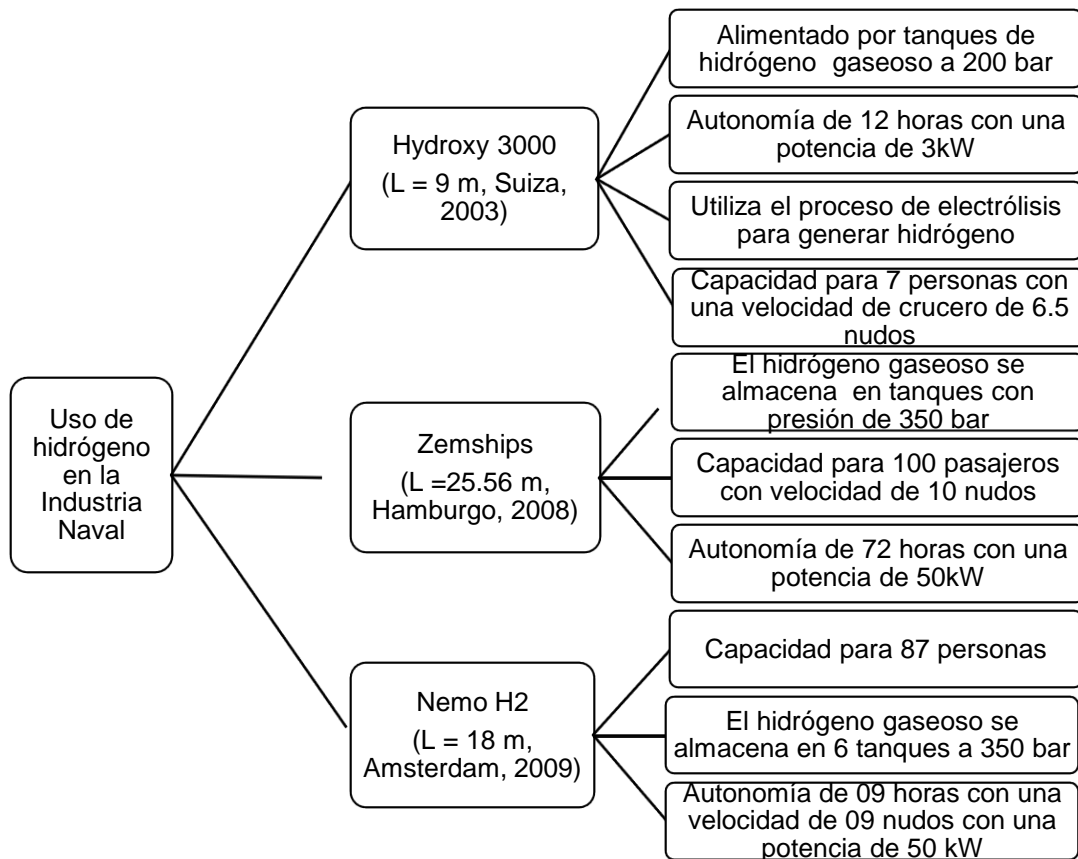


Figura 1.3 Embarcaciones en servicio que usan hidrógeno gaseoso

(Andruetto, 2019; Balbona Calvo, 2014)

1.4.2.3 Embarcaciones que aprovechan la Energía Solar

La Figura 1.4 muestra los proyectos que se han llevado a cabo en el Ecuador con energía solar en embarcaciones de recreación, alcanzando velocidades de hasta 07 nudos.

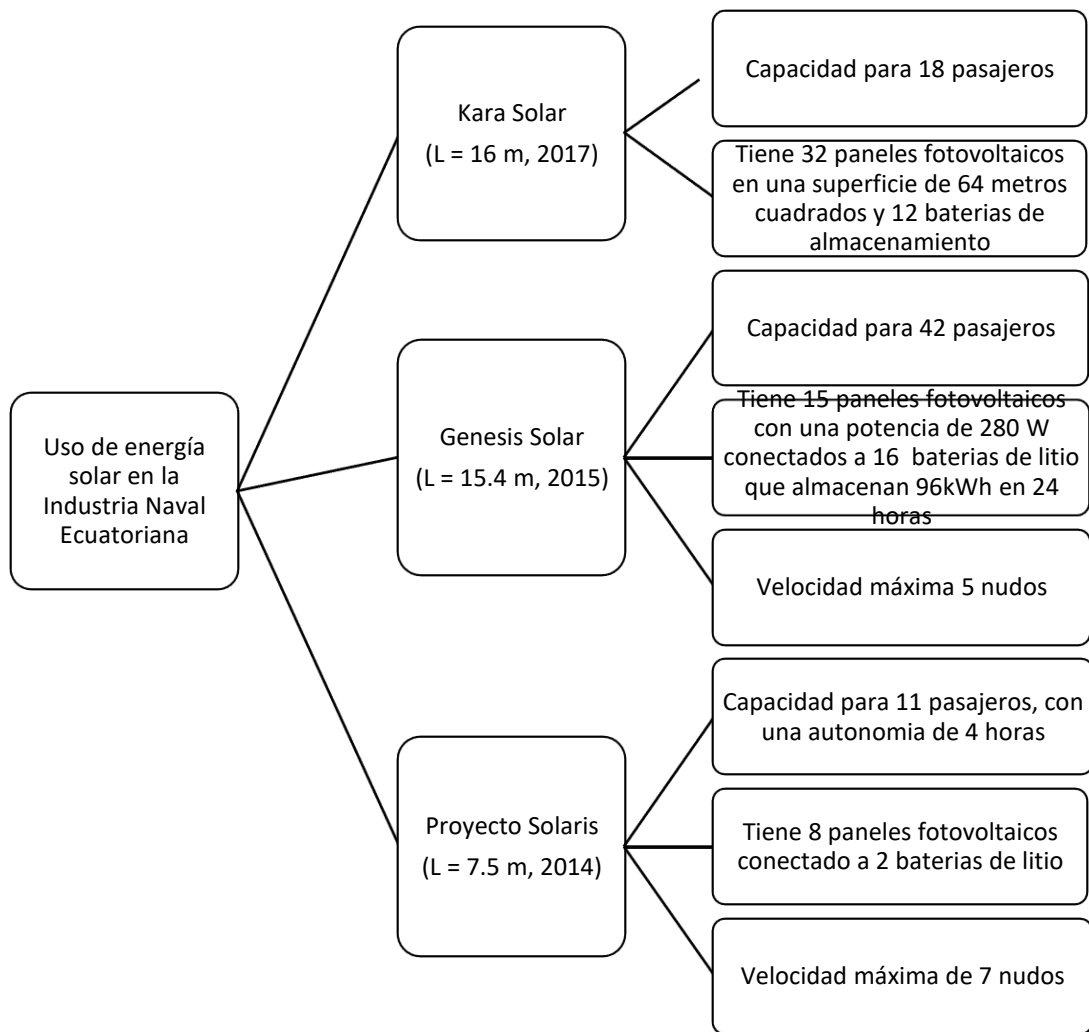


Figura 1.4 Energía solar en la Industria Naval Ecuatoriana

(Alvarado Ponce, 2017; Moya & Arroyo, 2015; Zurita, 2020)

1.4.3 Energía renovable disponible en Galápagos

Para completar el dimensionamiento de los diferentes recursos renovables disponibles, se muestra a continuación los factores físicos que se necesitan para cada cálculo en Galápagos específicamente.

1.4.3.1 Radiación solar

La Figura 1.5 muestra los niveles de radiación diaria promedio de superficie horizontal para cada mes. Los datos de la insolación reflejan la radiación directa del

sol (Sánchez, 2015), el recurso solar con mayores índices de radiación se encuentra en las zonas costeras. (Celec, 2018)

INSOLACIÓN PROMEDIO 10 AÑOS EN kWh m⁻² día⁻¹

Sitio: Latitud (Sur) /Longitud (Oeste)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cotopaxi:-1/79	3.73	3.98	4.05	3.88	3.74	3.47	3.71	3.97	3.98	3.77	3.88	3.79
Cuenca-Loja:-3/79	3.76	3.99	3.98	3.87	3.84	3.53	3.79	4.17	4.29	4.08	4.26	4.05
Esmeraldas:0/80	4.05	4.42	4.71	4.51	4.17	3.79	3.75	3.90	3.96	3.88	3.93	3.97
Guayaquil: -3/80	4.34	4.58	4.66	4.55	4.37	3.85	3.96	4.30	4.53	4.37	4.62	4.53
Ibarra-Tulcán:0/79	3.73	4.01	4.17	3.95	3.75	3.56	3.85	4.01	3.95	3.79	3.81	3.73
Islas Galápagos:-1/91	6.25	6.56	6.78	6.49	6.03	5.56	4.92	5.19	5.28	5.49	5.46	6.01
Manabí:-2/81	5.05	5.22	5.51	5.45	5.00	4.01	3.84	4.15	4.42	4.26	4.54	4.91
Napo: -2/77	4.45	4.36	4.33	4.04	4.11	3.74	4.01	4.55	4.82	4.59	4.47	4.67
Quevedo: -1/80	4.15	4.44	4.63	4.50	4.21	3.68	3.68	3.92	4.01	3.86	4.01	4.09
Quito:-1/79	3.73	3.98	4.05	3.88	3.74	3.47	3.71	3.97	3.98	3.77	3.88	3.79
Riobamba: -2/79	3.74	3.97	3.96	3.83	3.76	3.43	3.63	3.98	4.05	3.82	3.99	3.87
Santa Elena: -3/81	5.25	5.43	5.62	5.51	5.13	4.32	4.25	4.59	4.97	4.84	5.13	5.28

Figura 1.5 Insolación promedio de las principales provincias del Ecuador

(Sánchez, 2015)

1.4.3.2 Viento

En Galápagos el viento tiene promedios por hora que varían en el año. Desde el 21 de enero hasta el 7 de mayo, la velocidad del viento alcanza los niveles más altos. En abril, las corrientes de aire pueden alcanzar 14.2 km/h, mientras que en los otros meses el promedio es de alrededor 13.2 km/h (Weather Spark, 2021).

1.4.4 Sistemas de propulsión eléctricos navales

Los sistemas de propulsión eléctricos navales son variados. La Figura 1.6 muestra que se puede conectar un motor eléctrico estacionario de gran variedad de potencias a un thruster azimutal que evita el uso de eje y hélice, visto con más detalle en la Figura 1.7 (Baumuller, 2020).

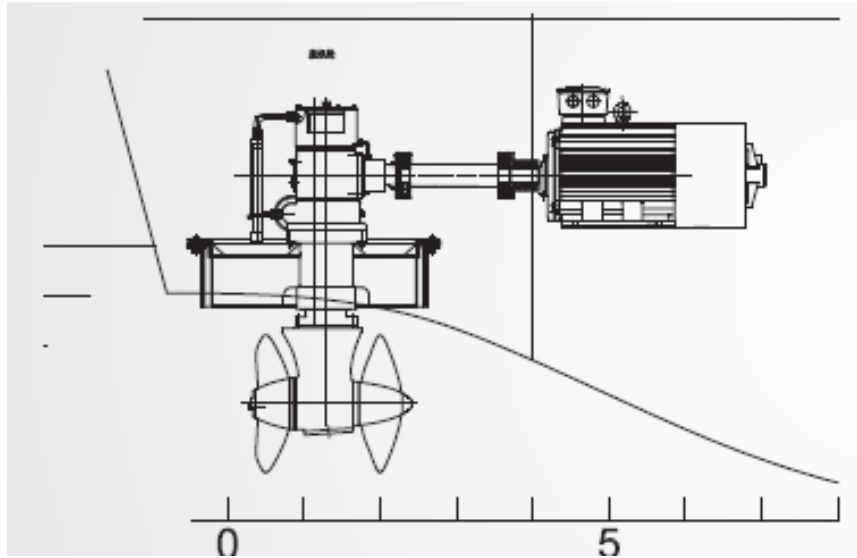


Figura 1.6 Motor eléctrico conectado a thruster azimuthal
(Marine, 2020)

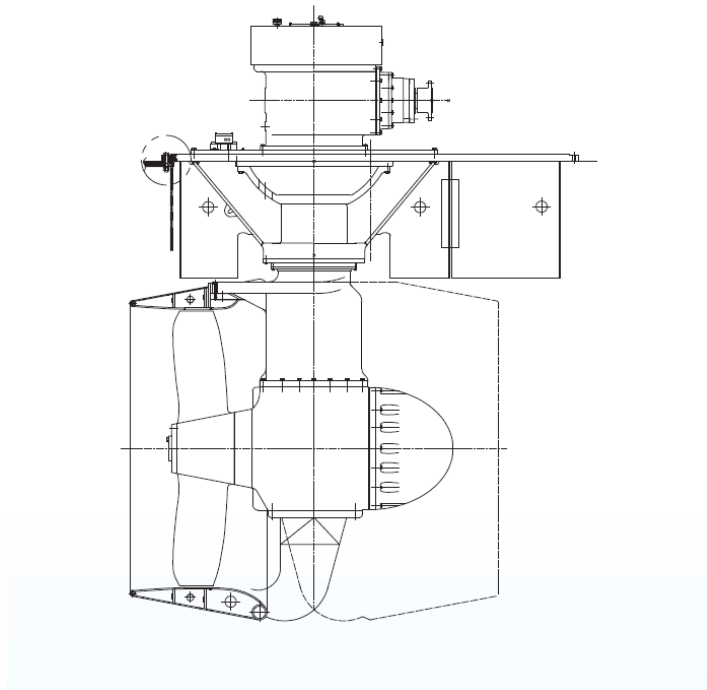


Figura 1.7 Thruster azimuthal
(Marine, 2020)

La Figura 1.8 muestra que también se puede reemplazar el motor eléctrico tradicional por un motor intraborda, ya que estos son más ligeros y adaptables a cualquier espacio a bordo (Voltimum, 2016).

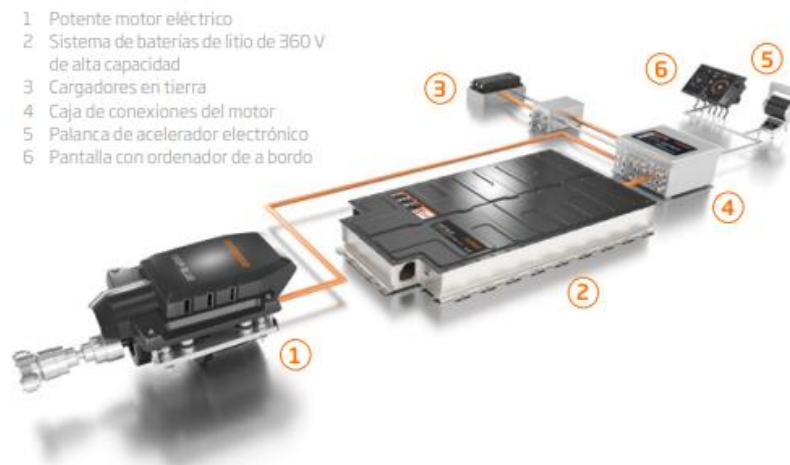


Figura 1.8 Motor intraborda
 (Torquedo, 2020)

1.4.5 Embarcaciones planeadoras

En este tipo de embarcaciones actúan fuerzas de origen hidrostático e hidrodinámico sobre el casco de esta. Cuando una embarcación está en reposo se generan presiones de tipo hidrostático debido al agua que es desplazada por el volumen del casco que se sumerge por la acción de la gravedad, mientras que cuando la embarcación empieza su movimiento como se observa en la Figura 1.9, se ven también afectadas por las fuerzas hidrodinámicas, a medida que aumenta la velocidad, también aumenta la presión que el casco ejerce sobre el agua ocasionando que este se eleve reduciendo la superficie mojada y por ende también la resistencia (Fuentes, 2020)(Savitsky, 1964).

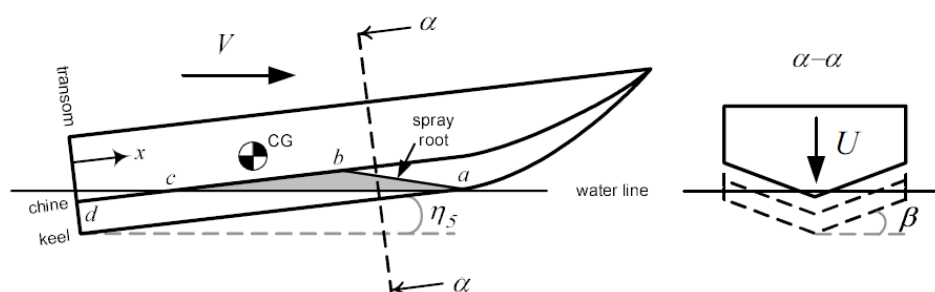


Figura 1.9 Embarcación de planeo
 (Rosén, 2004)

1.4.6 Potencia en la línea propulsora usando motor estacionario

La Figura 1.10 muestra las potencias medidas en diferentes sectores de la línea propulsora usando un motor estacionario. El EHP es la potencia necesaria para vencer la resistencia de remolque a una velocidad dada, el THP es la potencia de empuje que entrega la hélice, el DHP es la potencia entregada a la hélice, el SHP es la potencia medida desde el eje, el BHP es la potencia que se mide en el acople del motor al eje y finalmente el IHP representa la potencia entregada por el motor y considera factores adicionales como el funcionamiento del motor a su capacidad máxima (Orejas, n.d.).

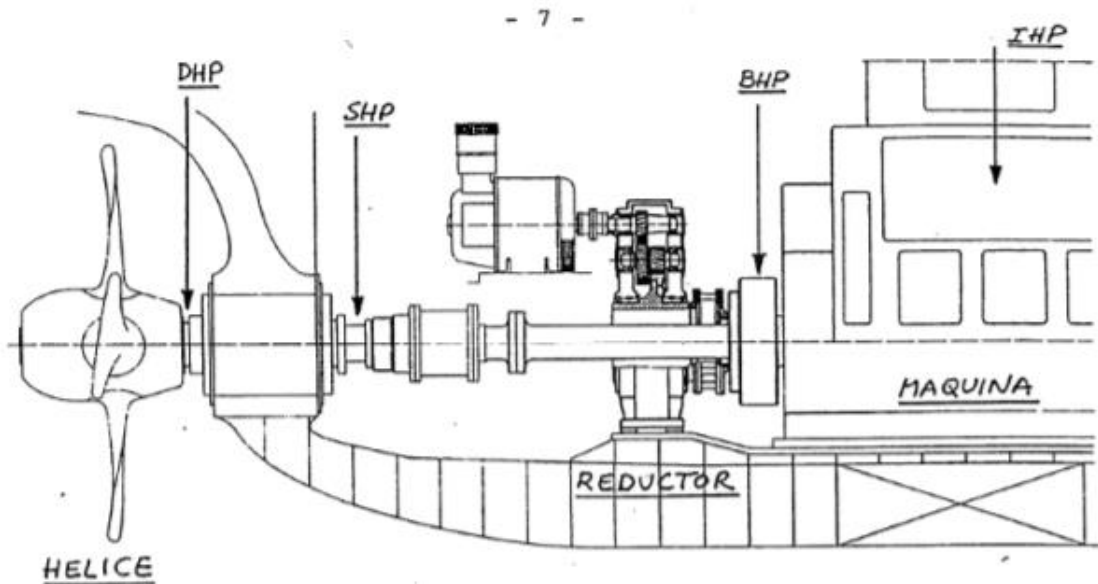


Figura 1.10 Potencias para un motor estacionario

(Orejas, n.d.)

1.4.7 Evaluación Económica de proyectos

Para la evaluación económica o comparación de rentabilidad de 2 proyectos se va a utilizar el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

1.4.7.1 Valor Actual Neto (VAN)

Es un criterio de inversión para decidir si el proyecto es viable o no. Este método calcula los flujos de ingreso que se van a generar, así como los egresos y la inversión que se genera por la creación del proyecto (Economipedia, 2017).

$$VAN = -I_o + \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1+k)^t} \quad (1.1)$$

Donde:

Ft : Son flujos de dinero en cada periodo

I_o : Es la inversión realizada en el momento inicial($t=0$)

n : Es el número de periodos de tiempo.

k : Tipo de descuento o tipo de interés exigido en la inversión.

Parámetros por considerar para evaluar el VAN:

$VAN > 0$: El proyecto se puede considerar viable.

$VAN = 0$: El proyecto no genera beneficios, pero tampoco perdidas.

$VAN < 0$: El proyecto va a generar perdidas (Conexión ESAN, 2017).

1.4.7.2 Tasa Interna de retorno (TIR)

Es una tasa de interés o de rentabilidad que puede ofrecer una inversión. Este parámetro da una medida de la rentabilidad del proyecto (Economipédica, 2017).

$$0 = -I_o + \sum_{j=1}^n \frac{Fj}{(1+TIR)^j} \quad (1.2)$$

Donde:

Fj : Flujo neto para el periodo j

I_o : Inversión en el periodo 0

n : Horizonte de evaluación

Para evaluar el TIR se toma la tasa de descuento de flujos (k) del VAN. Si $TIR > k$, el proyecto debe ser aceptado; si $TIR = k$ la situación es similar a cuando $VAN = 0$, mientras que para $TIR < k$, el proyecto debe ser rechazado porque no alcanza la rentabilidad mínima solicitada en la inversión (Economipédica, 2017)

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Para realizar el dimensionamiento preliminar del sistema propulsor de una embarcación optimizada utilizando energías renovables se desarrollaron los siguientes pasos:

- a) Implementar las formulaciones semi-empíricas de Savitsky en un programa “Savitsky64flaps” en lenguaje FORTRAN, incluyendo el efecto por olas, resistencia debido al aire y la componente de resistencia por “Whisker Spray” para obtener la gráfica de resistencia total versus velocidad de las dos embarcaciones optimizadas por (Villamarín, 2020) y (Meléndez, 2021),
- b) Seleccionar la embarcación que presente menor resistencia.
- c) Obtener la energía propulsiva requerida de la embarcación seleccionada considerando el perfil de operación típico de las embarcaciones interislas de la ruta más significativa (Gaona, 2021a),
- d) Calcular el peso y volumen del sistema de propulsión de la embarcación de referencia usando motores fuera de borda para considerarlos como restricción.
- e) Comparar las energías renovables potenciales en base a las restricciones identificadas.
- f) Determinar la velocidad máxima que puede alcanzar la embarcación seleccionada usando cada una de las alternativas de propulsión y considerando las restricciones de peso y volumen,
- g) Dimensionar los componentes propulsivos del sistema seleccionado,
- h) Realizar un análisis de factibilidad económica.

2.1 Criterios para determinar los regímenes de una embarcación

Mediante el coeficiente de velocidad, ecuación 2.2, y número de Froude volumétrico, ecuación 2.1, podemos verificar en que régimen se encuentra la embarcación de acuerdo con la Tabla 2.1.

$$Fv = \frac{V}{\left(g * Vol^{\frac{1}{3}}\right)^{0.5}} \quad (2.1)$$

Donde:

- V : Velocidad [ft/s]
- g : Gravedad [ft/s²]
- Vol : Volumen [ft³]

$$Cv = \frac{V}{(b * g)^{0.5}} \quad (2.2)$$

Donde:

- V : Velocidad [ft/s]
- g : Gravedad [ft/s²]
- b : Manga [ft]

Tabla 2.1 Criterios para evaluar la resistencia al avance en los regímenes de la embarcación

(Mercier & Savitsky, 1967; Savitsky, 1964; Savitsky & Brown, 1976)

Criterios		
<p>Cv<0.5</p> <ul style="list-style-type: none"> • Embarcación de desplazamiento • Se utilizó el Método de Holtrop-Mennen (Holtrop & Mennen, 1982) y Maxsurf Resistance. 	<p>Cv[0.5-1.5] y Fv<2</p> <ul style="list-style-type: none"> • Régimen de semi-planeo • Se utilizó el método de Savitsky-Mercier (Mercier & Savitsky, 1967) y Maxsurf Resistance. 	<p>Cv>1.5 y Fv>2</p> <ul style="list-style-type: none"> • Régimen de planeo • Se utilizó el método de Savitsky (Savitsky, 1964) para estimar la resistencia a través del programa Savitsky64flaps.

2.2 Perfil de operación de una embarcación Interislas en Galápagos

La ruta más frecuente de las embarcaciones interislas, considerando el número de viajes y pasajeros, es el trayecto de ida y vuelta entre la Isla Santa Cruz e Isla Isabela, la cual se muestra en la Figura 2.1. Esta ruta tiene una distancia de 49 millas náuticas que es recorrida en promedio de 390 minutos (Gaona, 2021a).

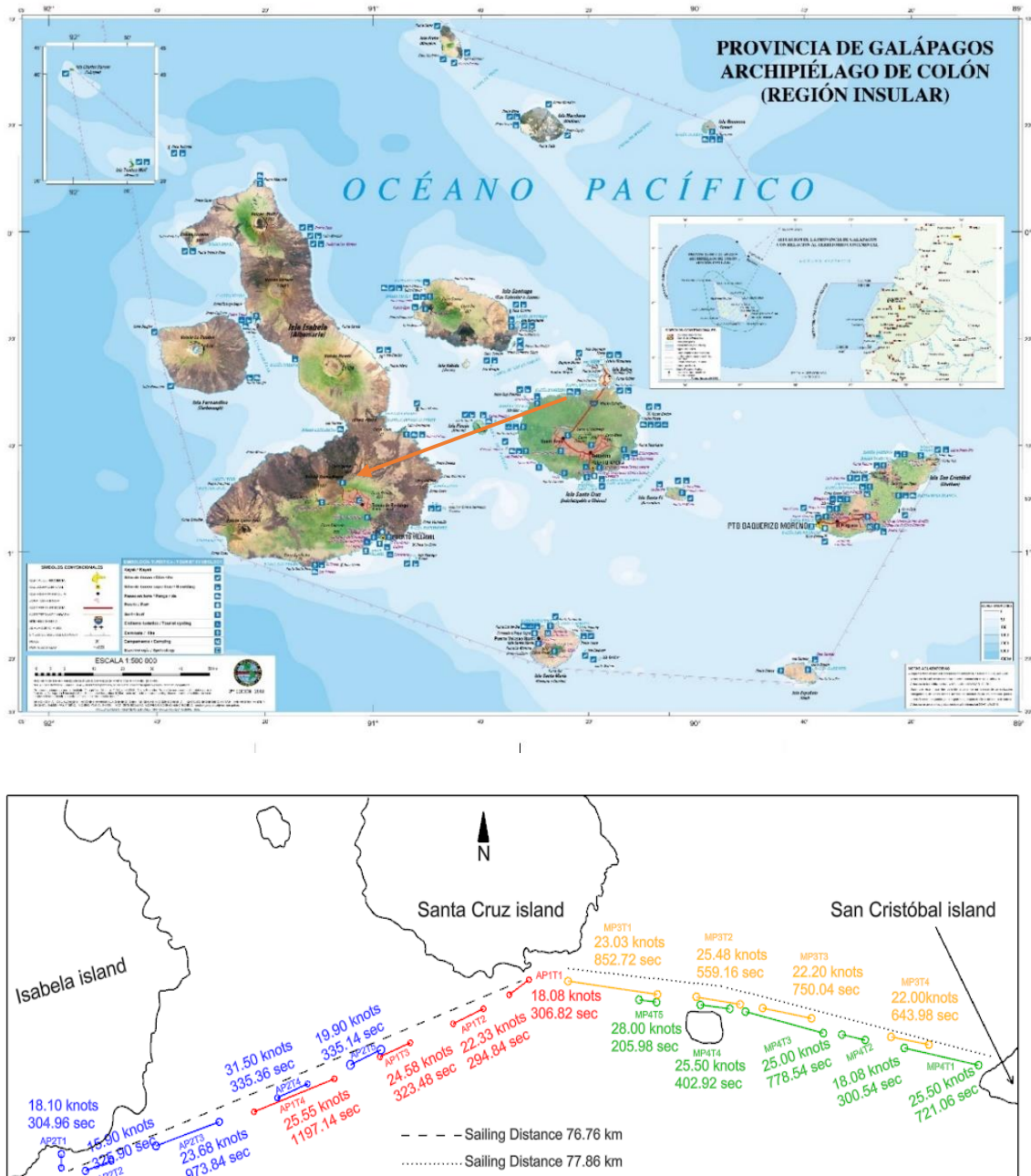


Figura 2.1 Perfil de operación representativo de las embarcaciones interislas operando en Galapagos
(Ministerio de Turismo, 2019)

La Tabla 2.2 muestra las operaciones típicas que realiza una lancha interislas durante un día de operación (Gaona, 2021a):

Tabla 2.2 Perfil de operación representativo de una embarcación interislas

Perfil de operación					
	Operación/Maniobra	V [nudos]	Tiempo [min]	Tiempo [h]	Distancia [Mn]
Ida	Maniobra de combustible	3.00	5.00	0.08	0.25
	Traslado a zona de embarque	5.00	5.00	0.08	0.42
	Embarque de pasajeros	0.00	30.00	0.50	0.00
	Salida de la rada	9.00	10.00	0.17	1.50
	Navegación entre islas	28.00	105.00	1.75	49.00
	Ingreso a la rada	4.00	20.00	0.33	1.33
	Desembarque de pasajeros	0.00	20.00	0.33	0.00
Vuelta	Embarque de pasajeros	0.00	30.00	0.50	0.00
	Salida de la rada	4.00	20.00	0.33	1.33
	Navegación entre islas	28.00	105.00	1.75	49.00
	Ingreso a la rada	9.00	10.00	0.17	1.50
	Desembarco de pasajeros	0.00	20.00	0.33	0.00
	Traslado a boya de fondeo	3.00	10.00	0.17	0.50
	Total		390.00	6.50	104.83

2.3 Estimación de la resistencia al avance

2.3.1 Resistencia Total

Para la estimación de la resistencia al avance en el régimen de planeo se utilizaron las ecuaciones semi-empíricas de Savitsky (Savitsky, 1964). El proceso es iterativo y se busca determinar el ángulo de asiento dinámico que satisfaga las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y momentos actuando sobre el casco. Se utilizó el programa *Savitsky64flaps*, los datos de entrada se muestran en el APÉNDICE B, donde se consideran los componentes de resistencia que se muestran en la ecuación 2.3.

$$R_t = R_{fr} + R_p + R_w + R_{ws} + R_{air} \quad (2.3)$$

Donde:

R_t : Resistencia total

R_{fr} : Resistencia por fricción

R_p : Resistencia por presión

R_w : Resistencia debido a las olas

R_{ws} : Resistencia debido a “Whisker Spray”

R_{air} : Resistencia debido al aire

2.3.2 Resistencia debido a las olas

Este componente permite estimar el incremento de resistencia cuando la embarcación navega en mar abierto, considerando la altura significativa de un estado de mar específico. Para este componente se utilizaron las ecuaciones semi-empíricas de la publicación de Savitsky-Brown (Savitsky & Brown, 1976) mostradas en las ecuaciones (2.4) a (2.6).

Sea-State	Significant Wave Height $H_{1/3}$ (m)	Sustained wind speed (kts)	Typical percent probability	Description
0-1	0 – 0.1	0 - 6	0.5	Calm, rippled waves
2	0.1 – 0.5	7 – 10	6.3	Smooth, wavelets waves
3	0.5 – 1.25	11 – 16	22	Slight to moderate waves
4	1.25 – 2.5	17 – 21	28	Moderate to rough waves
5	2.5 – 4.0	22 – 27	20	Rough to very rough waves

Figura 2.2 Altura Significativa de la Ola

(Doerry, 2020)

La Figura 2.2 representa la altura significativa de la ola de acuerdo con el estado de mar. Para las Islas Galápagos el estado de mar considerado fue de 3 y la altura significativa de 1m de acuerdo al trabajo realizado por (Villamarín, 2020).

SLR=2

$$\frac{R_{aw}}{wBm^3} = 66 * 10^{-6} * \left(\frac{H_{1/3}}{b} + 0.5 \right) * \frac{\left(\frac{l}{b} \right)^3}{C_{\Delta}} + 0.0043 * (\tau - 4) \quad (2.4)$$

SLR=4

$$\frac{R_{aw}}{\Delta} = \frac{0.3 * \frac{H_1^{\frac{3}{2}}}{b}}{1 + 2 * \frac{H_1^{\frac{3}{2}}}{b}} * (1.76 - \frac{\tau}{6} - 2 * \tan^3 \beta) \quad (2.5)$$

SLR=6

$$\frac{R_{aw}}{wb^3} = \frac{0.158 * \frac{H_1^{\frac{3}{2}}}{b}}{(1 + (\frac{H_1^{\frac{3}{2}}}{b})) * (0.12 * \beta - 21 * C_{\Delta} * (5.6 - \frac{L}{b}) + 7.5 * (6 - \frac{L}{b}))} \quad (2.6)$$

$$C_{\Delta} = \frac{\Delta}{w * Bpx^3} \quad (2.7)$$

Donde:

- R_{aw} : Resistencia debido a las olas [lb]
- w : Peso específico del agua [lb/ft³]
- b : Manga [ft]
- $\frac{H_1}{3}$: Altura significativa de la ola [ft]
- L : Eslora [ft]
- β : Angulo de astilla muerta [grados]
- C_{Δ} : Coeficiente estático
- Δ : Desplazamiento [lb]
- Bpx : Distancia máxima entre chinás [ft]
- T : Angulo de asiento dinámico [grados]

Para valores intermedios de SLR se realizó una interpolación cuadrática.

Si los valores no están dentro del rango de SLR (2 a 6), se utiliza la siguiente ecuación empírica con valores de SLR de 1 a 6 especialmente para la condición de pre-planeo (Radojčić et al., 2019):

$$\frac{R_A}{\Delta} = 1.3 * \left(\frac{H_1}{B_{PX}} \right)^{0.5} * \left(\frac{L_P}{Vol^{\frac{1}{3}}} \right)^{-2.5} * Fn_v \quad (2.8)$$

Donde:

- R_A : Resistencia debido a olas [lb-fuerza]
- Δ : Desplazamiento de la embarcación [libras]
- H_1 : Altura significativa de la ola [ft]
- B_{PX} : Manga de la china [ft]
- Vol : Volumen de la embarcación [ft³]
- L_P : Eslora de la embarcación [ft]
- Fn_v : Numero de Froude volumétrico

2.3.3 Resistencia debido a “Whisker Spray”

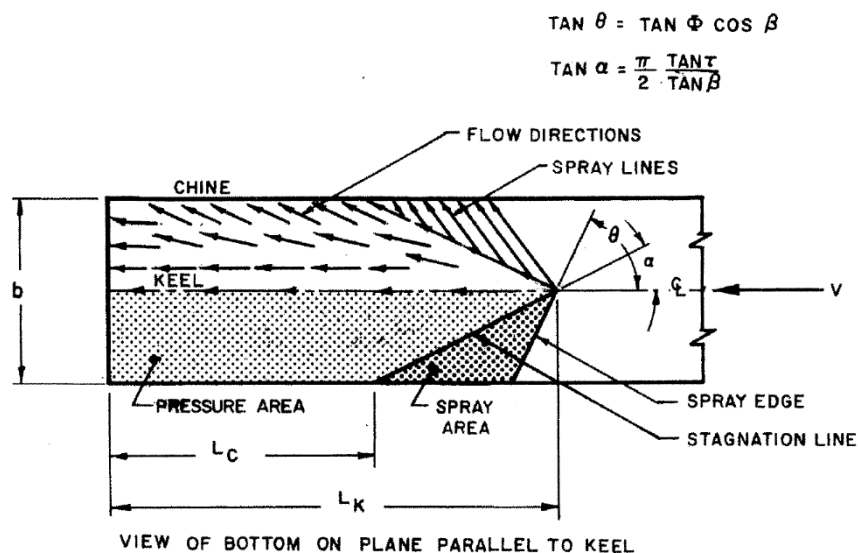


Fig. 1 Flow direction along planing prism and extent of spray area

Figura 2.3 Efecto de Whisker spray

(Savitsky et al., 2007)

Por ser una embarcación prismática de acuerdo con la Figura 2.3 se debe incluir el efecto de Whisker spray. Para calcular el valor de esta componente se utilizó el método descrito por Savitsky y otros (Savitsky et al., 2007).

$$R_s = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * \Delta\lambda * b^2 * Cf \quad (2.9)$$

$$Cf = \left(\frac{0.074}{(RNws)^{\frac{1}{5}}} \right) - \left(\frac{4800}{RNws} \right) \quad (2.10)$$

$$Cf = \left(\frac{1.328}{(RNws)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (2.11)$$

$$RNws = V * \frac{Lws}{\nu} \quad (2.12)$$

$$Lws = \frac{1}{2} * \frac{\frac{b}{2}}{\sin 2\alpha * \cos \beta} \quad (2.13)$$

$$\Delta\lambda = \frac{\cos\left(\frac{2\alpha}{\cos\beta}\right)}{4 * \sin 2\alpha * \cos \beta} \quad (2.14)$$

$$\tan \alpha = \frac{\pi * \tan \tau}{2 \tan \beta} \quad (2.15)$$

Donde:

- ρ : Densidad del agua [Slug/ft³]
- V : Velocidad de planeo [ft/s]
- b : Manga [ft]

C_f : Coeficiente de fricción ($RN_{ws} < 1.5 * 10^6$ ecuacion (2.11); $RN_{ws} > 1.5 * 10^6$ ecuacion (2.10))

$\Delta\lambda$: Coeficiente adimensional debido al efecto de whisker spray

L_{ws} : Eslora característica del efecto whisker spray [ft]

RN_{ws} : Numero de Reynolds del efecto whisker spray

β : Angulo de astilla muerta [grados]

τ : Angulo de trimado [grados]

ν : Viscosidad cinemática[ft²/s]

2.3.4 Resistencia debido al aire

Esta componente se la estima en base al estudio de Savitsky y otros (Savitsky et al., 2007). Debido al aumento de la velocidad esta componente de la resistencia también aumenta y debe ser considerada.

$$R_{air} = \frac{1}{2} * \rho_{air} * V^2 * Ah * Cd \quad (2.16)$$

Donde:

R_{air} : Resistencia debido al aire [lb-fuerza]

ρ_{air} : Densidad del aire [slug/ft³]

Ah : Área frontal del casco [ft²]

Cd : Coeficiente aerodinámico de arrastre [0.70 valor recomendado por (Savitsky et al., 2007)]

2.4 Energía Propulsiva Requerida (EPR)

Para encontrar la energía propulsiva requerida a bordo se toma en cuenta todas las pérdidas que se dan en el sistema propulsor por sus diferentes componentes que lo integran desarrollado en (Minnehan & Pratt, 2017a).

$$EPR = \sum_{i=1}^n IHPi * ti \quad (2.17)$$

Donde:

EPR: Energía propulsiva requerida [kWh]

IHPi: Potencia instalada [kW]

ti: Tiempo de cada ruta [h]

2.5 Coeficientes de rendimiento propulsivos para un motor estacionario

Para estimar el coeficiente cuasi-propulsivo se utiliza la siguiente ecuación considerando lo recomendado por (A. F. Molland et al., 2011).

$$\eta d = \eta o * \eta h * \eta rr \quad (2.18)$$

Donde:

ηd : Rendimiento cuasi-propulsivo

ηo : Rendimiento de la hélice en aguas abiertas

ηh : Rendimiento de la hélice detrás del casco

ηrr : Rendimiento rotativo relativo

Para la estimación de ηh se utilizó la siguiente ecuación. (A. F. Molland et al., 2011)

$$\eta h = \frac{1 - t}{1 - wt} \quad (2.19)$$

Donde:

t: Coeficiente de deducción de empuje

wt: Coeficiente de estela

Para estimar el coeficiente de estela se utilizó la siguiente ecuación de Taylor. (Espla Palacios, 2020)

$$wt = -0.05 + 0.5 * Cb \quad (2.20)$$

Donde:

Cb : Coeficiente de bloque

Se puede estimar el coeficiente de deducción de empuje con la siguiente ecuación de Schoenherr (Espla Palacios, 2020).

$$t = k * wt \quad (2.21)$$

Donde:

k : Coeficiente que varía entre 0.5 y 0.7 para timones normales

wt : Coeficiente de estela

Para el rendimiento rotativo relativo η_{rr} se utilizó la siguiente ecuación para estimar su valor (Espla Palacios, 2020):

$$\eta_{rr} = 0.9922 - 0.05908 * \left(\frac{Ae}{Ao}\right) + 0.07424 * (Cp - 0.0225 * LCB) \quad (2.22)$$

Donde:

$\left(\frac{Ae}{Ao}\right)$: Relación de áreas [Superficie total de las palas/ Área del disco de barrido]

Cp : Coeficiente prismático

LCB : Posición longitudinal del centro de Boyantes medido desde sección media

Para estimar el DHP se utiliza la siguiente ecuación (A. F. Molland et al., 2011):

$$DHP = \frac{EHP}{\eta d} \quad (2.23)$$

Donde:

EHP: Potencia efectiva

ηd: Coeficiente cuasi-propulsivo

Para estimar el BHP se utiliza la siguiente ecuación (A. F. Molland et al., 2011).

$$BHP = \frac{DHP}{\eta m} \quad (2.24)$$

Donde:

DHP: Potencia entregada al eje

ηm: Rendimiento mecánico de la línea de eje

Para el rendimiento mecánico de la línea de ejes se consideró un valor típico de 0.99 para buques de una sola hélice (Espla Palacios, 2020; A. F. Molland et al., 2011).

Para estimar el IHP se utiliza la siguiente ecuación (A. F. Molland et al., 2011).

$$IHP = BHP + Margin \quad (2.25)$$

Donde:

IHP: Potencia instalada

BHP: Potencia de freno

Margin: Margen de potencia requerido

En el margen de potencia requerido se tomó en cuenta los factores climáticos dependientes de las áreas donde se va a operar, típicamente este factor se

encuentra entre el 15% y 30% del BHP. Para incrustaciones e impurezas en el casco, suponiendo que este fuera a limpiarse cada 2 años se toma un 10%. Adicionalmente, para que el motor no opere a su máxima capacidad se supone un 10% para evitar daños (A. Molland, 2008). Finalmente se tiene un margen del 20% del BHP (A. F. Molland et al., 2011).

2.6 Dimensionamiento del sistema propulsor alimentado por energía solar

El proceso empieza con el cálculo de irradiación sobre superficie horizontal diaria considerada, para luego ser transformada en radiación horaria y proceder con el balance de energía para encontrar los componentes del sistema.

2.6.1 Cálculo de la irradiación solar en Galápagos

Para la radiación solar en Galápagos se tomó como referencia los valores proporcionados por la Figura 1.5. Con estos valores se obtuvo el valor promedio como se muestra en la Figura 2.4.

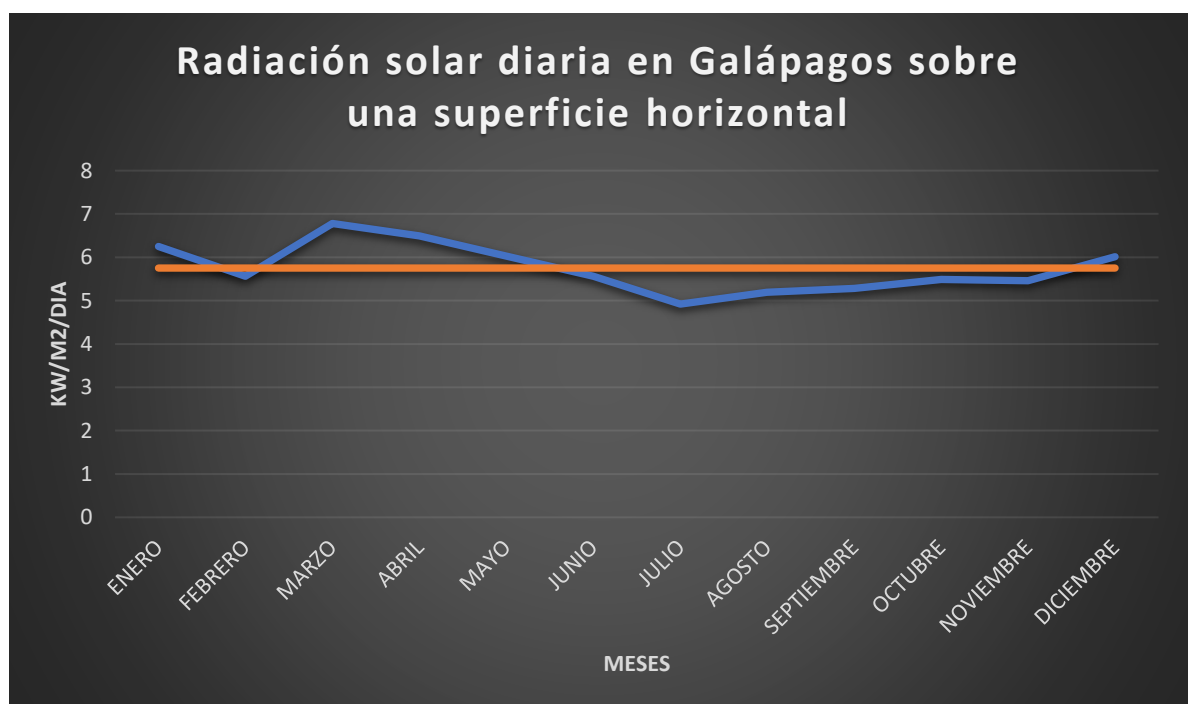


Figura 2.4 Radiación solar diaria en Galápagos

(Sánchez, 2015);(NASA, 2020)

2.6.2 Pérdidas del sistema

Se calculó el consumo real teniendo en cuenta las eficiencias de los distintos subsistemas descritos en el APÉNDICE E, y las pérdidas que se producen con la siguiente ecuación (Paternina et al., 2012).

$$E_{max_perd} = \frac{E}{K_t} \quad (2.26)$$

Donde:

E : Consumo teórico calculado de corriente [kWh]

K_t : Rendimiento global del sistema

El rendimiento global del sistema se calcula con la siguiente ecuación. (Quezada, 2008)

$$K_t = [1 - (K_b + K_c + K_r + K_x)] * [1 - \frac{K_a * D_{aut}}{P_d}] \quad (2.27)$$

Donde:

K_a : Se da debido al auto descarga diaria de la batería a 20 grados centígrados, se toma como 3%.

K_b : Debido al rendimiento de la batería, se toma un valor de 5%

K_c : Debido al rendimiento del convertidor utilizado, oscilan entre 5% y 20%

K_r : Debido al rendimiento del regulador, se toma un valor de 5%

K_x : otras pérdidas no contempladas, por defecto se escoge un 10%

D_{aut} : Días de autonomía con baja o nula intervención de módulos, se escoge entre 1 y 3 días para zonas de baja radiación

P_d : Profundidad de descarga de la batería, por defecto se escoge 80%

2.6.3 Cálculo de la energía proporcionada por las baterías

La energía de las baterías depende directamente del voltaje y capacidad de estas, a continuación, se muestra la ecuación para calcularla (Nasirudin et al., 2017):

$$E_{batt} = \frac{V_{batt} * C_{batt} * x_2}{1000 * n_d} \quad (2.28)$$

Donde:

E_{batt} :	Energía de la batería [kWh]
V_{batt} :	Voltaje de la batería [Vatios]
C_{batt} :	Capacidad de la batería [Amperio-hora]
x_2 :	Número de baterías
n_d :	Profundidad de descarga de la batería [Adimensional]

2.6.4 Cálculo de la energía producida por los paneles solares

Para el cálculo de los paneles solares se considera la siguiente ecuación en base al tiempo de operación considerado de la embarcación (Nasirudin et al., 2017):

$$E_{pv}(t) = \frac{P_{pv}}{1000} * n_s * n_c * x_1 \int_0^t \frac{I_{rr}(t)}{G_{SCT}} dt ; \quad t = 0,1,2 \dots \quad (2.29)$$

Donde:

$E_{pv}(t)$:	Promedio de energía que va a generar el sistema fotovoltaico [kWh]
P_{pv} :	Potencia nominal del sistema fotovoltaico en [Wp]
$I_{rr}(t)$:	Irradiancia solar horaria para una superficie horizontal en [kW/m ²]
G_{SCT} :	Irradiancia en condiciones de prueba estándar equivalente a 1 [kW/m ²]
x_1 :	Número de paneles fotovoltaicos
n_s :	Eficiencia asumida como 80%
n_c :	Eficiencia asumida como 85%
t :	Tiempo de operación [segundos]

El siguiente paso es transformar la irradiancia promedio diaria calculada en horaria, para ello se utiliza el modelo CPRG que considera incidencia de radiación en superficie horizontal (Ayvazoğluyüksel & Filik, 2017):

$$\frac{I}{H} = \frac{(a + b * \cos W) * r_o}{f_c} \quad (2.30)$$

$$a = 0.4090 + 0.5016 * \sin (W_s - 60) \quad (2.31)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 * \sin (W_s - 60) \quad (2.32)$$

$$f_c = a + 0.5 * b * \frac{\frac{\pi * W_s}{180} - \sin W_s * \cos W_s}{\sin W_s - \left(\pi * \frac{W_s}{180}\right) * \cos W_s} \quad (2.33)$$

$$r_o = \frac{\pi}{24} * \frac{\cos W - \cos W_s}{\sin W_s - \left(\pi * \frac{W_s}{180}\right) * \cos W_s} \quad (2.34)$$

$$W = \frac{360 * (h - 12)}{24} \quad (2.35)$$

$$W_s = \arccos(-\tan \delta * \tan \varphi) \quad (2.36)$$

$$\delta = 23.45 * \sin \left(360 * \frac{284 + n}{365}\right) \quad (2.37)$$

Donde:

I: Irradiación solar global por hora en superficie horizontal [W/m²]

H: Irradiación solar global por día en una superficie horizontal [W/m²]

- φ : Latitud de la zona en grados.
- W_s : Horario de atardecer en grados.
- W : Angulo horario solar.
- h : Angulo de altitud solar en grados.
- ∂ : Angulo de declinación solar.
- n : Dia del año.

2.6.5 Balance de energía

El balance de energía se lo realiza para determinar el déficit que carga la batería de acuerdo con la siguiente ecuación. (Nasirudin et al., 2017):

$$BE = \frac{|\min(E_{pv} - E_{load})|}{1 - SOC} \quad (2.38)$$

Donde:

- E_{pv} : Energía que genera el panel fotovoltaico [kWh]
- E_{load} : Energía de la carga [kWh]
- SOC : Margen de seguridad de descarga [0.5]

Todas las ecuaciones fueron implementadas en un script usando el lenguaje de programación Python, véase APÉNDICE E. Este script requiere del ingreso de variables de entrada relacionadas con la situación geográfica del lugar y características de los equipos que se van a utilizar, luego realiza un balance de energía encontrando el déficit de energía que cargará las baterías y por ende indicará el número de paneles a utilizar como se muestra en la Figura 2.5.

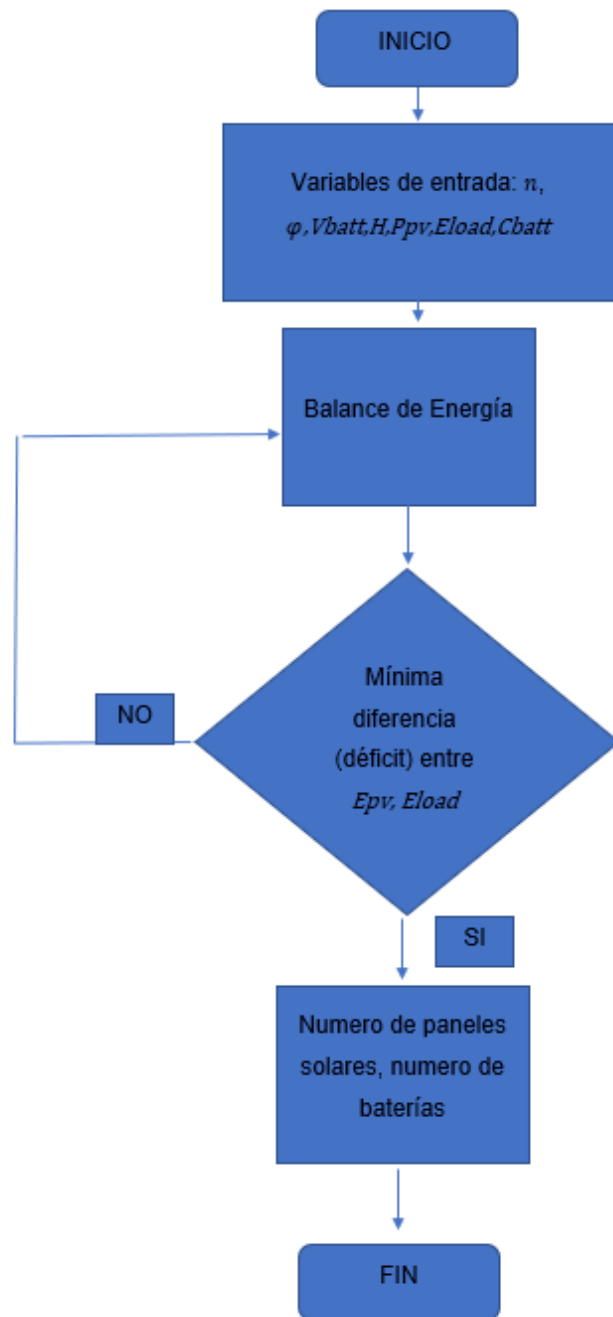


Figura 2.5 Diagrama de flujo para el cálculo del sistema fotovoltaico

2.7 Dimensionamiento del sistema propulsor alimentado por hidrógeno

En esta sección se consideró el hidrógeno en forma gaseosa y líquida. A continuación, se exponen las diferentes ecuaciones a utilizar para dimensionar los componentes del sistema.

2.7.1 Hidrógeno líquido

El volumen de hidrógeno líquido necesario para satisfacer la demanda de energía propulsiva requerida de una embarcación es estimado con la siguiente expresión. (Mao et al., 2020a):

$$V_{lh2} = \frac{E_r}{D_{lh2} * \eta_{lh2}} * fuel\ margin \quad (2.39)$$

Donde:

V_{lh2} : Volumen de hidrógeno líquido [m³]

E_r : Energía requerida [kWh]

D_{lh2} : Densidad volumétrica del hidrógeno líquido [1332 kWh/m³]

η_{lh2} : Eficiencia de las pilas de combustible de hidrógeno, se toma un 54%.

$fuel\ margin$: se asume un 1.2 de margen de combustible para todos los barcos.

Cálculo de espacio requerido para el sistema de combustible de hidrógeno líquido a bordo de la embarcación mediante la siguiente ecuación. (Mao et al., 2020b):

$$V_{lh2\ capacity} = 5 * V_{e_i} - 2 * V_{FC_i} + V_{t_i} \quad (2.40)$$

Donde:

$V_{lh2\ capacity}$: Espacio para el sistema de combustible del hidrógeno [m³]

V_{e_i} : Volumen ocupado por el motor existente a bordo del buque [m³]

V_{FC_i} : Volumen del sistema de pila de combustible [m³]

V_{t_i} : Volumen absorbido por los tanques de combustible [m³]

Para calcular el volumen ocupado por el motor existente a bordo del buque se utiliza la siguiente ecuación (Mao et al., 2020b):

$$Ve_i = \frac{PME_i - 1906}{54.066} \quad (2.41)$$

Donde:

PME_i : Potencia del motor principal a bordo [kW]

Finalmente, para calcular el volumen del sistema de pila de combustible necesario para proporcionar una potencia de salida: (Mao et al., 2020b)

$$VFC_i = \frac{PME_i - 73.331}{55.944} \quad (2.42)$$

Donde:

PME_i : Potencia del motor principal a bordo [kW]

2.7.2 Hidrógeno gaseoso

A continuación, se muestra la ecuación para calcular la energía requerida de hidrógeno a partir de la energía propulsiva requerida (Minnehan & Pratt, 2017b):

$$E_{h2} = \frac{EPR}{0.45} \quad (2.43)$$

Donde:

E_{h2} : Energía requerida de hidrógeno [kWh]

EPR : Energía propulsiva requerida [kWh]

Luego se procede a transformar la energía requerida del hidrógeno en kilogramos para encontrar la masa requerida de hidrógeno de acuerdo con la siguiente conversión (Minnehan & Pratt, 2017b):

$$Mass\ of\ h_2[kg] = E_{h_2} * \frac{\frac{3.6MJ}{kWh}}{\frac{119.96MJ}{kg}} \quad (2.44)$$

Con la siguiente ecuación calculamos la masa del tanque tomando como referencia 5000 psi de hidrógeno. (Minnehan & Pratt, 2017b):

$$Mass\ of\ Tank = Mass\ of\ h_2 * Gavimetric\ spec \quad (2.45)$$

Donde:

Mass of Tank: Masa del tanque en [kg]

Gavimetric spec: Especificación gravimétrica, para hidrógeno en forma gaseosa a 5000 psi es 17.92, para el hidrógeno líquido 8.7 [kg tanque/kg h₂]

La masa total del combustible y el tanque se calcula sumando ambas masas. Para el volumen del tanque se utiliza la siguiente ecuación.

$$Volume\ of\ Tank = Mass\ of\ h_2 * Volumetric\ spec \quad (2.46)$$

Donde:

Volume of Tank: Volumen del tanque [Litros]

Volumetric spec: Especificación volumétrica; para el hidrógeno gaseoso comprimido a 5000 psi se utiliza 93.7, y para el hidrógeno líquido se utiliza 24.8 [L/kg]

2.7.3 Celdas de combustible

Las ecuaciones descritas a continuación son el resultado de un estudio que se desarrolló a partir de una base de datos de celdas de combustible seleccionadas con un rango de potencias entre 33 y 200 kW. Se considera principalmente la

potencia específica y densidad de potencia que relaciona masa, volumen y potencia requerida (Minnehan & Pratt, 2017b):

$$Power = 0.1237 * mass + 61.869 \quad (2.47)$$

Donde:

Power: Potencia específica de la celda de combustible [kW]

mass: Masa de la celda de hidrogeno [kg]

$$Power = 55.944 * volume + 73.331 \quad (2.48)$$

Donde:

Power: Densidad de potencia de la celda de combustible [kW]

volume: Volumen de la celda de hidrógeno [m³]

2.8 Potencia específica y densidad de potencia de los componentes

Es más adecuado realizar una comparación de los diferentes elementos del sistema propulsor especificados en el Capítulo 1, en base a su poder específico y densidad de potencia. En base a esto se puede conseguir ecuaciones que dependan de la potencia requerida, peso y volumen para que posteriormente sean aplicados en un programa de optimización. Se siguió el trabajo realizado por Minnehan (Minnehan & Pratt, 2017b) y se utilizó una base de datos especificada en el APÉNDICE C para obtener ecuaciones características para cada componente.

$$Potencia\ específica = \frac{Potencia}{Peso} \quad (2.49)$$

$$Densidad\ de\ potencia = \frac{Potencia}{Volumen} \quad (2.50)$$

Donde:

Potencia: Potencia requerida [Kw]

Peso: Peso del equipo [kg]

Volumen: Volumen del equipo [m³]

2.8.1 Ecuación para el motor eléctrico

De acuerdo con la regresión lineal que se presentan en la Figura 2.6 y 2.7 se obtuvieron las ecuaciones características (Cemer, 2020; Motors, 2020; Siemens, 2021).

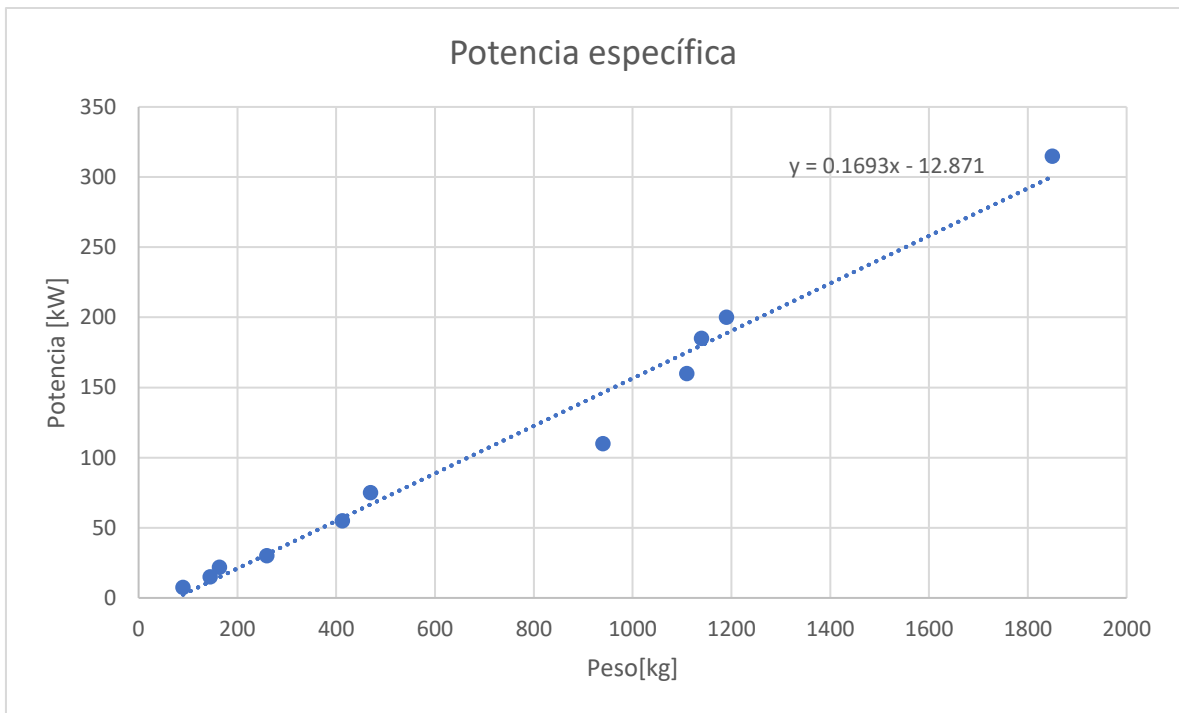


Figura 2.6 Potencia específica del motor eléctrico

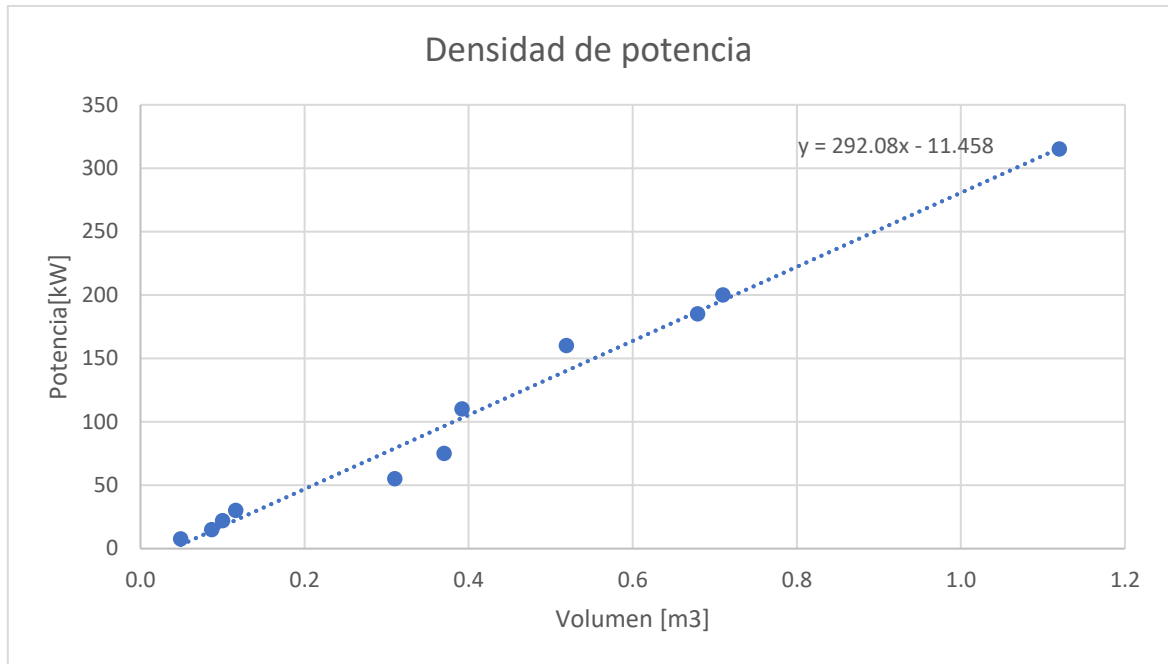


Figura 2.7 Densidad de potencia del motor eléctrico

$$Potencia = 0.169 * masa - 12.871 \quad (2.51)$$

$$Potencia = 292.08 * volumen - 12.871 \quad (2.52)$$

2.8.2 Ecuación para el Thruster azimutal

De acuerdo con la regresión lineal que se presentan en la Figura 2.8 se obtuvo la ecuación característica para el thruster azimutal (Marine, 2020).

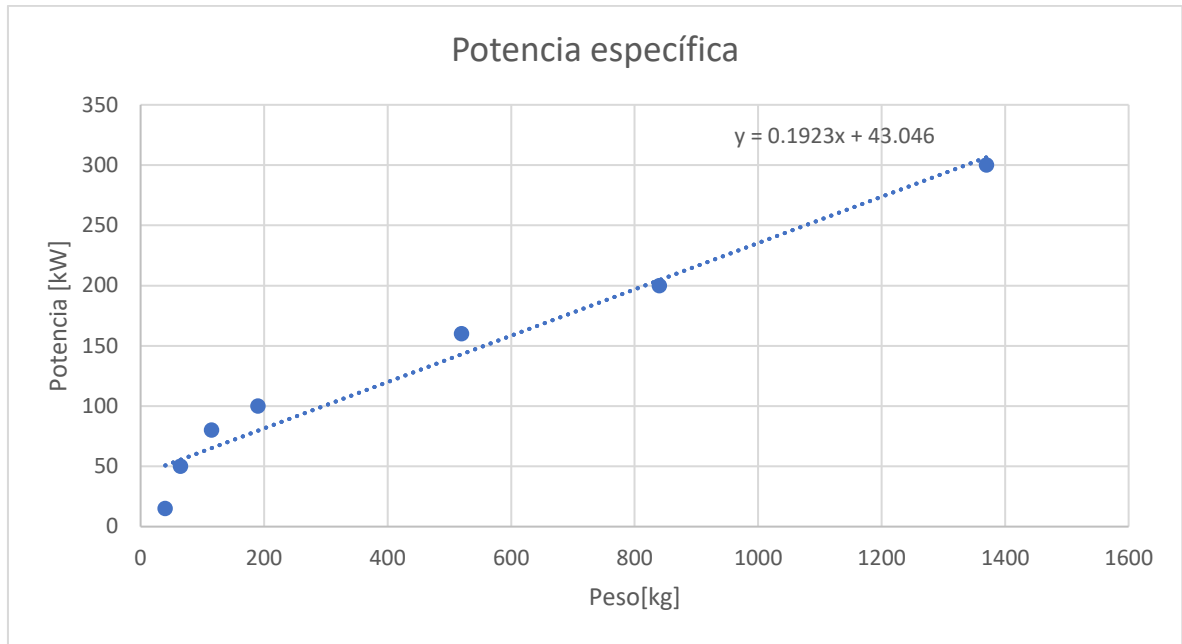


Figura 2.8 Potencia específica del Thruster azimuthal

$$Potencia = 0.192 * masa - 43.046 \quad (2.53)$$

2.8.3 Ecuación para motores Intraborda

De acuerdo con la regresión lineal que se presentan en las Figura 2.9 y 2.10 se obtuvieron las ecuaciones características para el motor intraborda (Ac Magnets, 2020; Krautler, 2018).

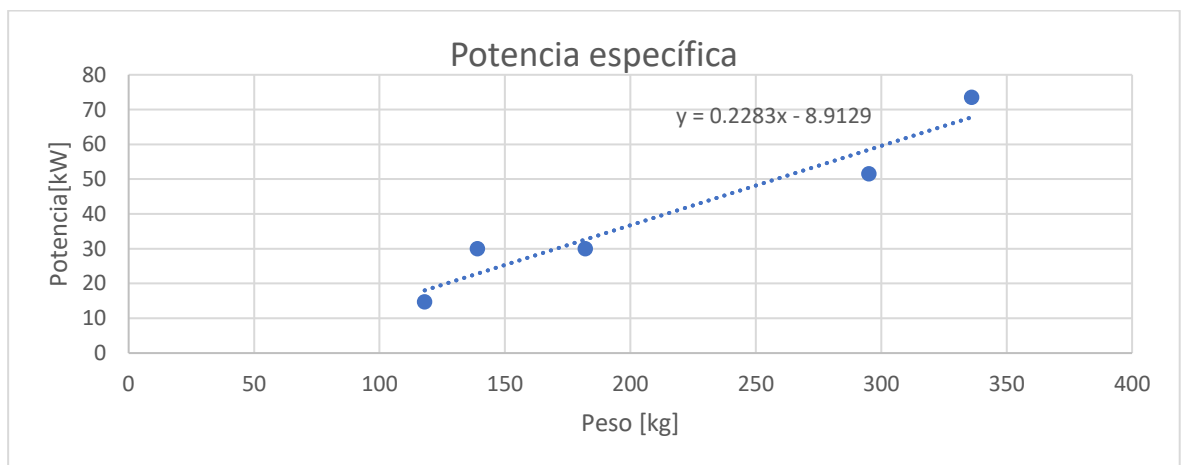


Figura 2.9 Potencia específica de motores intraborda

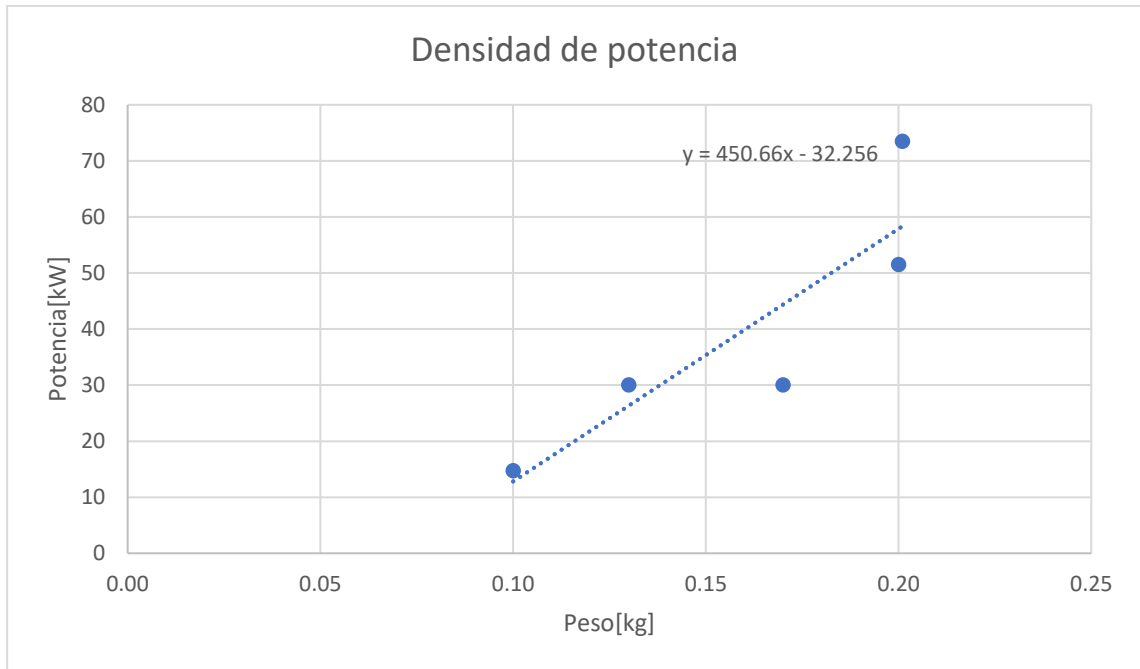


Figura 2.10 Densidad de potencia de motores intraborda

$$Potencia = 0.228 * masa - 8.912 \quad (2.54)$$

$$Potencia = 450.66 * masa - 32.256 \quad (2.55)$$

2.8.4 Ecuación para el servomotor

De acuerdo con la regresión lineal que se presentan en las Figura 2.11 y 2.12 se obtuvieron las ecuaciones características del servomotor (RDM, 2020; Teschler, 2004)

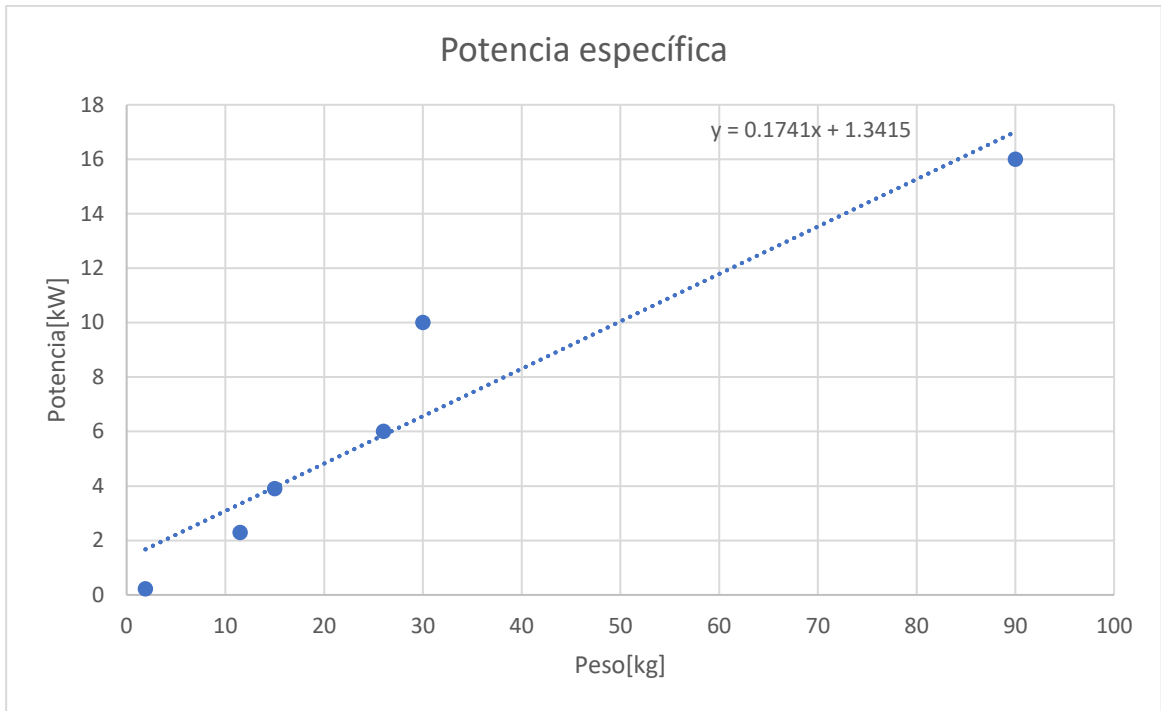


Figura 2.11 Potencia específica del servomotor

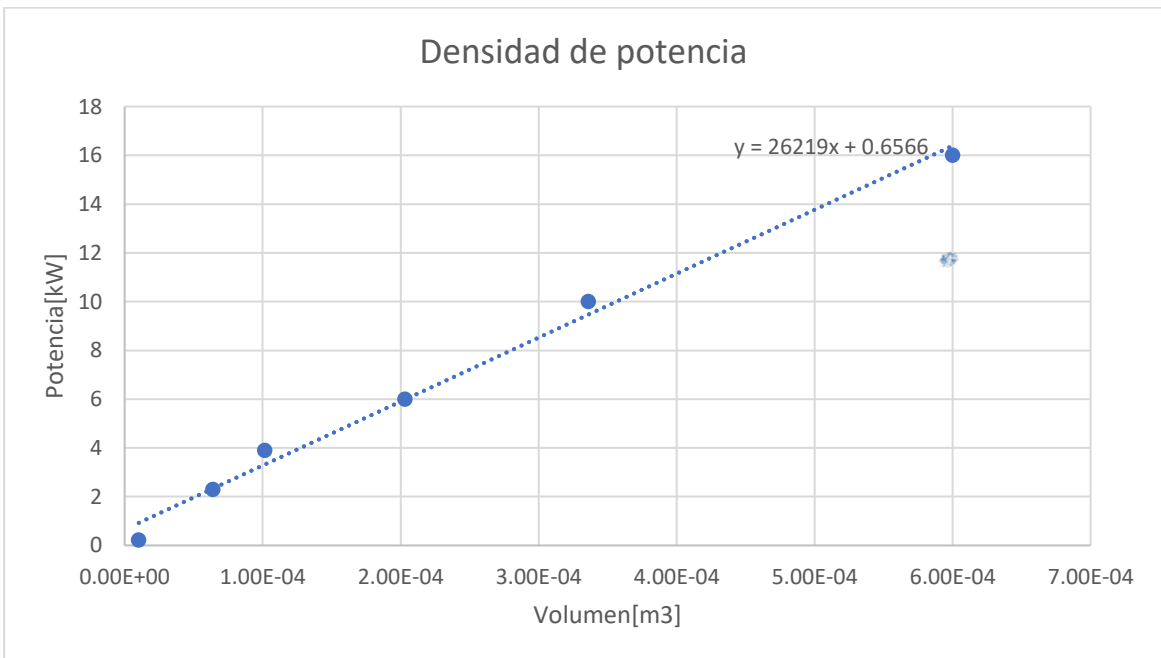


Figura 2.12 Densidad de potencia del servomotor

$$Potencia = 0.174 * masa + 1.341 \quad (2.56)$$

$$Potencia = 26219 * volumen - 0.656 \quad (2.57)$$

2.9 Selección y dimensionamiento de la hélice.

La selección y dimensionamiento de la hélice se realizó en base a las hélices de la serie Gawn Burril. El APÉNDICE D especifica detalladamente las ecuaciones utilizadas y en el APÉNDICE A se detalla el programa desarrollado en Python.

2.10 Pala del timón y servomotor

En el APÉNDICE G se encuentra especificado las ecuaciones utilizadas de acuerdo a la sociedad de clasificación para embarcaciones rápidas Bureau Veritas (Register & Shipping, 2020) y de acuerdo con SOLAS (International Maritime Organization., 2001), se puede encontrar la potencia del servomotor.

$$P_{serv} = \frac{T * w}{n} \quad (2.58)$$

Donde:

P_{serv} : Potencia del servo [KW]

T : Par torsor [kN], véase APÉNDICE G

w : Velocidad angular de la pala de acuerdo con SOLAS

n : Eficiencia sumida como 0.8

2.11 Dimensionamiento del eje

Para el cálculo de los diámetros del eje en sus diferentes segmentos, se emplearon las ecuaciones obtenidas de la Sociedad Clasificadora “Lloyd’s Register”.

$$D = F * k * \sqrt[3]{\frac{P}{Q} * \left(\frac{560}{\sigma_u + 160}\right)} \quad (2.59)$$

Donde:

F: 95 para motor eléctrico.

K: Presenta valores distintos según el tramo del eje que se está analizando.

k=1 para eje de proa, 1.15 para eje intermedio y 1.22 para eje de popa.

P: Potencia entregada por el motor (48.87KW, tomando como referencia el valor mostrado en la **Error! Reference source not found.**).

R: Revoluciones del diseño (3000 rpm)

σ_u : Carga de rotura del material (600 N/mm²).

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo se aplica la metodología descrita en el capítulo anterior y se comparan los resultados entre potenciales energías renovables, la velocidad máxima alcanzada y el análisis económico del proyecto.

3.1 Comparación de la resistencia al avance de 2 prototipos de interislas optimizados

Las características principales de ambas embarcaciones optimizadas son descritas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Datos Comparativos entre las dos lanchas optimizadas
(Villamarín, 2020) (Meléndez, 2021)

	Modelo optimizado (Villamarín, 2020)	Modelo con Flaps (Meléndez, 2021)
L, m	13.66	13.69
B_{max}, m	3.44	3.58
D, m	1.55	1.59
l_{cg}, m	5.58	4.211
<i>Pasajeros</i>	24	24
<i>Desplazamiento , ton</i>	8.52	9.01
$\beta, grad$	22	30
<i>Cuerda del flap , m</i>	-	0.21
<i>Ancho del flap, manga</i>	-	0.40
<i>Ángulo del flap , grad</i>	-	10.57

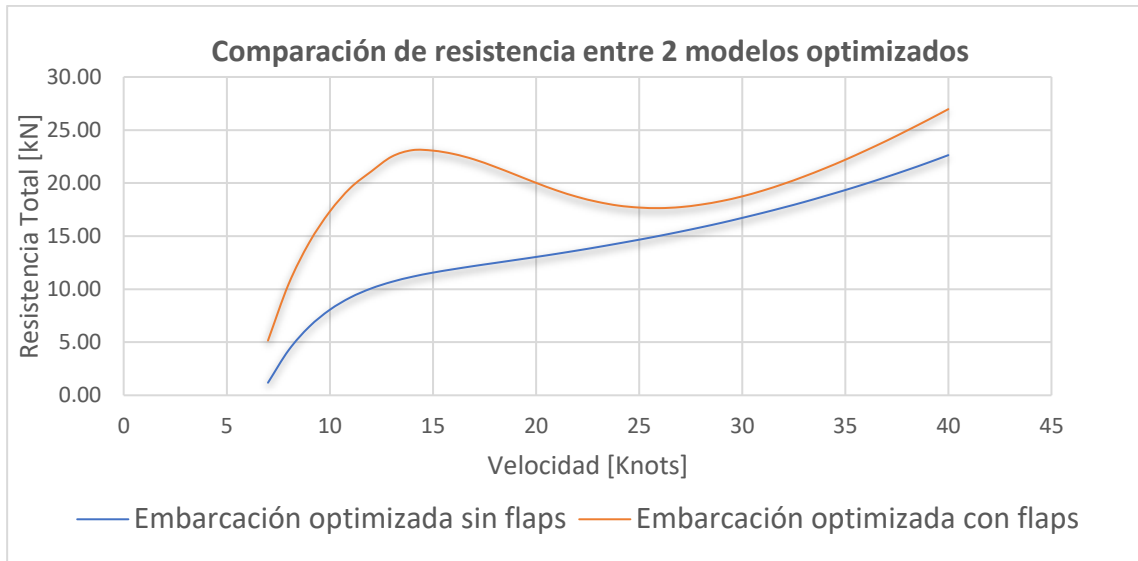


Figura 3.1 Comparación de la resistencia en régimen de planeo entre los dos modelos considerados

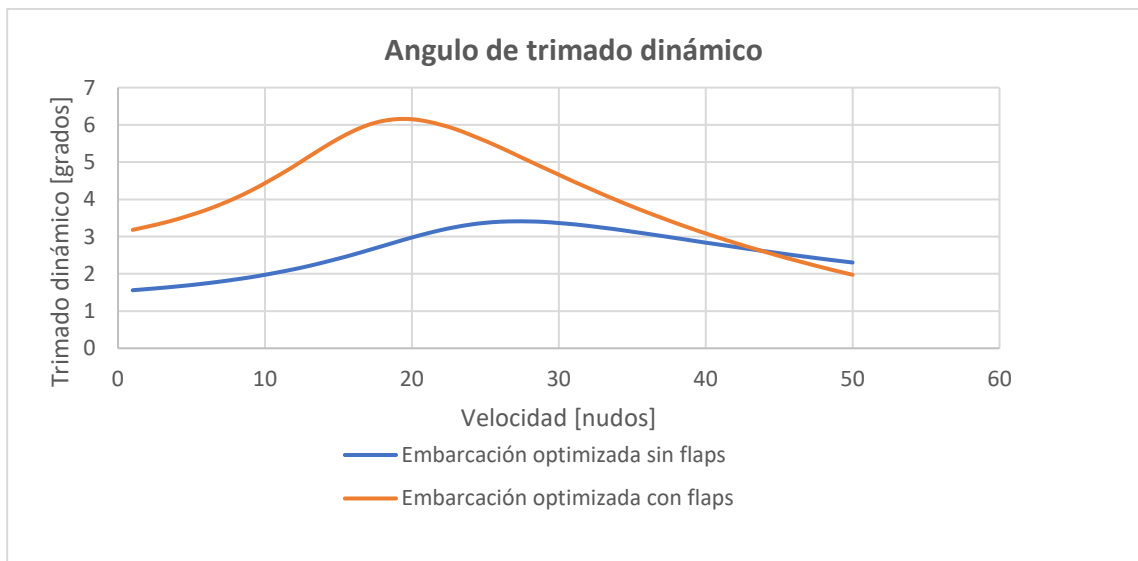


Figura 3.2 Ángulo de asiento dinámico

Acorde a la Figura 3.1 se seleccionó la lancha optimizada de (Villamarín, 2020) por presentar menor resistencia en el intervalo de 8 a 30 nudos. En el **Error! Reference source not found.** se muestran las curvas de resistencia de una embarcación con características similares como forma de validar los resultados obtenidos y también las curvas Lk vs velocidad para las 2 embarcaciones. La Figura 3.2 muestra el ángulo de asiento dinámico versus la velocidad para ambas embarcaciones.

3.2 Coeficientes propulsivos obtenidos para la embarcación seleccionada

La Tabla 3.2 muestra los coeficientes de propulsión obtenidos aplicando el proceso descrito en el Capítulo 2 considerando un motor estacionario que son utilizados en la Tabla 3.3 para encontrar EPR.

Tabla 3.2 Coeficientes obtenidos

Coeficientes propulsivos	Valor	Coeficientes propulsivos	Valor
η_o	0.55	η_d	0.62
η_{rr}	1.03	η_m	0.99
η_h	1.10	F_s	1.2

3.3 Energía de propulsión requerida para la embarcación seleccionada

La energía de propulsión requerida se obtuvo de acuerdo con el perfil de operación descrito en el Capítulo 2. Con los datos de la Figura 3.3 y con los valores de los rendimientos de la Tabla 3.2 se completó los requerimientos de energía de la embarcación seleccionada tomando como referencia que el viaje de ida y vuelta se realiza a una velocidad de 28 nudos como se puede observar en la Tabla 3.3 que utiliza los coeficientes de propulsión y datos de resistencia total para obtener una EPR de 1564.47 [kWh].

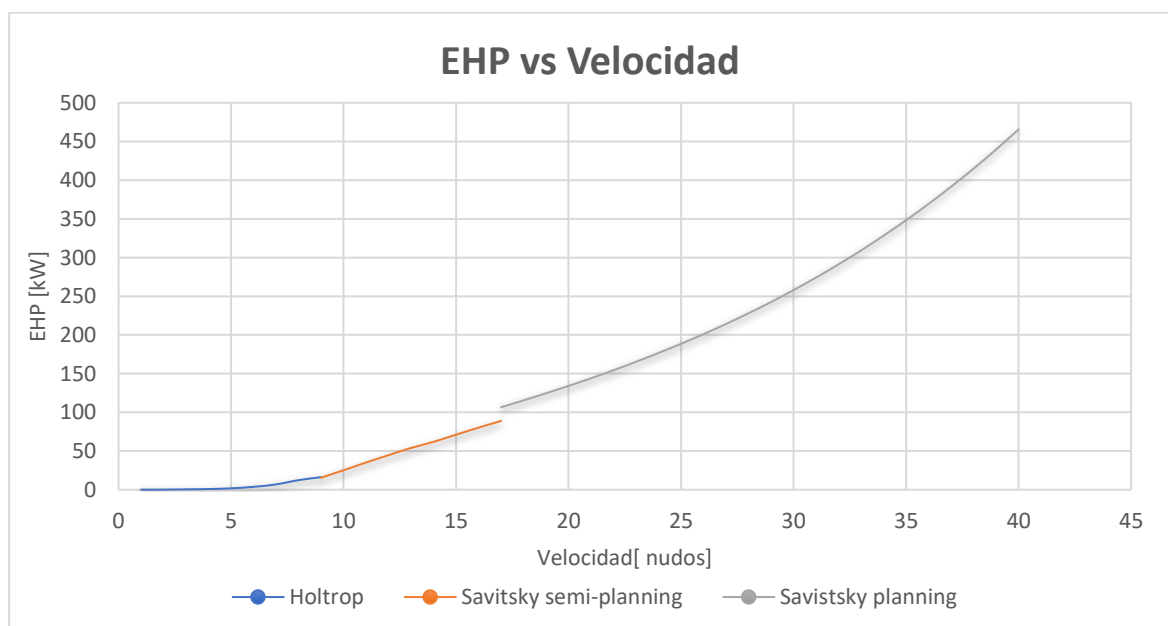


Figura 3.3 EHP vs Velocidad embarcación seleccionada

Tabla 3.3 Requerimientos de energía de la embarcación seleccionada

		Requerimiento energético								
	OPERACIÓN/MANIOBRA	V[knots]	t[min]	t[h]	Distancia [Mn]	EHP [kW]	DHP [kW]	BHP [kW]	IHP [kW]	EPR [kWh]
Ida	Maniobra de combustible	3.00	5.00	0.08	0.25	0.46	0.74	0.75	0.89	0.07
	Traslado a zona de embarque	5.00	5.00	0.08	0.42	1.80	2.89	2.92	3.50	0.29
	Embarque de pasajeros	0.00	30.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Salida de la rada	9.00	10.00	0.17	1.50	16.20	26.00	26.26	31.51	5.25
	Navegación entre islas	28.00	105.00	1.75	49.00	228.02	365.92	369.62	443.54	776.19
	Ingreso a la rada	4.00	20.00	0.33	1.33	0.82	1.32	1.33	1.60	0.53
	Desembarque de pasajeros	0.00	20.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Embarque de pasajeros	0.00	30.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vuelta	Salida de la rada	4.00	20.00	0.33	1.33	0.82	1.32	1.33	1.60	0.53
	Navegación entre islas	28.00	105.00	1.75	49.00	228.02	365.92	369.62	443.54	776.19
	Ingreso a la rada	9.00	10.00	0.17	1.50	16.20	26.00	26.26	31.51	5.25
	Desembarco de pasajeros	0.00	20.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Traslado a boya de fondeo	3.00	10.00	0.17	0.50	0.46	0.74	0.75	0.89	0.15
		Total		390.00	6.50	104.83				Total

3.4 Acomodación de espacios

De acuerdo con las dimensiones obtenidas de la embarcación seleccionada (Villamarín, 2020), se designó un espacio para los componentes del sistema propulsor propuesto. En primer lugar, se calculó el área y volumen de los espacios designados para los componentes de acuerdo con lo que indican las Figura 3.4 y 3.5. Como siguiente paso se tomó como referencia la capacidad propulsiva de la embarcación “ El Mangle” (Gaona, 2021a) y se calculó el peso de los motores fuera de borda como indica la Tabla 3.4. Finalmente, con los cálculos realizados se puede obtener el peso máximo y volumen que puede alcanzar el sistema propuesto, sin afectar el desplazamiento de la embarcación Interislas tomada como referencia.

Tabla 3.4 Valores de operación y acomodación de la embarcación de referencia

	Descripción	Valor	Unidades
Acomodación de espacios. Lancha optimizada Villamarín	Área de Sala de máquinas	8.04	m ²
	Área de Paneles Solares	39.23	m ²
	Volumen de sala de máquinas	17.47	m ³
	Tanque de combustible a bordo	245.00	gal
	Volumen de combustible a bordo	0.93	m ³
	Densidad de la gasolina	750.00	kg/m ³
	Peso del combustible a bordo	696	kg
Capacidad energética y peso del motor “ El Mangle”	Consumo por hora del combustible	30.00	gal/h
	Tiempo estimado ruta de referencia	6.50	h
	Consumo de combustible (ida y vuelta)	195.00	gal
	Densidad de energía de la gasolina	36.10	kWh/gal
	Energía consumida en la ruta especificada	7039.50	kWh
	Peso del motor (3 motores fuera de borda)	1068	kg
	Potencia de los 2 motores	850	HP
Capacidad total	Peso total	1764	kg
	Volumen total (Calculado en el programa Rhino 6)	18.40	m ³

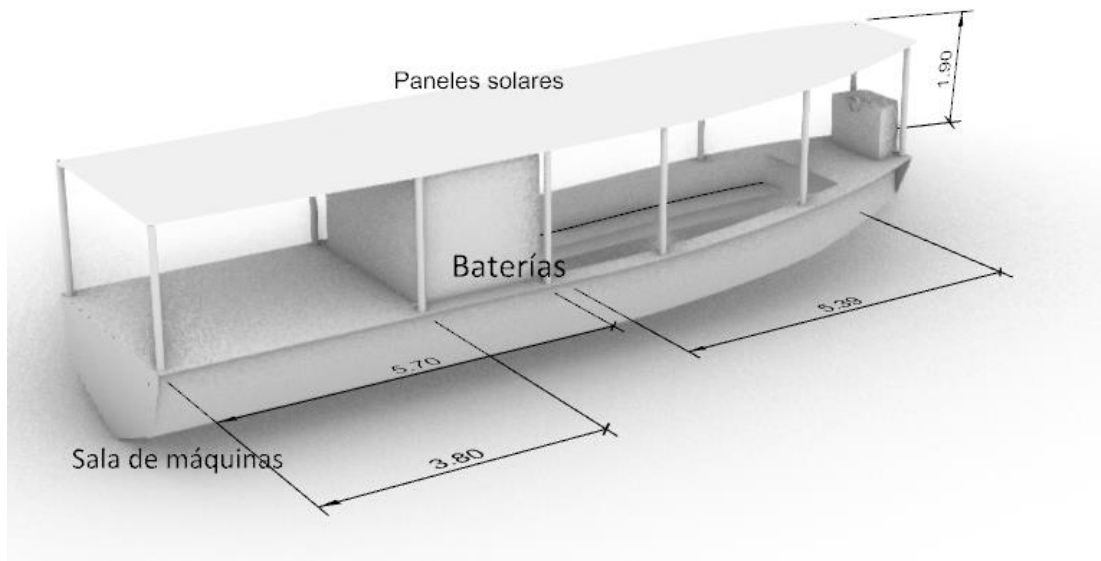


Figura 3.4 Distribución de espacios

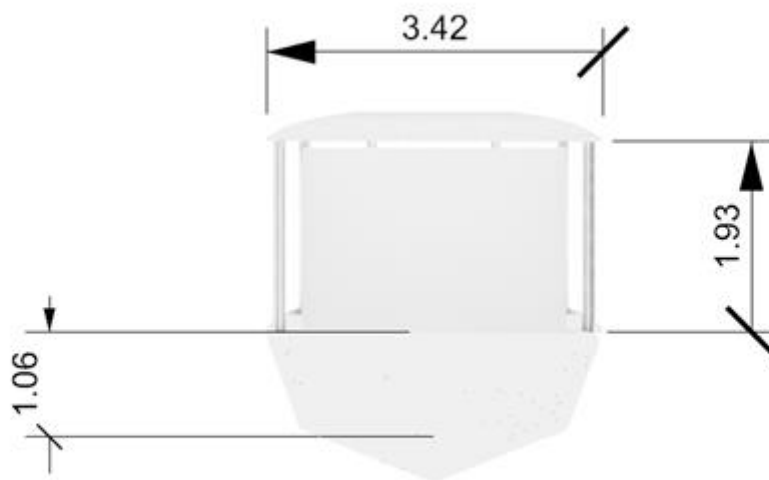


Figura 3.5 Espacio designado para sala de máquinas

3.5 Comparación entre los sistemas de propulsión naval usando las potenciales energías renovables

Los componentes para cada uno de los sistemas a base de energías renovables considerados y sus respectivos pesos se encuentran detallados en el APÉNDICE E.

Esta comparación realizada pretende verificar cual es la mejor energía renovable que ocupe menos espacio y peso, para que pueda ser utilizada en reemplazo de los combustibles fósiles tradicionales, los vistos verdes en las tablas significan que cumple el requisito, mientras que las x rojas indican que no cumple.

Tabla 3.5 Caso I: Evaluación a 28 nudos de velocidad ida y vuelta y 24 pasajeros

SISTEMA ACTUAL			SISTEMA PROPUESTO				Factores de comparación		
Sistema	Vol.[m ³]	Peso [ton]	Sistema	Vol.[m ³]	Peso [Ton]	Energía [kWh]	Espacio	Peso	Suministro
Motores fuera de borda	18.4	1.76	Energía Solar	38.61	22.33	1564.47	x	x	√
			Sistema hidrógeno gaseoso	17.46	5.99	1564.47	√	x	√
			Sistema hidrógeno líquido	10.47	5.23	1564.47	√	x	√

Tabla 3.6 Caso II: Evaluación a 28 nudos de velocidad ida y vuelta y reduciendo a la mitad los pasajeros

SISTEMA ACTUAL (12 pasajeros menos)			SISTEMA PROPUESTO				Factores de comparación		
Sistema	Vol.l[m ³]	Peso [ton]	Sistema	Vol.[m ³]	Peso [Ton]	Energía [kWh]	Espacio	Peso	Suministro
Motores fuera de borda	18.4	1.76	Energía Solar	37.09	21.46	1500.59	x	x	√
			Sistema hidrógeno gaseoso	16.74	5.76	1500.59	√	x	√
			Sistema hidrógeno líquido	10.03	5.04	1500.59	√	x	√

Tabla 3.7 Caso III: Evaluación a 28 nudos de velocidad considerando solo el viaje de ida y 24 pasajeros

SISTEMA ACTUAL			SISTEMA PROPUESTO				Factores de comparación		
Sistema	Vol.[m ³]	Peso [ton]	Sistema	Vol.[m ³]	Peso [Ton]	Energía [kWh]	Espacio	Peso	Suministro
Motores fuera de borda	18.4	1.76	Energía Solar	19.84	11.63	782.34	x	x	√
			Sistema hidrógeno gaseoso	12.58	5.00	782.34	√	x	√
			Sistema hidrógeno líquido	9.17	4.67	782.34	√	x	√

La comparación de peso y espacio de cada uno de los sistemas de propulsión usando las potenciales energías renovables se realizó de acuerdo con las restricciones de peso y tomando 3 escenarios:

- El primer escenario es el trayecto de ida y vuelta a una velocidad de 28 nudos, la tabla 3.5 muestra que ningún sistema cumple con la restricción de peso.
- Para el segundo escenario se redujo el número de pasajeros de 24 a 12 para el mismo trayecto. Sin embargo, la tabla 3.6 muestra que ninguno de los sistemas propuestos cumple con la restricción del peso.
- Finalmente, el último escenario, se consideró los 24 pasajeros solo para el viaje de ida para que pueda abastecerse en puerto y luego realizar el viaje de retorno, nuevamente la tabla 3.7 muestra que se reduce la energía requerida pero aun así ningún sistema cumple con la restricción de peso.

En base a todo lo expuesto ningún sistema cumple con la restricción del peso, sin embargo, es evidente que el hidrógeno líquido es la mejor opción, a pesar de esto, debido a los componentes que conlleva utilizar este sistema para mantener la temperatura de criogenización, el riesgo de congelación para los operarios y su dificultad para encontrarlos en el mercado (Balbona Calvo, 2014), por lo que se decidió utilizar hidrógeno gaseoso que es otra buena opción, debido a que existe mayor disponibilidad en el mercado y representa un menor riesgo de accidentes (Isgró, 2015).

3.6 Velocidad máxima alcanzada por cada sistema usando hidrógeno gaseoso

La velocidad máxima se calculó en base a las restricciones de peso y volumen del sistema desarrollado en el apartado de acomodación de espacios. Como primer punto se propone 3 sistemas de propulsión eléctricos: motor eléctrico estacionario, motor intraborda y motor eléctrico conectado a un thruster. Luego se implementó un script en Python, ver APÉNDICE G, donde se incluyeron las ecuaciones en base al peso, volumen y potencia de los componentes de cada sistema propuesto desarrolladas en el Capítulo 2. Finalmente, el programa después de un proceso iterativo que toma como restricción el peso y el volumen total del sistema actual presenta como resultado la velocidad máxima para los 3 sistemas de propulsión propuestos como se observa en la **Error! Reference source not found.**, el APÉNDICE G profundiza la explicación de la obtención de la velocidad máxima.

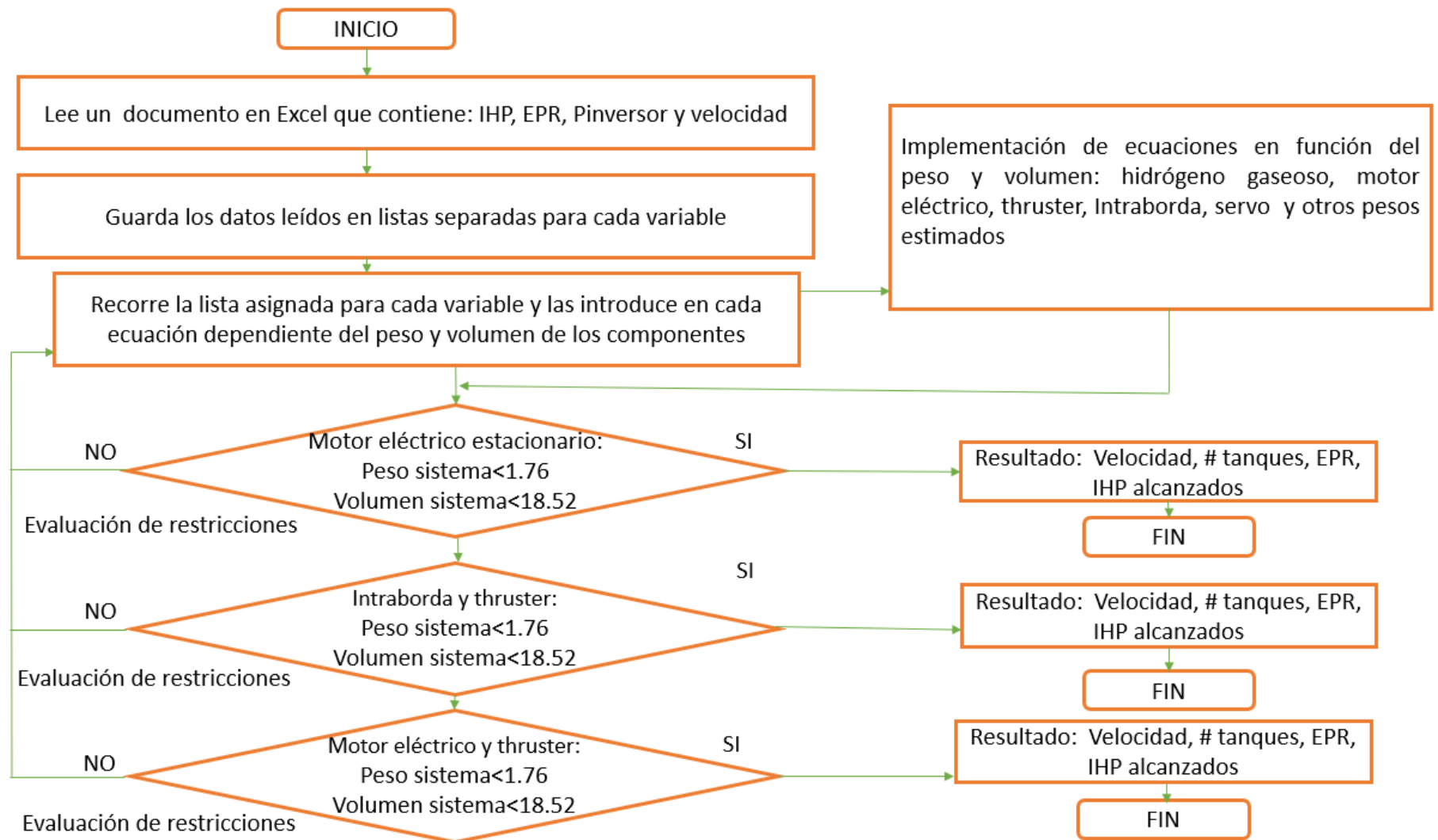


Figura 3.6 Diagrama de flujo para encontrar la velocidad máxima

Tomando en cuenta los resultados obtenidos por cada sistema de propulsión propuesto, el sistema que alcanza mayor velocidad es el motor intraborda más el thruster con 13 nudos y una EPR de 802.59 kWh como se puede observar en la Figura 3.7. Esto se debe a que no requiere de muchos componentes y es más liviano en comparación a un motor eléctrico; el ahorro de espacio y peso es compensado con la adición de hidrogeno a bordo, por lo tanto, alcanza mayor velocidad.

```
####Maxima velocidad alcanzada con el sistema a base de H2 gaseoso para 2 motores estacionario###
Potencia del motor [kW] : 48.87204121225165
Energia propulsiva requerida [kWh] : 490.93
Velocidad Maxima Alcanzada [Nudos] : 10
Numero de tanques de H2 requeridos : 9
Estimacion del tiempo de viaje entre islas [horas]: 4.9
####Maxima velocidad alcanzada con el sistema a base de H2 gaseoso para 2 motores intraborda electrico###
Potencia del motor [kW] : 104.87193625773654
Energia propulsiva requerida [kWh] : 802.59
Velocidad Maxima Alcanzada [Nudos] : 13
Numero de tanques de H2 requeridos : 15
Estimacion del tiempo de viaje entre islas [horas]: 3.77
####Maxima velocidad alcanzada con Trhusters Azimutales+ Motor electrico####
Potencia del motor [kW] : 86.874532236933
Energia propulsiva requerida [kWh] : 721.52
Velocidad Maxima Alcanzada [Nudos] : 12
Numero de tanques de H2 requeridos : 13
Estimacion del tiempo de viaje entre islas [horas]: 4.08
```

Figura 3.7 Resultados del script implementado en Python

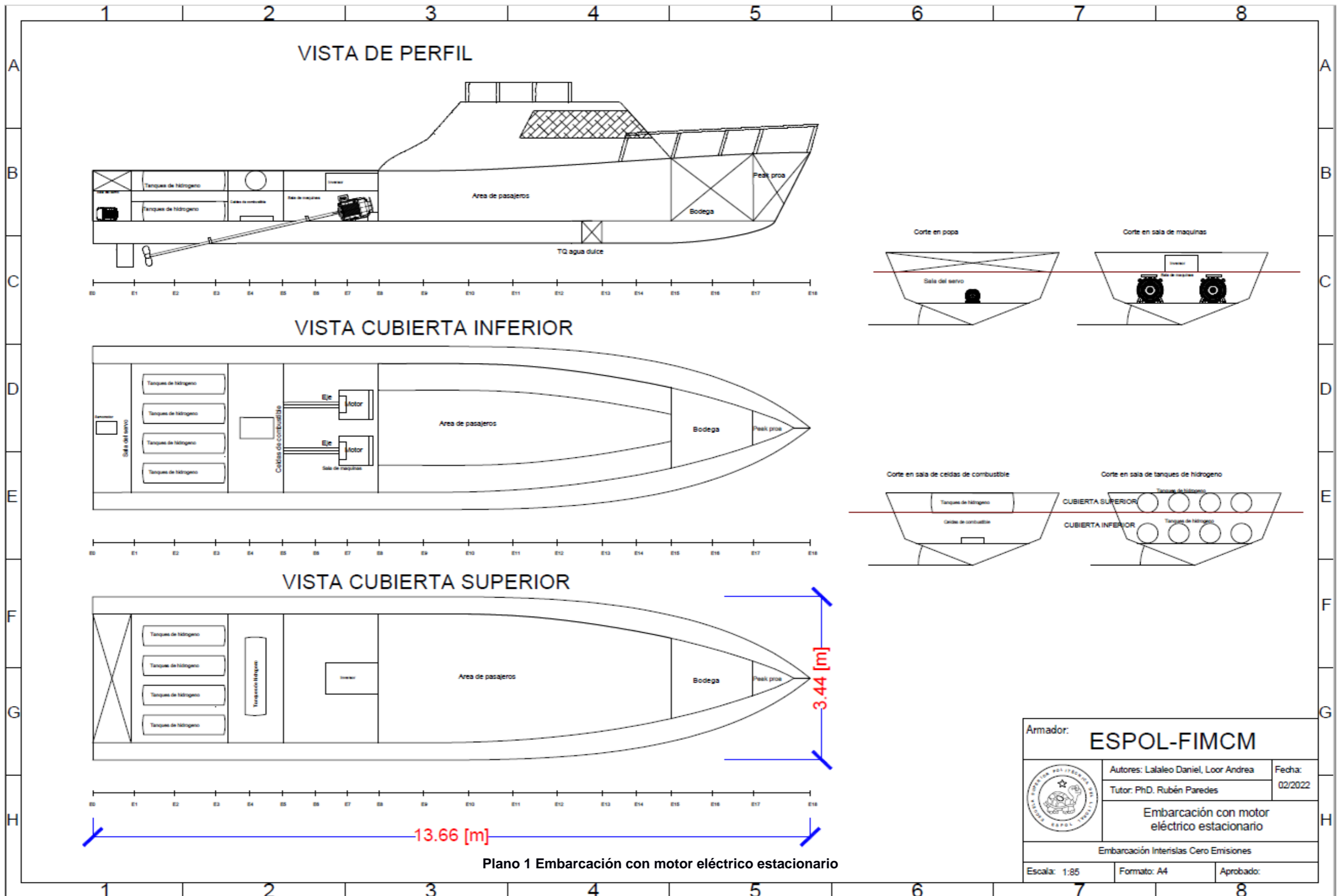
3.7 Componentes de los sistemas de propulsión eléctricos propuestos

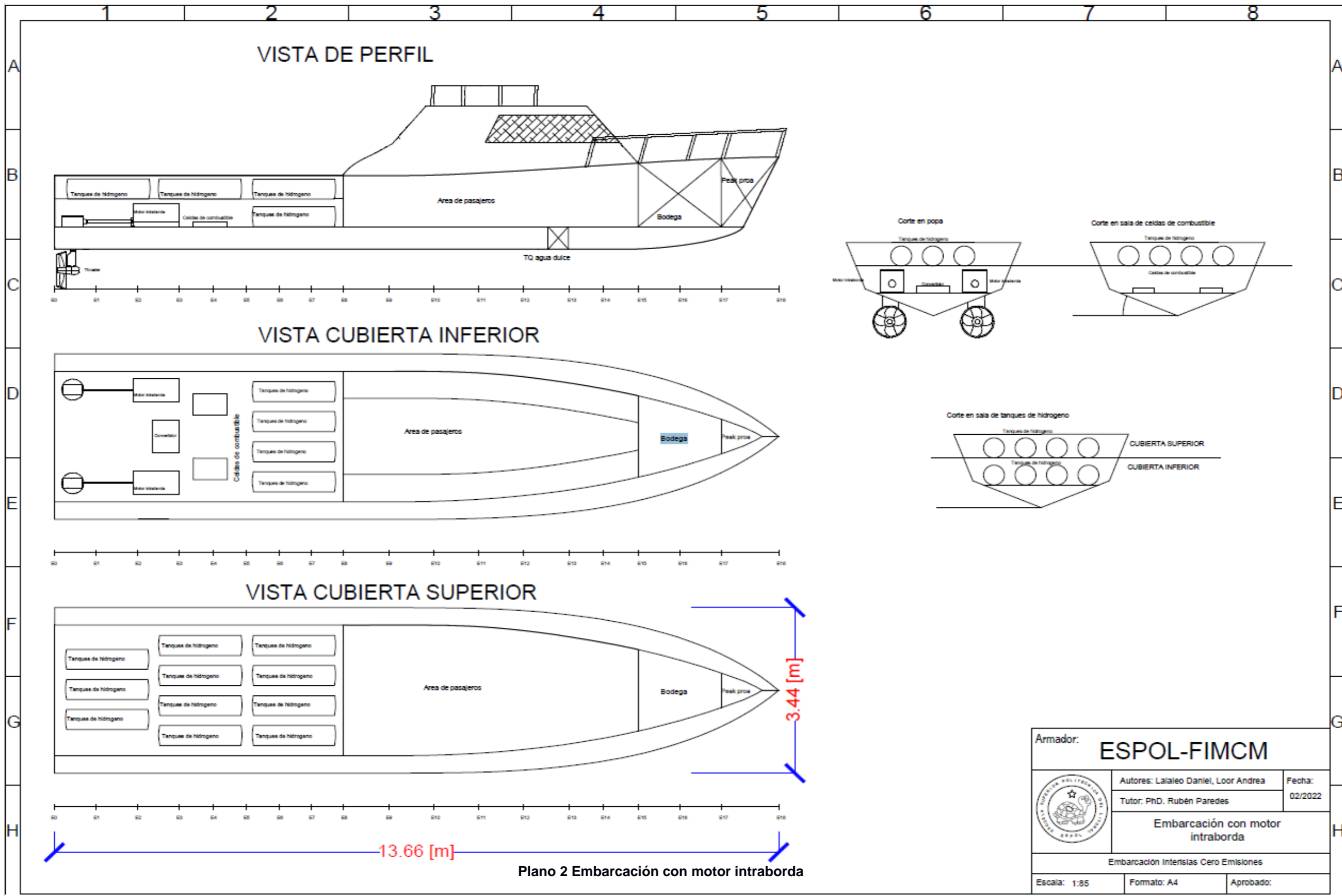
De acuerdo con lo indicado en el Capítulo 1, se muestran los componentes para cada uno de los sistemas eléctricos propuestos (Figura 3.8) y APÉNDICE F, además sus respectivos arreglos generales de acuerdo con el **Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**, y **Error! Reference source not found.**

Componentes de los sistemas eléctricos propuestos

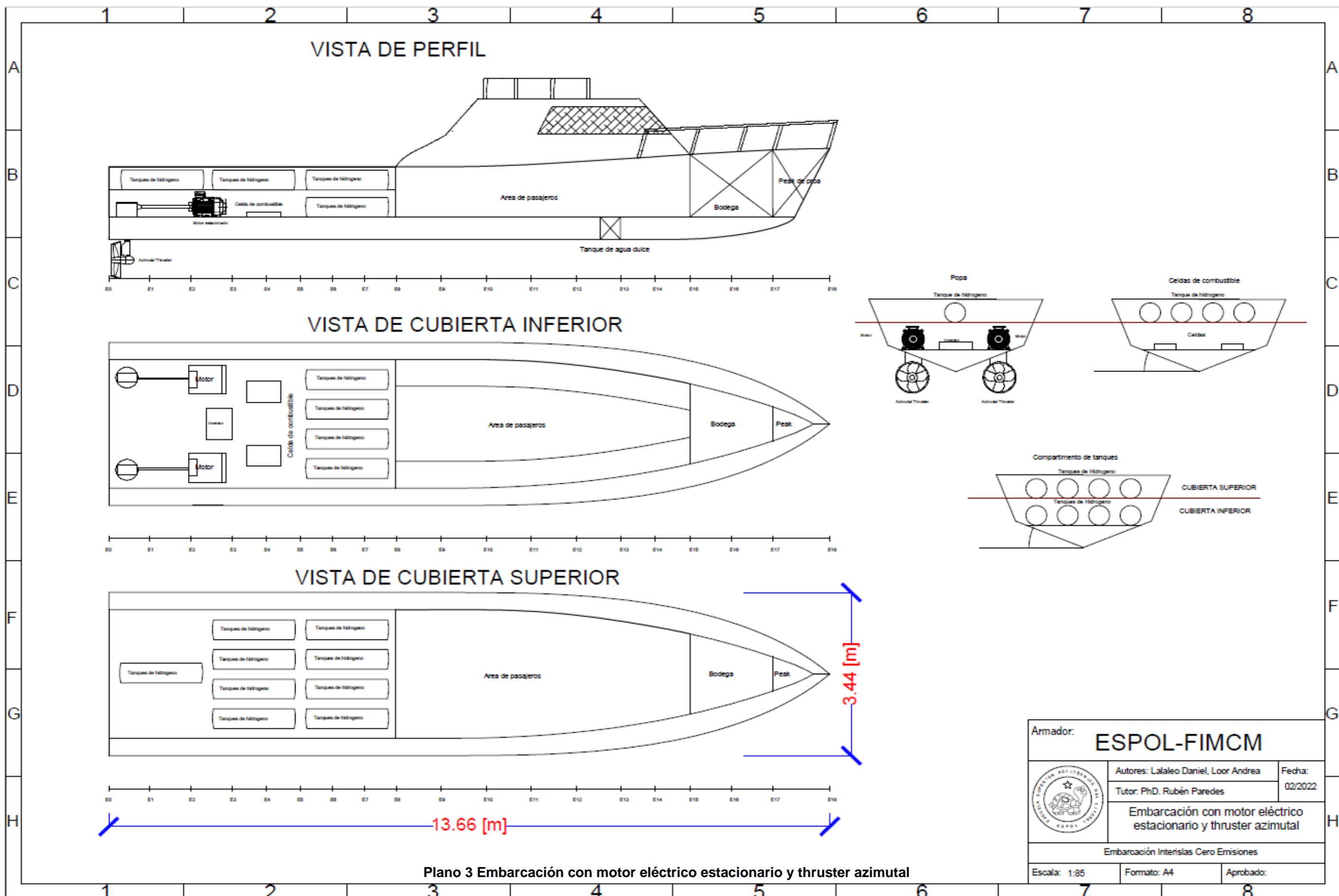
Motor eléctrico estacionario	Motor intraborda más thruster	Motor eléctrico estacionario más thruster
-2 motores eléctricos -10 tanques de hidrógeno de 350 bar -1 celda de combustible -1 inversor -2 servomotores -2 hélices -2 palas del timón -2 ejes de propulsión	-2 motores intraborda -2 celdas de combustible -2 thruster azimutal -1 convertidor DC-DC -15 tanques de hidrógeno de 350 bar	-2 motores eléctricos -2 thrusters -2 celdas de combustible -13 tanques de hidrógeno -1 inversor

Figura 3.8 Componentes de los sistemas de propulsión propuestos





Armador: ESPOL-FIMCM		
	Autores: Lalaleo Daniel, Looor Andrea	Fecha: 02/2022
	Tutor: PhD. Rubén Paredes	
Embarcación con motor intraborda		
Embarcación Interstias Cero Emisiones		
Escala: 1:85	Formato: A4	Aprobado:



De acuerdo con los resultados obtenidos en la Figura 3.8, se puede observar que el sistema de propulsión eléctrico motor intraborda más thruster lleva menos componentes. Esto se debe a que este tipo de motores son adaptables a cualquier tipo de espacios y son más ligeros en comparación con un motor eléctrico, esto es una ventaja ya que el peso sobrante es utilizado para almacenar la mayor cantidad de hidrógeno, sin embargo, una limitante es su potencia, debido a que este tipo de motores alcanzan un máximo de 100 kW en comparación con los motores eléctricos que tienen una amplia gama. En el APÉNDICE I y L se encuentra el cálculo de estabilidad y resistencia para la embarcación propuesta.

3.8 Análisis de factibilidad económica del sistema propuesto

Para el análisis económico se tomó como referencia los costos iniciales, costos generados y los ingresos de los 2 sistemas que se van a comparar, esta información se encuentra detallada en el APÉNDICE H.

3.8.1 Análisis y flujo de caja para el sistema actual y el propuesto

Para el análisis se consideró un tiempo de vida útil de 20 años. Para poder realizar los cálculos es necesario establecer el valor de la inversión inicial, la cual considera el valor de la adquisición de la embarcación y un capital de trabajo para solventar el primer mes de operación. Acorde al informe realizado por Gaona (Gaona, 2021b) la embarcación nueva se valora en \$250.000,00 y el capital de trabajo en \$13.493,83 para un mes de operatividad lo cual da un total de inversión de \$300.766,00. Sin embargo, para el sistema cero emisiones, los precios difieren ya que para la inversión inicial se considera el precio de los nuevos equipos dando un total de \$289.600,00 y el capital de trabajo para el primer mes de operación, \$14.293,85, este valor es mayor por el precio del hidrógeno gaseoso (Saito, 2018), lo que nos da un valor de inversión inicial de \$315.059,13. El desglose de los costos se encuentre en el APÉNDICE H.

Tabla 3.8 Flujo de caja, VAN y TIR para ambos sistemas

	Modelo Cero Emisiones		Modelo Actual		
Años	Flujo de Caja	Valor Presente	Flujo de Caja	Valor Presente	Interés
0	-\$315,059.13	-\$315,059.13	-\$263,093.83	-\$263,093.83	23.50%
1	\$136,427.94	\$110,467.97	\$221,297.12	\$179,187.95	
2	\$62,197.19	\$40,779.03	\$107,297.12	\$70,348.39	
3	\$67,825.02	\$36,007.18	\$174,283.80	\$92,524.37	
4	-\$21,617.54	-\$9,292.63	\$54,410.44	\$23,389.15	
5	\$136,339.94	\$47,455.69	\$174,283.80	\$60,662.77	
6	\$55,456.94	\$15,629.83	\$54,410.44	\$15,334.88	
7	\$136,339.94	\$31,113.90	\$174,283.80	\$39,773.00	
8	\$55,456.94	\$10,247.55	\$54,410.44	\$10,054.18	
9	\$136,339.94	\$20,399.54	\$174,283.80	\$26,076.81	
10	\$51,760.94	\$6,270.94	\$54,410.44	\$6,591.93	
11	\$136,339.94	\$13,374.78	\$174,283.80	\$17,097.02	
12	\$55,456.94	\$4,405.07	\$54,410.44	\$4,321.94	
13	\$136,339.94	\$8,769.05	\$174,283.80	\$11,209.51	
14	\$55,456.94	\$2,888.14	\$54,410.44	\$2,833.64	
15	\$136,339.94	\$5,749.35	\$174,283.80	\$7,349.41	
16	\$55,456.94	\$1,893.58	\$54,410.44	\$1,857.85	
17	\$136,339.94	\$3,769.51	\$174,283.80	\$4,818.58	
18	\$55,456.94	\$1,241.51	\$54,410.44	\$1,218.08	
19	\$136,339.94	\$2,471.44	\$174,283.80	\$3,159.26	
20	\$132,643.94	\$1,946.92	\$168,410.44	\$2,471.89	
	VAN	\$40,529.23	VAN	\$317,186.78	
	TIR	27%	TIR	60%	
	VPN Modelo Actual / VPN Modelo Cero Emisiones		7.8		



Figura 3.9 Recuperación de inversión para el modelo con sistema de propulsión tradicional



Figura 3.10 Recuperación de inversión para el modelo con sistema de propulsión cero emisiones



Figura 3.11 Comparación entre el sistema actual y el sistema cero emisiones

La tabla 3.8 muestra el valor actual neto (VAN) del sistema tradicional, el cual es 4.8 veces mayor con respecto al sistema de propulsión cero emisiones. Debido a esto, en términos económicos, es más rentable mantener el sistema de propulsión actual debido a que la inversión inicial por la adquisición de equipos es menor, y, a pesar de que los gastos de mantenimiento son mayores, el consumo de combustible es 1.23 veces más económico que el consumo de hidrógeno, esto causa que la inversión se recupere más rápido. En la Figura 3.9 se observa que la inversión para el sistema tradicional se recupera en el cuarto año, mientras que para el sistema cero emisiones (Figura 3.10) el tiempo es el doble, recuperando la inversión en el octavo año. La diferencia entre ambos sistemas se aprecia en la

Figura 3.11.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La contaminación ambiental debido al uso de combustibles fósiles por parte de las lanchas interislas en Galápagos genera la necesidad de buscar alternativas que den paso a la descarbonización. Como antecedente se tiene que la mayor fuente de emisiones de gases de efecto invernadero en Galápagos es causada por el uso de diésel en un 74% y por el uso de gasolina en un 22%, siendo las embarcaciones rápidas el principal medio de transporte interislas, se consume alrededor de un millón de galones anualmente.

El presente proyecto presenta alternativas que permitan el uso de energías renovables como fuente de alimentación del sistema propulsor de las lanchas interislas para eliminar por completo el uso de combustibles fósiles. Los resultados de este trabajo permiten conocer cuál es la mejor alternativa cero emisiones que se puede usar en este tipo de embarcaciones sin afectar su desplazamiento y resistencia.

Como último se realizó un análisis económico que permite verificar la viabilidad de este proyecto, esto servirá como referencia para futuros proyectos que necesiten información sobre costos de estas nuevas tecnologías. Con todo lo expuesto podemos decir que la gran fortaleza de este proyecto es ayudar al medio ambiente, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero que producen estas embarcaciones, sin embargo, una de las principales deficiencias es que este tipo de tecnologías cero emisiones como es el hidrógeno aún están en vías de desarrollo, esto quiere decir que el precio de sus componentes y su obtención son muy elevados.

4.1 Conclusiones

Se determinó la energía de propulsión requerida de la embarcación optimizada en base a su perfil de operación. En primer lugar, se utilizaron las ecuaciones semi-empíricas de Savitsky para determinar la resistencia total de 2 embarcaciones optimizadas y en base al perfil de operación de la embarcación seleccionada se obtuvo la energía de propulsión requerida. Los resultados muestran que la

embarcación optimizada sin flaps de (Villamarín, 2020) es la que presenta menor resistencia en el intervalo de velocidades entre 8 y 30 nudos y que la ruta más significativa para desarrollar el perfil de operación es el trayecto de ida y vuelta entre la Isla Santa Cruz e Isabela , en base a estas consideraciones y tomando la velocidad de diseño de 28 nudos se encontró que la energía de propulsión requerida es de 1564.47kWh.

Se analizaron 3 opciones tecnológicas de uso marino basadas en energías renovables de acuerdo con 3 escenarios propuestos. El primer escenario es el trayecto de ida y vuelta a una velocidad de 28 nudos. En el segundo escenario se redujo la cantidad de pasajeros de 24 a 12 con la misma velocidad. Finalmente, el tercer escenario se consideró solo el viaje de ida con el numero completo de pasajeros y la misma velocidad. Luego de realizar la comparación se concluyó que el tercer escenario es el más favorable ya que requiere menor energía, sin embargo, ninguna de las opciones cumple con la restricción del peso, así mismo sucede en los escenarios restantes.

Se puede concluir que ninguna opción tecnológica basada en energías renovables cumple con los escenarios propuestos a una velocidad de 28 nudos, sin embargo, se puede observar que el sistema a base de hidrógeno líquido presenta un peso de 4.67 toneladas para el escenario más favorable, el cual es menor al peso que ocupa el sistema a base de energía solar (11.63 toneladas) y el hidrógeno gaseoso (5 toneladas). Por lo tanto, el hidrógeno líquido puede ser la mejor opción, pero debido a los altos costos de los equipos para mantener la temperatura de criogenización, el alto riesgo de congelamiento que pueden sufrir los operarios y la falta de disponibilidad de sus componentes en el mercado se opta por utilizar el hidrógeno gaseoso que requiere de menos componentes y es más seguro.

Se implementó un script en Python para calcular la velocidad límite de navegación sostenida que puede alcanzar la embarcación optimizada seleccionada. Como primer paso se consideraron 3 arreglos de sistemas de propulsión eléctricos. Luego se implementaron ecuaciones en función del peso, volumen y potencia de cada uno de los componentes los cuales se ingresaron en el programa. Finalmente, mediante un proceso iterativo que tiene como restricción el peso y volumen del sistema actual

se encontró la velocidad máxima para cada sistema propuesto. Los resultados muestran que la mejor opción es el sistema motor intraborda más thruster que alcanza una velocidad máxima de 13 nudos con una EPR de 802.59 [kWh]. Se puede concluir que este sistema es más ligero ya que no requiere de muchos componentes que ocupen espacio, así como peso a bordo, dando prioridad a almacenar más cantidad de hidrógeno con el fin de aumentar la capacidad energética.

Se realizó una comparación entre los gastos de adquisición del sistema de propulsión cero emisiones con el sistema de propulsión actual. En primer lugar, se tomó como referencia los costos iniciales, costos de mantenimiento, ingresos, egresos, el flujo de caja realizado para 20 años y los criterios del VAN y TIR para comparar los 2 sistemas. Los resultados muestran la clara ventaja económica que presenta el sistema de motores fuera de borda, debido a que presenta menos componentes, por tanto, la inversión inicial es menor, y a su vez, los costos operativos por consumo de combustible difieren en gran medida con el sistema propuesto. Mientras que en gasolina se invierte una cantidad anual de \$11000,00, en hidrógeno el precio asciende hasta \$14293,13. Para el sistema actual, la inversión se recupera en el año 4 con una tasa interna de retorno del 60% y para el sistema cero emisiones, se requieren de 8 años con una TIR de 29%. Por tanto, se concluye que el proyecto es viable, aunque menos rentable que el sistema actual.

4.2 Recomendaciones

Analizar en un nivel de diseño a detalle las conexiones eléctricas del sistema de propulsión eléctrico propuesto.

Revisar a detalle las normativas y elementos de seguridad para la implementación del sistema de propulsión alimentado por hidrógeno en embarcaciones rápidas. En vista que es un elemento muy reactivo y cualquier fuga en los tanques puede ocasionar explosiones de gran magnitud.

Implementar señaléticas de seguridad y un procedimiento a seguir en caso de presentarse una emergencia como una fuga o ignición del hidrógeno con el fin de precautelar la seguridad de los pasajeros a bordo.

Optimizar las dimensiones principales de la embarcación cero emisiones para almacenar la energía requerida con el fin de alcanzar los 28 nudos de velocidad de diseño, sin disminuir su capacidad de carga y rentabilidad económica.

BIBLIOGRAFÍA

- ABS. (2021). Hydrogen as Marine Fuel. *Sustainability Whitepaper, June*.
- Ac Magnets. (2020). *DriveMaster DriveMaster Liquid Cooled*. 6–7.
- Alvarado Ponce, L. (2017). Estudio del potencial de las embarcaciones solares en la Amazonía: Caso de estudio Río Napo. *Universidad Politécnica de Madrid*.
- Andruetto, C. (2019). *Feasibility Analysis Electrification of a Rescue Boat*.
- Ayvazoğluyüksel, Ö., & Filik, Ü. B. (2017). Estimation of Monthly Average Hourly Global Solar Radiation from the Daily Value in Çanakkale, Turkey. *Journal of Clean Energy Technologies*, 5(5), 389–393. <https://doi.org/10.18178/jocet.2017.5.5.403>
- Azimut. (2020). *Bateria AGM 12V / 90Ah*.
- Balbona Calvo, L. (2014). *Marine Electric Propulsion Emission through the use of a Fuel Cell Hydrogen PEM (proton exchange membrane)*.
- Ballard. (2011). Fuel cell. *試薬*, 3, 6–7.
- Baumuller. (2020). *Sistemas de accionamiento híbridos y totalmente electricos para barcos*.
- Caihong. (2008). *Mono-crystalline Solar Module Mono-crystalline Solar Module*.
- Candon, R. (1967). Diseño de una embarcacion pesca-paseo de 6 metros de eslora. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 1(1), 1–64.
- Carlton, J. (2007). *Marine Propellers and Propulsion* (Second Edi). Elsevier Ltd.
- Celec. (2018). *Expansión de la Generación*.
- Cemer. (2020). *MOTORES ELECTRICOS TRIFÁSICOS y MONOFÁSICOS*.
- Chang, W. R., Hwang, J. J., & Wu, W. (2017a). Environmental impact and sustainability study on biofuels for transportation applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 277–288. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.020>
- Chang, W. R., Hwang, J. J., & Wu, W. (2017b). Environmental impact and sustainability study on biofuels for transportation applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 277–288. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.020>
- Choi, C. H., Yu, S., Han, I. S., Kho, B. K., Kang, D. G., Lee, H. Y., Seo, M. S., Kong, J. W., Kim, G., Ahn, J. W., Park, S. K., Jang, D. W., Lee, J. H., & Kim, M. (2016). Development and demonstration of PEM fuel-cell-battery hybrid system for propulsion of tourist boat. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(5), 3591–

3599. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.186>

Conexión ESAN. (2017). *ESAN Graduate School of Business*. Fundamentos Financieros: El Valor Actual Neto (VAN). [https://www.esan.edu.pe/conexion-esan/fundamentos-financieros-el-valor-actual-neto-van#:~:text=VAN %3C 0 el proyecto no,ha cumplido con la TD.](https://www.esan.edu.pe/conexion-esan/fundamentos-financieros-el-valor-actual-neto-van#:~:text=VAN%3C0%20el%20proyecto%20no%2C%20ha%20cumplido%20con%20la%20TD.)

Dirección del Parque Nacional Galápagos, & Observatorio de Turismo de Galápagos. (2020). *Informe anual de visitantes 2019*. 14.

DNV-GL. (2019). *Rules for Classification Part 6 Chapter 2*. July, 371.

Doerry, W. (2020). *Annual Sea States in the Open Ocean*. https://www.researchgate.net/figure/Annual-Sea-States-in-the-Open-Ocean-Northern-Hemisphere-The-descriptive-terms-vary-from_tbl5_341386514

Economipedia. (2017). *Valor actual neto*.

Elco. (2020). *Motores eléctricos intraborda*.

Espla Palacios, V. (2020). *PORTACONTENEDORES FEEDER DE 2 . 500 TEU*.

ESPOL. (2021). *Proyecto politécnico de embarcaciones ecoamigables hará sostenible la transportación interislas en Galápagos*. [https://www.espol.edu.ec/en/noticias/proyecto-politecnico-de-embarcaciones-ecoamigables-hará-sostenible-la-transportación](https://www.espol.edu.ec/en/noticias/proyecto-politecnico-de-embarcaciones-ecoamigables-hara-sostenible-la-transportacion)

Fuentes, Á. (2020). *Estudio y Diseño Preliminar de una embarcacion planeadora*.

Gaona, A. (2021a). *Análisis del Sistema de transporte Interislas*.

Gaona, A. (2021b). *Evaluación del rendimiento propulsivo de una lancha Guardacosta con velocidad máxima de 50 nudos*.

García, A. (2008). Producción , almacenamiento y distribución de hidrógeno. *Asociación Española Del Hidrógeno, 2008*, 1–16.

Hidrogeno18. (2020). *Pila de combustible*. <https://hidrogeno18.wixsite.com/hidrogeno/hidrogeno-pilas-de-combustible>

Ingenieros. (2018). *Como funciona la energía solar fotovoltaica*.

International Maritime Organization. (2001). *SOLAS: Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar, 1974, y su Protocolo de 1988*.

Isgró, M. D. E. L. O. S. Á. (2015). *EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO : SU OBTENCIÓN POR ELECTRÓLISIS*.

Jara, J. (2017). *Embarcaciones solares, una evolución al transporte marino en las islas Galápagos, Ecuador*. May.

Karapinar Kapdan, I., & Kargi, F. (2006). *Bio-hydrogen production from waste materials*.

- Enzyme and Microbial Technology.
- Krautler. (2018). *Boat motor catalog*.
- Linea Verde. (2020). *Energias renovables*.
- Mahecha Rodriguez, E. (2018). *USO DEL HIDRÓGENO COMO FUENTE ALTERNATIVA PARA ALIMENTAR PILAS DE COMBUSTIBLE*. FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL BOGOTÁ D.C.
- Mao, X., Rutherford, D., Osipova, L., & Comer, B. (2020a). Refueling assessment of a zero-emission container corridor between China and the United States: Could hydrogen replace fossil fuels? *International Council on Clean Transportation, March*.
www.theicct.org
- Mao, X., Rutherford, D., Osipova, L., & Comer, B. (2020b). Refueling assessment of a zero-emission container corridor between China and the United States: Could hydrogen replace fossil fuels? *International Council on Clean Transportation, March*.
- Marín, J. R. (2020). *OPTIMIZACION DE EMBARCACIONES PLANEADORAS FLUVIALES PARA TRANSPORTE DE CARGA Y PASAJEROS*. October 2007.
- Marine, S. (2020). *Aplicaciones navales del thruster*. 86.
- McKinlay, C. J., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2021). Route to zero emission shipping: Hydrogen, ammonia or methanol? *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(55), 28282–28297. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.066>
- Meléndez, J. (2021). *Diseño Conceptual de Embarcaciones Planeadoras Incluyendo Flaps para Servicio Interislas en Galápagos Utilizando el Algoritmo NSGA-II*.
- Mercier, J., & Savitsky, D. (1667). *RESISTANCE OF TRANSOM-STERN CRAFT IN THE PRE-PLANING REGIME*.
- Ministerio de Turismo. (2019). *Mapa Ecoturístico de Galápagos al alcance del viajero*.
- Minnehan, J. J., & Pratt, J. W. (2017a). Practical Application Limits of Fuel Cells and Batteries for Zero Emission Vessels. *Sandia Unlimited Release, SAND2017-1*, 1–71.
<https://classic.ntis.gov/help/order-methods/>
- Minnehan, J. J., & Pratt, J. W. (2017b). Practical Application Limits of Fuel Cells and Batteries for Zero Emission Vessels. *Sandia Unlimited Release, SAND2017-1*, 1–71.
- Molland, A. (2008). *The Maritime Engineering Reference Book*.
- Molland, A. F., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2011). Ship resistance and propulsion: Practical estimation of ship propulsive power. In *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power* (Vol. 9780521760).

<https://doi.org/10.1017/CBO9780511974113>

Motors, E. (2020). *IE3 Motors*.

Moya Cajas, M. J. (2019). *Análisis del comportamiento de las variables ambientales y energéticas que inciden en la operación del catamarán solar "INER 1" en las Islas Galápagos mediante selección de atributos*.

Moya, M., & Arroyo, D. (2015). Análisis de los resultados de la operación del catamarán "Génesis Solar" en el estrecho de Itabaca (Islas Galápagos). *Researchgate.Net*, June.

NASA. (2020). *Prediction of Worldwide Energy Resources*.

Nasirudin, A., Chao, R. M., & Utama, I. K. A. P. (2017). Solar powered boat design optimization. *Procedia Engineering*, 194, 260–267. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.144>

Orejas, H. C. (n.d.). *Predicción De Potencia Propulsores Y Timones*.

Paternina, A., Villalba, O., Carlos, L., Nuñez, I., Luis, J., & Antonio, R. (2012). *Design of an solarphotovoltaic system prototype optimizing the slope angle of the solar panels*.

Patreon. (2020). *Hydrogen energy storage in AMMONIA: Fantastic future or fossil fuel scam?* https://www.youtube.com/watch?v=5Y_2Z_VwFNc

Quezada, A. (2008). DISEÑO DE UN SISTEMA DE ELECTRIFICACIÓN Y PROPULSIÓN PARA UNA EMBARCACIÓN TURÍSTICA, EN BASE A MICRO-GENERACIÓN. In *In Vitro* (Vol. 3).

Radojčić, D., Kalajdžić, M., & Simić, A. (2019). Power Prediction Modeling of Conventional High-Speed Craft. In *Power Prediction Modeling of Conventional High-Speed Craft*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-30607-6>

Radojčić, D., Simić, A., & Kalajdžić, M. (2009). Fifty years of the Gawn-Burrill KCA propeller series. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects Part B: International Journal of Small Craft Technology*, 151(2), 9–17. <https://doi.org/10.3940/rina.ijsc.2009.b2.92>

RDM. (2020). *Catalogo servomotores*.

Register, C., & Shipping, O. F. (2020). *Rule for the Classification of Ships*. 385(January).

Rodatz, P., Tsukada, A., Mladek, M., & Guzzella, L. (2002). Efficiency improvements by pulsed hydrogen supply in pem fuel cell systems. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* (Vol. 15, Issue 1). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20020721-6-es-1901.01511>

Rosén, A. (2004). Loads and Responses for Planing Craft in Waves. In *Aeronautical and*

Vehicle Engineering (Issue December 2004).

- Rubbiolo, M. (2020). *Motores y Generadores*. <https://motoresygeneradores.com/lista-sugerida-de-precios-reparadores/>
- Saito, N. (2018). *The Maritime Commons : Digital Repository of the World Maritime The economic analysis of commercial ships with hydrogen fuel cell through case studies The Economic Analysis of Commercial Ships with Hydrogen Fuel Cell through Case Studies*.
- Sánchez, S. (2015). Texto de consulta de energía solar fotovoltaica. *EnerPro*, 1–36. <http://enerpro.com.ec/wp-content/uploads/2019/04/Texto-de-Consulta-de-Energía-Solar-Fotovoltaica.pdf>
- Savitsky, D. (1964). *Hydrodynamic design of planing hulls*.
- Savitsky, D., & Brown, W. (1976). *Savitsky-Brown 1976.pdf* (p. 19).
- Savitsky, D., DeLorme, M., & Datla, R. (2007). Inclusion of whisker spray drag in performance prediction method for high-speed planing hulls. *Marine Technology and SNAME News*, 44(1), 35–56. <https://doi.org/10.5957/mt1.2007.44.1.35>
- Schallenberg Rodríguez, J. C. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. Instituto Tecnológico de Canarias.
- Shabani, B., & Andrews, J. (2011). An experimental investigation of a PEM fuel cell to supply both heat and power in a solar-hydrogen RAPS system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(9), 5442–5452. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.02.003>
- Siemens. (2021). Hoja de datos de motores jaula de ardilla trifásicos. In *Siemens*.
- SIRIO. (2011). *Catalogo de inversores*.
- TEMA. (2020). *Motores electricos marinos*.
- Teschler, L. (2004). Motion control. *Machine Design*, 76(23), 111.
- Torqueedo. (2020). *Bateria Deep Blue*.
- Veziroğlu, T. N., & Şahin, S. (2008). 21st Century's energy: Hydrogen energy system. *Energy Conversion and Management*, 49(7), 1820–1831. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.08.015>
- Villamarín, E. (2020). *Propuesta de mejora del comportamiento dinámico de lanchas interislas de Galápagos orientado al confort de pasajeros*. September 2020. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25479.42409>
- Voltimum. (2016). *El sistema de propulsion electrica de buques mas eficiente del mundo*.
- Zurita, S. (2020). *ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE UN SISTEMA PROPULSOR CON*

BAJAS EMISIONES PARA TRANSPORTE DE PASAJEROS INTERISLAS DE GALÁPAGOS.

APÉNDICES

APÉNDICE A

COMPARATIVA DE AMONIACO (NH₃) CON HIDRÓGENO (H₂)

En los últimos años, el amoniaco ha sido empleado como un medio de producir energía al liberar el hidrógeno proveniente de su descomposición química.

El amoniaco presenta mayor ventaja para transportarlo y almacenarlo en comparación con el hidrógeno. El mismo volumen de amoniaco contiene 50% más hidrógeno que hidrógeno gaseoso. El amoníaco debería ser visto como un portador de hidrógeno. Se requeriría un "agrietamiento de amoníaco", para convertir el amoniaco de nuevo en hidrógeno. Este proceso es relativamente eficiente y no generaría emisiones (McKinlay et al., 2021).

La composición del aire tiene un 78% de nitrógeno, por lo cual no hay escasez de este elemento y tampoco lo hay de hidrógeno ya que es el elemento más abundante en el universo. Sin embargo, los procesos industriales, para liberar nitrógeno e hidrógeno y conseguir amoniaco, se encuentran entre los más sucios del mundo. Empleando el 2% de los combustibles fósiles del mundo y representando el 1.2% de las emisiones totales de CO₂.

Se puede obtener hidrógeno mediante electrólisis, pero la gran mayoría de la producción de hidrógeno se obtiene mediante reformado de metano con vapor el cual bombardea gas natural o metano a temperaturas y presión extremadamente altas para forzar a los átomos de carbono e hidrógeno a separarse de manera muy rápida; este proceso también ocasiona la formación acelerada de CO₂ el mismo que generalmente no se captura en el proceso y se libera nuevamente. Para separar el nitrógeno del aire se usa el proceso llamado Haber Bosch que consiste en comprimir el nitrógeno y el hidrógeno a aproximadamente 250 veces la presión atmosférica y temperaturas de aproximadamente 400 °C en reactores de acero y estrechos donde un catalizador de hierro ayuda a liberar los átomos de nitrógeno individuales para reaccionar con los átomos de hidrógeno en las proporciones

correctas para producir amoníaco. El proceso utiliza una gran cantidad de energía que usualmente se proporciona por combustibles fósiles (Patreon, 2020).

Por esta razón, dado que no existen las tecnologías adecuadas que garanticen un amoníaco verde, no se considera como una opción de fuente para el sistema diseñado.

APÉNDICE B

EVALUACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA RESISTENCIA DE LAS EMBARCACIONES

A continuación, se muestran las curvas de resistencia típicas para la lancha interceptora Rio Macara, la cual tiene similares dimensiones a la embarcación optimizada con flaps (Meléndez, 2021).

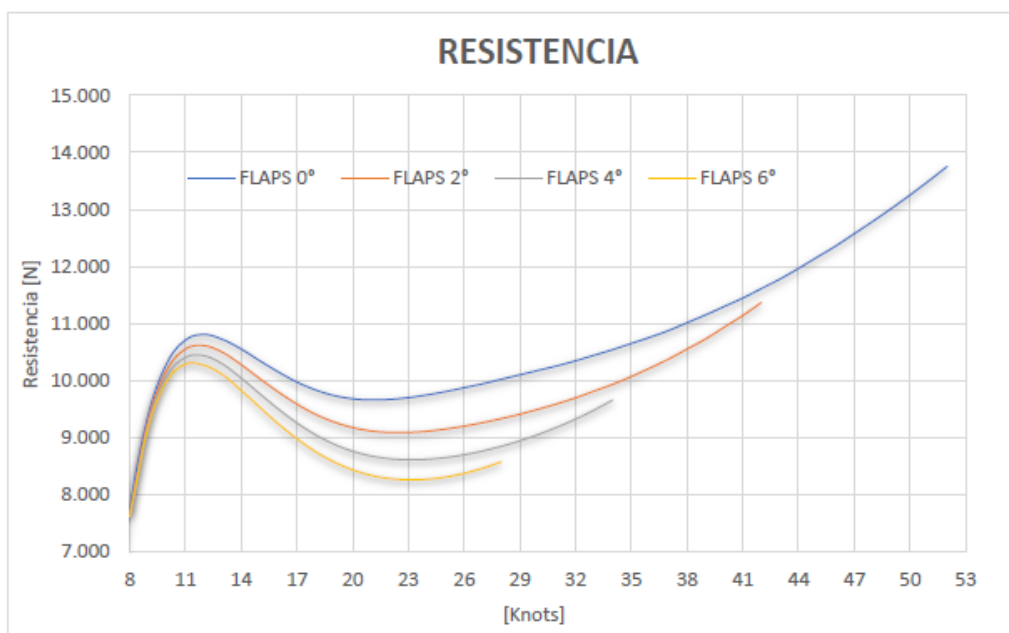


Figura B.1 Curva Resistencia vs Velocidad de lancha interceptora LG-613 Rio Macara
(Gaona, 2021b)

También se muestra los resultados obtenidos por Maxsurf Resistance en la Ilustración A.2 para comparar los valores obtenidos en Excel.

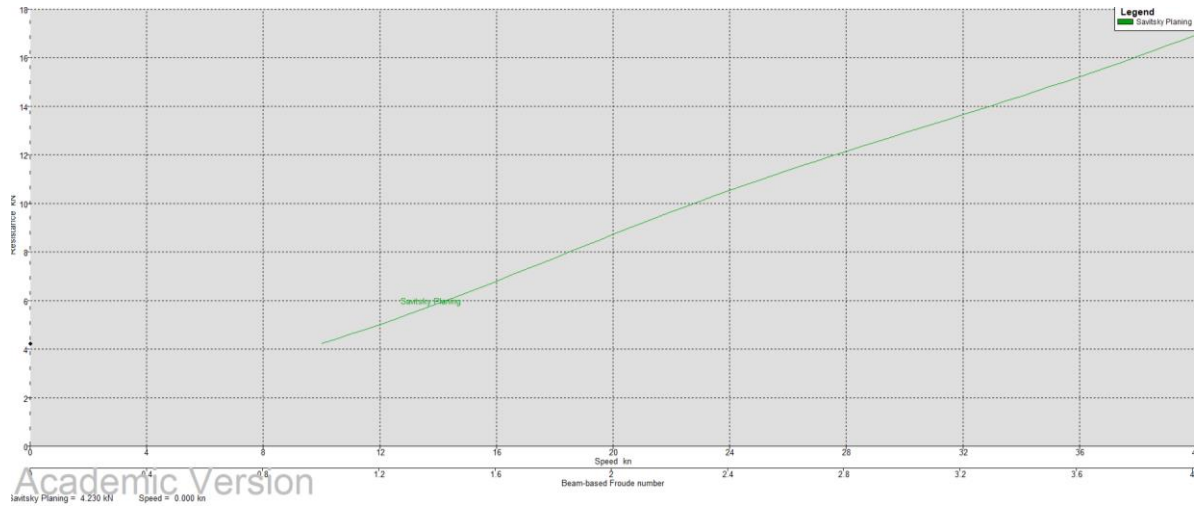


Figura B.2 Resistencia vs Velocidad modelo

(Villamarín, 2020)

Se comprobó $L_k < L_{wl}$ para la lancha optimizada seleccionada para comprobar que exista planeo. Teniendo un L_{wl} de 13.66 m y utilizando la siguiente ecuación.

(Savitsky, 1964)

$$Lk = \lambda * b + \frac{b * \tan \beta}{2 * \pi * \tan \tau}$$

(B.1)

Donde:

λ : Radio eslora mojada media-Manga

b : Manga

β : Angulo de astilla muerta

τ : Angulo de trimado

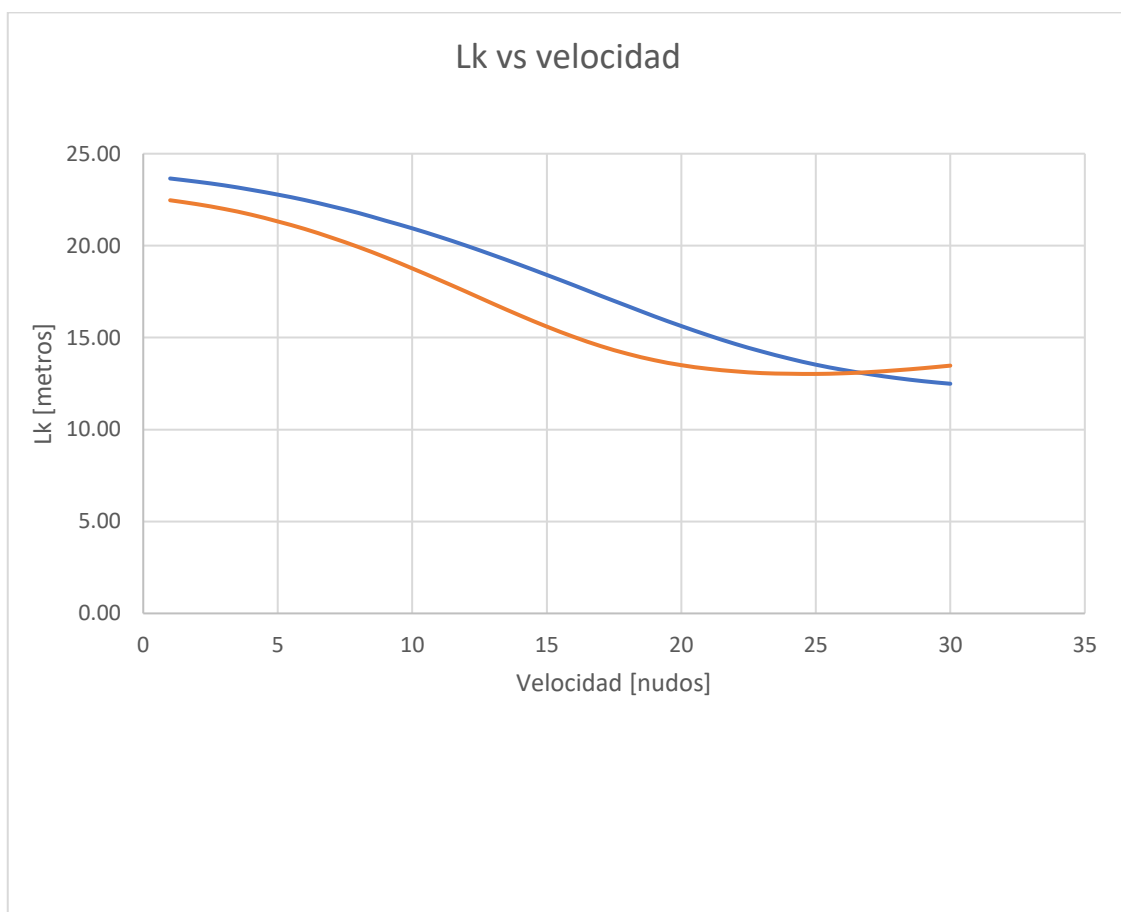


Figura B.3 Eslora mojada de la quila Lk vs Velocidad modelo

APÉNDICE A

CÓDIGO EN PYTHON PARA DIMENSIONAMIENTO DE LA HÉLICE

Tabla C.1 Valores de las constantes para KT

Kt					
	CT	e	x	y	z
1	0.1193852	0	0	0	0
2	-0.6574682	0	0	0	1
3	0.3493294	0	0	1	0
4	0.4119366	0	0	1	1
5	-0.1991927	0	0	2	1
6	5.863051	-2	0	2	2
7	-1.107735	-2	0	2	3
8	-0.1341679	0	1	0	0
9	0.2628839	0	1	0	1
10	-0.5217029	0	1	1	1
11	0.2970728	0	1	2	0
12	6.15258	-2	2	1	3
13	-2.47084	-2	2	2	3
14	-4.080166	-3	1	6	0
15	4.154201	-3	1	6	1
16	-1.136452	-3	2	6	0

Tabla C.2 Valores de las constantes para KQ

Kq					
	Cq	e	x	y	z
1	1.541166	-3	0	0	0
2	0.1091688	0	0	0	1
3	-0.310242	0	0	0	2
4	0.1547428	0	0	0	3
5	-4.370615	-2	0	1	0
6	0.249095	0	0	1	2
7	-0.1594602	0	0	1	3
8	8.536747	-2	0	2	0
9	-9.512163	-2	0	2	1
10	-9.320307	-3	0	2	2
11	3.287805	-2	0	2	3
12	5.946034	-2	1	0	1

Kq					
	Cq	e	x	y	z
13	-4.865063	-2	1	1	0
14	-0.10625	0	1	1	1
15	8.529955	-2	1	2	0
16	1.101023	-2	2	0	3
17	-3.151756	-3	2	2	2

Tabla C.3 Valores de las constantes para delta KT

ΔKt						
	dt	e	s	v	l	u
1	6.688144	-2	0	0	0	0
2	3.579195	0	0	0	2	0
3	-5.70035	0	0	0	3	0
4	-1.35994	0	1	1	0	0
5	-8.111903	0	1	1	1	0
6	4.770548	1	1	1	3	0
7	-2.313208	-1	2	1	0	0
8	-1.387858	1	2	1	2	0
9	4.992201	1	2	1	3	0
10	-7.161204	1	2	1	4	0
11	1.721436	1	2	2	0	0
12	2.322218	1	2	2	1	0
13	-1.156897	2	2	2	2	0
14	5.0141178	-2	0	0	0	2
15	-6.555364	-2	0	0	1	2
16	2.852867	-1	1	0	1	1
17	-8.081759	-1	1	1	0	1
18	8.671852	1	3	2	5	0
19	-3.727835	1	3	3	0	0
20	8.0497	1	3	3	1	0

Tabla C.4 Valores de las constantes para delta KQ

Kq						
	dq	e	s	v	l	u
1	4.024475	-3	0	0	0	0
2	1.202447	-1	0	0	2	0
3	-9.83607	-2	1	1	0	0
4	-8.31884	-1	1	1	1	0
5	5.098177	0	1	1	3	0
6	-5.192839	-1	2	1	1	0
7	2.641109	0	2	2	0	0
8	-1.688934	1	2	2	3	0
9	4.928417	-2	0	0	1	1
10	1.024274	-2	0	0	0	2
11	-1.194521	-1	0	1	1	1
12	5.498736	-2	1	0	1	1
13	-2.488235	-1	1	1	0	1
14	-5.832879	-1	0	0	5	0
15	1.503955	-1	0	3	0	0
16	-3.316121	0	3	3	0	0
17	3.890792	0	3	3	1	0
18	1.682032	1	3	3	3	0

Código implementado para el cálculo de los coeficientes

```

import openpyxl
import math

#DATOS
Cb=0.419
wt=(0.5*Cb)-0.05
V=7.71667 #m/s
Va=V*(1-wt)
Pa=101325 #pascales
lpp=13 #n
trim=1.559*math.pi/1800
dens=1025 #kg/m3
hcavit=0.5*lpp*math.tan(trim)
Ph=dens*9.81*hcavit
Pv=0
sigma=(Pa+Ph-Pv)/(0.5*dens*Va*Va)

Z=3
DAR=[0.3,0.5,0.7,0.9]
PD=[0.6,0.8,1.0,1.2]

```

```
J=[0,0.5,0.1,0.15,0.2,0.25,0.30,0.35,0.40,0.45,0.50,0.55,0.60,0.65,0.70,0.75,0.80,0.85,0.90,0.95,1.00,1.05,1.10,1.15,1.20,1.25,1.30,1.35,1.40,1.45,1.50]
#valores de J con los que se va a trabajar
```

```
excel=openpyxl.load_workbook("CurvasHelice.xlsx")
excel.sheetnames #nombres de las hojas del archivo
sheet=excel['Coeficientes'] #nombre de la hoja donde se encuentran los datos
#valores de constantes para kt
Kt_Ct=sheet['B3':'B18'] #rango para valores de Ct para Kt
Kt_e=sheet['C3':'C18'] #rango para valores de e para Kt
Kt_x=sheet['D3':'D18'] #rango para valores de x para kt
Kt_y=sheet['E3':'E18'] #rango para valores de y para kt
Kt_z=sheet['F3':'F18'] #rango para valores de z para kt
KTct=[] #agregar valores de ct
KTe=[] #agregar valores de e
KTx=[] #agregar valores de x
KTy=[] #agregar valores de y
KTz=[] #agregar valores de y
for row in Kt_Ct:
    for cell in row:
        KTct.append(cell.value)
#print(KTct)
for row in Kt_e:
    for cell in row:
        KTe.append(cell.value)
#print(KTe)
for row in Kt_x:
    for cell in row:
        KTx.append(cell.value)
#print(KTx)
for row in Kt_y:
    for cell in row:
        KTy.append(cell.value)
#print(KTy)
for row in Kt_z:
    for cell in row:
        KTz.append(cell.value)
#print(KTz)
```

```
#valores de constantes para kq
Kq_Ct=sheet['I3':'I19'] #rango para valores de Ct para Kq
Kq_e=sheet['J3':'J19'] #rango para valores de e para Kq
Kq_x=sheet['K3':'K19'] #rango para valores de x para kq
Kq_y=sheet['L3':'L19'] #rango para valores de y para kq
Kq_z=sheet['M3':'M19'] #rango para valores de z para kq
KQct=[] #agregar valores de ct
KQe=[] #agregar valores de e
KQx=[] #agregar valores de x
KQy=[] #agregar valores de y
KQz=[] #agregar valores de y
for row in Kq_Ct:
    for cell in row:
        KQct.append(cell.value)
#print(KQct)
for row in Kq_e:
    for cell in row:
        KQe.append(cell.value)
#print(KQe)
for row in Kq_x:
    for cell in row:
        KQx.append(cell.value)
```

```

#print(KQx)
for row in Kq_y:
    for cell in row:
        KQy.append(cell.value)
#print(KQy)
for row in Kq_z:
    for cell in row:
        KQz.append(cell.value)
#print(KQz)

#valores de constantes para deltakt
delKt_dt=sheet['P3':'P22'] #rango para valores de dt para deltaKt
delKt_e=sheet['Q3':'Q22'] #rango para valores de e para deltaKt
delKt_s=sheet['R3':'R22'] #rango para valores de s para deltakt
delKt_v=sheet['S3':'S22'] #rango para valores de v para deltakt
delKt_l=sheet['T3':'T22'] #rango para valores de l para deltakt
delKt_u=sheet['U3':'U22'] #rango para valores de u para deltakt
delKTdt=[] #agregar valores de dt
delKTe=[] #agregar valores de e
delKTS=[] #agregar valores de s
delKTV=[] #agregar valores de v
delKTl=[] #agregar valores de l
delKTu=[] #agregar valores de u
for row in delKt_dt:
    for cell in row:
        delKTdt.append(cell.value)
#print(delKTdt)
for row in delKt_e:
    for cell in row:
        delKTe.append(cell.value)
#print(delKTe)
for row in delKt_s:
    for cell in row:
        delKTS.append(cell.value)
#print(delKTS)
for row in delKt_v:
    for cell in row:
        delKTV.append(cell.value)
#print(delKTV)
for row in delKt_l:
    for cell in row:
        delKTl.append(cell.value)
#print(delKTl)
for row in delKt_u:
    for cell in row:
        delKTu.append(cell.value)
#print(delKTu)

#valores de constantes para deltakq
delKq_dt=sheet['X3':'X20'] #rango para valores de dt para deltaKq
delKq_e=sheet['Y3':'Y20'] #rango para valores de e para deltaKq
delKq_s=sheet['Z3':'Z20'] #rango para valores de s para deltakq
delKq_v=sheet['AA3':'AA20'] #rango para valores de v para deltakq
delKq_l=sheet['AB3':'AB20'] #rango para valores de l para deltakq
delKq_u=sheet['AC3':'AC20'] #rango para valores de u para deltakq
delKQdt=[] #agregar valores de dt
delKQe=[] #agregar valores de e
delKQs=[] #agregar valores de s
delKQv=[] #agregar valores de v
delKQl=[] #agregar valores de l
delKQu=[] #agregar valores de u

```

```

for row in delKq_dt:
    for cell in row:
        delKQdt.append(cell.value)
#print(delKQdt)
for row in delKq_e:
    for cell in row:
        delKQe.append(cell.value)
#print(delKQe)
for row in delKq_s:
    for cell in row:
        delKQs.append(cell.value)
#print(delKQs)
for row in delKq_v:
    for cell in row:
        delKQv.append(cell.value)
#print(delKQv)
for row in delKq_l:
    for cell in row:
        delKQl.append(cell.value)
#print(delKQl)
for row in delKq_u:
    for cell in row:
        delKQu.append(cell.value)
#print(delKQu)

#Valores de DAR 0.3 - P/D=0.6,0.8,1.0,1.2
KT_DAR0PD0=[] #DAR 0.3 - PD 0.6
KQ_DAR0PD0=[] #DAR 0.3 - PD 0.6
KT_DAR0PD1=[] #DARc0.3 - PD 0.8
KQ_DAR0PD1=[] #DAR 0.3 - PD 0.8
KT_DAR0PD2=[] #DAR 0.3 - PD 1.0
KQ_DAR0PD2=[] #DAR 0.3 - PD 1.0
KT_DAR0PD3=[] #DAR 0.3 - PD 1.2
KQ_DAR0PD3=[] #DAR 0.3 - PD 1.2

#Valores de DAR 0.5 - P/D=0.6,0.8,1.0,1.2
KT_DAR1PD0=[] #DAR 0.5 - PD 0.6
KQ_DAR1PD0=[] #DAR 0.5 - PD 0.6
KT_DAR1PD1=[] #DAR 0.5 - PD 0.8
KQ_DAR1PD1=[] #DAR 0.5 - PD 0.8
KT_DAR1PD2=[] #DAR 0.5 - PD 1.0
KQ_DAR1PD2=[] #DAR 0.5 - PD 1.0
KT_DAR1PD3=[] #DAR 0.5 - PD 1.2
KQ_DAR1PD3=[] #DAR 0.5 - PD 1.2

#Valores de DAR 0.7 - P/D=0.6,0.8,1.0,1.2
KT_DAR2PD0=[] #DAR 0.7 - PD 0.6
KQ_DAR2PD0=[] #DAR 0.7 - PD 0.6
KT_DAR2PD1=[] #DAR 0.7 - PD 0.8
KQ_DAR2PD1=[] #DAR 0.7 - PD 0.8
KT_DAR2PD2=[] #DAR 0.7 - PD 1.0
KQ_DAR2PD2=[] #DAR 0.7 - PD 1.0
KT_DAR2PD3=[] #DAR 0.7 - PD 1.2
KQ_DAR2PD3=[] #DAR 0.7 - PD 1.2

#Valores de DAR 0.9 - P/D=0.6,0.8,1.0,1.2
KT_DAR3PD0=[] #DAR 0.9 - PD 0.6
KQ_DAR3PD0=[] #DAR 0.9 - PD 0.6
KT_DAR3PD1=[] #DAR 0.9 - PD 0.8
KQ_DAR3PD1=[] #DAR 0.9 - PD 0.8
KT_DAR3PD2=[] #DAR 0.9 - PD 1.0

```

```

KQ_DAR3PD2=[] #DAR 0.9 - PD 1.0
KT_DAR3PD3=[] #DAR 0.9 - PD 1.2
KQ_DAR3PD3=[] #DAR 0.9 - PD 1.2

```

```

Result=[KT_DAR0PD0,KQ_DAR0PD0,KT_DAR0PD1,KQ_DAR0PD1,KT_DAR0PD2,KQ_DAR0PD2,KT_
DAR0PD3,KQ_DAR0PD3,KT_DAR1PD0,KQ_DAR1PD0,KT_DAR1PD1,KQ_DAR1PD1,KT_DAR1PD2,KQ_
DAR1PD2,KT_DAR1PD3,KQ_DAR1PD3,KT_DAR2PD0,KQ_DAR2PD0,KT_DAR2PD1,KQ_DAR2PD1,KT_
DAR2PD2,KQ_DAR2PD2,KT_DAR2PD3,KQ_DAR2PD3,KT_DAR3PD0,KQ_DAR3PD0,KT_DAR3PD1,KQ_
DAR3PD1,KT_DAR3PD2,KQ_DAR3PD2,KT_DAR3PD3,KQ_DAR3PD3]
resultados=[]

```

```

for dar in DAR:

```

```

    for ratio in PD:

```

```

        n=DAR.index(dar)
        m=PD.index(ratio)
        indxKT=(n*8)+(2*m)
        indxKQ=(n*8)+1+(2*m)
        listKT=Result[indxKT]
        listKQ=Result[indxKQ]

```

```

        for j in J:

```

```

            KT=0
            KTsinCav=0
            for ct in KTct:
                ind=KTct.index(ct)

```

```

a=ct*(pow(10,KTc[ind]))*(pow(dar,KTx[ind]))*(pow(ratio,KTy[ind]))*(pow(j,KTz[
ind]))

```

```

            KTsinCav=KTsinCav+a
            KTCav=0

```

```

            for dt in delKTdt:
                ind=delKTdt.index(dt)
                sigma7r=(sigma/pow(1-wt,2))*((j*j)/((j*j)+4.84))

```

```

b=dt*(pow(10,delKTe[ind]))*(pow(dar,delKTs[ind]))*(pow(ratio,delKTv[ind]))*(p
ow(sigma7r,delKTL[ind]))*(pow(KTsinCav,delKTu[ind]))

```

```

            KTCav=KTCav+b
            KT=KTsinCav+KTCav
            listKT.append(KT)
            KQ = 0

```

```

            KQsinCav = 0

```

```

            for ct in KQct:

```

```

                ind = KQct.index(ct)
                a = ct * (pow(10, KQc[ind])) * (pow(dar, KQx[ind])) *
(pow(ratio, KQy[ind])) * (pow(j, KQz[ind]))
                KQsinCav = KQsinCav + a

```

```

            KQCav = 0

```

```

            for dt in delKQdt:
                ind=delKQdt.index(dt)
                sigma7r=(sigma/pow(1-wt,2))*((j*j)/((j*j)+4.84))

```

```

b=dt*(pow(10,delKQe[ind]))*(pow(dar,delKQs[ind]))*(pow(ratio,delKQv[ind]))*(p
ow(sigma7r,delKQL[ind]))*(pow(KQsinCav,delKQu[ind]))

```

```

            KQCav=KQCav+b
            KQ=KQsinCav+KQCav
            listKQ.append(KQ)

```

```

            resultados.append(listKT)
            resultados.append(listKQ)

```

```

print(resultados)

```

```

print(len(resultados))

#Escritura de datos
wb=openpyxl.Workbook()
hoja=wb.create_sheet("Resultados")
hoja['A1']='J'
hoja.append(J)
hoja['A3']='KT'
hoja['B3']='DAR 0.3'
hoja['C3']='P/D 0.6'
hoja.append(resultados[0])

hoja['A5']='KQ'
hoja['B5']='DAR 0.3'
hoja['C5']='P/D 0.6'
hoja.append(resultados[1])

hoja['A7']='KT'
hoja['B7']='DAR 0.3'
hoja['C7']='P/D 0.8'
hoja.append(resultados[2])

hoja['A9']='KQ'
hoja['B9']='DAR 0.3'
hoja['C9']='P/D 0.8'
hoja.append(resultados[3])

hoja['A11']='KT'
hoja['B11']='DAR 0.3'
hoja['C11']='P/D 1.0'
hoja.append(resultados[4])

hoja['A13']='KQ'
hoja['B13']='DAR 0.3'
hoja['C13']='P/D 1.0'
hoja.append(resultados[5])

hoja['A15']='KT'
hoja['B15']='DAR 0.3'
hoja['C15']='P/D 1.2'
hoja.append(resultados[6])

hoja['A17']='KQ'
hoja['B17']='DAR 0.3'
hoja['C17']='P/D 1.2'
hoja.append(resultados[7])

hoja['A19']='KT'
hoja['B19']='DAR 0.5'
hoja['C19']='P/D 0.6'
hoja.append(resultados[8])

hoja['A21']='KQ'
hoja['B21']='DAR 0.5'
hoja['C21']='P/D 0.6'
hoja.append(resultados[9])

hoja['A23']='KT'

```



```
hoja['B23']='DAR 0.5'  
hoja['C23']='P/D 0.8'  
hoja.append(resultados[10])
```

```
hoja['A25']='KQ'  
hoja['B25']='DAR 0.5'  
hoja['C25']='P/D 0.8'  
hoja.append(resultados[11])
```

```
hoja['A27']='KT'  
hoja['B27']='DAR 0.5'  
hoja['C27']='P/D 1.0'  
hoja.append(resultados[12])
```

```
hoja['A29']='KQ'  
hoja['B29']='DAR 0.5'  
hoja['C29']='P/D 1.0'  
hoja.append(resultados[13])
```

```
hoja['A31']='KT'  
hoja['B31']='DAR 0.5'  
hoja['C31']='P/D 1.2'  
hoja.append(resultados[14])
```

```
hoja['A33']='KQ'  
hoja['B33']='DAR 0.5'  
hoja['C33']='P/D 1.2'  
hoja.append(resultados[15])
```

```
hoja['A35']='KT'  
hoja['B35']='DAR 0.7'  
hoja['C35']='P/D 0.6'  
hoja.append(resultados[16])
```

```
hoja['A37']='KQ'  
hoja['B37']='DAR 0.7'  
hoja['C37']='P/D 0.6'  
hoja.append(resultados[17])
```

```
hoja['A39']='KT'  
hoja['B39']='DAR 0.7'  
hoja['C39']='P/D 0.8'  
hoja.append(resultados[18])
```

```
hoja['A41']='KQ'  
hoja['B41']='DAR 0.7'  
hoja['C41']='P/D 0.8'  
hoja.append(resultados[19])
```

```
hoja['A43']='KT'  
hoja['B43']='DAR 0.7'  
hoja['C43']='P/D 1.0'  
hoja.append(resultados[20])
```

```
hoja['A45']='KQ'  
hoja['B45']='DAR 0.7'  
hoja['C45']='P/D 1.0'  
hoja.append(resultados[21])
```

```

hoja['A47']='KT'
hoja['B47']='DAR 0.7'
hoja['C47']='P/D 1.2'
hoja.append(resultados[22])

hoja['A49']='KQ'
hoja['B49']='DAR 0.7'
hoja['C49']='P/D 1.2'
hoja.append(resultados[23])

hoja['A51']='KT'
hoja['B51']='DAR 0.9'
hoja['C51']='P/D 0.6'
hoja.append(resultados[24])

hoja['A53']='KQ'
hoja['B53']='DAR 0.9'
hoja['C53']='P/D 0.6'
hoja.append(resultados[25])

hoja['A55']='KT'
hoja['B55']='DAR 0.9'
hoja['C55']='P/D 0.8'
hoja.append(resultados[26])

hoja['A57']='KQ'
hoja['B57']='DAR 0.9'
hoja['C57']='P/D 0.8'
hoja.append(resultados[27])

hoja['A59']='KT'
hoja['B59']='DAR 0.9'
hoja['C59']='P/D 1.0'
hoja.append(resultados[28])

hoja['A61']='KQ'
hoja['B61']='DAR 0.9'
hoja['C61']='P/D 1.0'
hoja.append(resultados[29])

hoja['A63']='KT'
hoja['B63']='DAR 0.9'
hoja['C63']='P/D 1.2'
hoja.append(resultados[30])

hoja['A65']='KQ'
hoja['B65']='DAR 0.9'
hoja['C65']='P/D 1.2'
hoja.append(resultados[31])

wb.save('Coeficientes_Kt_Kq.xlsx')

```

Valores de los coeficientes obtenidos a partir del programa.

Tabla C.5 Coeficientes para DAR = 0.3

J	DAR									0.3					
	P/D			0.6	P/D			0.8	P/D			1	P/D		1.2
	KT	KQ	Eff	KT	KQ	Eff	KT	KQ	Eff	KT	KQ	Eff			
0	0.429191	0.091251	0	0.543438	0.188078	0	0.585312	0.323258	0	0.505019	0.499329	0			
0.5	0.196516	0.072123	0.216828	0.346973	0.152863	0.180627	0.521979	0.273896	0.151655	0.707005	0.440208	0.127807			
0.1	0.382251	0.094678	0.064257	0.507854	0.188339	0.042916	0.567743	0.319987	0.028238	0.513794	0.492252	0.016612			
0.15	0.356247	0.093849	0.090622	0.493241	0.185939	0.063329	0.573284	0.316018	0.043308	0.55015	0.486811	0.026979			
0.2	0.328259	0.091553	0.114128	0.478082	0.182065	0.083585	0.582575	0.310689	0.059686	0.598108	0.480279	0.03964			
0.25	0.298497	0.088074	0.13485	0.46029	0.176989	0.103477	0.590374	0.304257	0.077205	0.648397	0.472896	0.054555			
0.3	0.267929	0.083818	0.152625	0.438547	0.171114	0.122369	0.592019	0.297104	0.095141	0.691927	0.465018	0.071045			
0.35	0.238585	0.079339	0.167511	0.412999	0.164996	0.139433	0.584539	0.289762	0.112373	0.721368	0.45714	0.087901			
0.4	0.213734	0.075346	0.180591	0.385805	0.159351	0.154133	0.567643	0.282912	0.127733	0.732603	0.449892	0.103667			
0.45	0.197873	0.072661	0.195039	0.36148	0.155018	0.167007	0.544456	0.277354	0.140592	0.725937	0.444007	0.117096			
0.5	0.196516	0.072123	0.216828	0.346973	0.152863	0.180627	0.521979	0.273896	0.151655	0.707005	0.440208	0.127807			
0.55	0.215782	0.074395	0.253895	0.351495	0.153584	0.200335	0.511259	0.273172	0.163828	0.687402	0.43902	0.13706			
0.6	0.261832	0.079658	0.313881	0.386161	0.157407	0.234269	0.527376	0.275329	0.182911	0.68515	0.440459	0.148543			
0.65	0.340212	0.08717	0.403753	0.463524	0.163648	0.29302	0.589346	0.279589	0.218064	0.725146	0.443597	0.16911			
0.7	0.45521	0.094685	0.535612	0.597144	0.170124	0.39105	0.72011	0.283664	0.282821	0.839785	0.445973	0.209787			
0.75	0.609298	0.097725	0.744229	0.801283	0.172434	0.554681	0.946737	0.283036	0.399272	1.069926	0.442873	0.288374			
0.8	0.802767	0.088738	1.151839	1.090856	0.163108	0.851533	1.300978	0.270104	0.613265	1.466322	0.426489	0.437756			
0.85	1.033606	0.056157	2.489968	1.48171	0.130666	1.534046	1.820238	0.233254	1.055693	2.091606	0.38498	0.734989			
0.9	1.297672	-0.01658	-11.2097	1.991259	0.058638	4.864235	2.548994	0.155871	2.342424	3.022782	0.301499	1.436097			
0.95	1.589162	-0.15201	-1.58065	2.639473	-0.07542	-5.29162	3.540598	0.015369	34.83102	4.354158	0.15322	4.29667			
1	1.901371	-0.37954	-0.79732	3.45017	-0.30081	-1.82544	4.859378	-0.21771	-3.55239	6.200525	-0.08956	-11.0194			
1.05	2.227679	-0.73621	-0.50566	4.452516	-0.6545	-1.13685	6.582879	-0.58047	-1.89515	8.700367	-0.46417	-3.13236			
1.1	2.562705	-1.2673	-0.35402	5.68263	-1.18168	-0.8419	8.804078	-1.11825	-1.37834	12.01885	-1.01618	-2.07064			
1.15	2.903546	-2.02668	-0.26222	7.185149	-1.93613	-0.67923	11.63337	-1.88496	-1.12959	16.35031	-1.79971	-1.6628			
1.2	3.251006	-3.07686	-0.2018	9.014647	-2.98028	-0.57769	15.20018	-2.94315	-0.98636	21.92004	-2.87754	-1.45486			
1.25	3.610752	-4.48882	-0.16003	11.23678	-4.38506	-0.5098	19.65396	-4.36387	-0.896	28.98514	-4.32087	-1.33455			
1.3	3.994289	-6.34148	-0.13032	13.92904	-6.22934	-0.46264	25.16463	-6.22609	-0.83625	37.83433	-6.20883	-1.26078			
1.35	4.419733	-8.72097	-0.10889	17.18113	-8.59921	-0.42929	31.9222	-8.61598	-0.79605	48.78661	-8.62774	-1.21495			
1.4	4.912305	-11.7196	-0.09339	21.09479	-11.5869	-0.40565	40.13561	-11.6259	-0.76922	62.18881	-11.67	-1.18738			
1.45	5.504554	-15.4345	-0.0823	25.78324	-15.2897	-0.38916	50.03097	-15.353	-0.75203	78.41213	-15.433	-1.17252			
1.5	6.236283	-19.9665	-0.07456	31.37006	-19.8082	-0.37808	61.84898	-19.8982	-0.74205	97.84765	-20.0176	-1.16695			

Tabla C.6 Coeficientes para DAR = 0.5

DAR						0.5					
P/D		0.6	P/D		0.8	P/D		1	P/D		1.2
KT	KQ	Eff	KT	KQ	Eff	KT	KQ	Eff	KT	KQ	Eff
0.410789	0.161467	0	0.142668	0.278193	0	-0.68561	0.404913	0	-2.30089	0.528204	0
0.321123	0.119792	0.213322	0.593107	0.237123	0.199044	0.841317	0.394288	0.169799	0.998685	0.589154	0.134893
0.395035	0.163718	0.038402	0.179381	0.277819	0.010276	-0.56461	0.402668	-0.02232	-2.05676	0.525207	-0.06233
0.400796	0.161649	0.059192	0.244677	0.275091	0.021234	-0.4009	0.400587	-0.02389	-1.74734	0.525497	-0.07938
0.409358	0.157686	0.082634	0.32787	0.270874	0.038529	-0.19111	0.398041	-0.01528	-1.34731	0.527131	-0.08136
0.415181	0.152122	0.108594	0.416125	0.265429	0.062379	0.042152	0.395263	0.004243	-0.89166	0.530333	-0.0669
0.413517	0.14537	0.135819	0.496701	0.259126	0.091522	0.275058	0.392596	0.033452	-0.41844	0.535471	-0.03731
0.401561	0.137996	0.162096	0.558922	0.252474	0.123317	0.485513	0.390518	0.069255	0.035159	0.543095	0.003606
0.379347	0.130717	0.18475	0.595901	0.246107	0.154145	0.655832	0.389639	0.107155	0.43667	0.553951	0.050184
0.35026	0.124367	0.201705	0.605868	0.240753	0.180235	0.775113	0.390664	0.1421	0.761942	0.568965	0.095911
0.321123	0.119792	0.213322	0.593107	0.237123	0.199044	0.841317	0.394288	0.169799	0.998685	0.589154	0.134893
0.301952	0.11766	0.224642	0.568631	0.235717	0.211166	0.863298	0.401003	0.18845	1.150286	0.615439	0.163608
0.305523	0.118157	0.246919	0.550878	0.236516	0.222416	0.863202	0.410791	0.200661	1.240481	0.648354	0.182705
0.346998	0.120544	0.297793	0.56676	0.238544	0.24579	0.879694	0.422683	0.215303	1.319522	0.6876	0.198524
0.44386	0.122572	0.403435	0.653447	0.23928	0.304244	0.97252	0.434178	0.249545	1.472449	0.731467	0.224266
0.616416	0.119761	0.614385	0.861188	0.233943	0.43941	1.228768	0.440521	0.332955	1.829908	0.776096	0.281446
0.889048	0.104553	1.082681	1.257393	0.214644	0.745868	1.77104	0.433858	0.519745	2.581679	0.814631	0.403507
1.292328	0.065373	2.67434	1.932021	0.16946	1.542356	2.767482	0.402308	0.930605	3.992733	0.83626	0.645904
1.865997	-0.01435	-18.6234	3.004156	0.08145	5.283176	4.443392	0.328977	1.934692	6.421263	0.825221	1.114584
2.66269	-0.15716	-2.56158	4.629502	-0.0723	-9.68093	7.093832	0.190998	5.615607	10.33783	0.759808	2.057166
3.752225	-0.39248	-1.52156	7.008334	-0.32159	-3.46838	11.09653	-0.04137	-42.6883	16.34442	0.611449	4.254312
5.226145	-0.75737	-1.15315	10.3934	-0.70386	-2.46765	16.92417	-0.40551	-6.97453	25.19226	0.34392	12.24107
7.202211	-1.29711	-0.97208	15.09716	-1.26473	-2.08982	25.15517	-0.94702	-4.65031	37.7968	-0.08727	-75.8257
9.828488	-2.06557	-0.87089	21.49784	-2.05844	-1.9115	36.48206	-1.72006	-3.88199	55.24891	-0.73523	-13.7538
13.28671	-3.12528	-0.81195	30.04369	-3.14781	-1.82283	51.71673	-2.78743	-3.54347	78.82112	-1.66179	-9.05873
17.79467	-4.54722	-0.77853	41.25514	-4.60411	-1.78264	71.79196	-4.22036	-3.3842	109.968	-2.93734	-7.44804
23.60733	-6.41032	-0.76196	55.72458	-6.50653	-1.77199	97.75886	-6.09803	-3.31688	150.3208	-4.6403	-6.7025
31.01674	-8.80071	-0.75724	74.11348	-8.94142	-1.78092	130.7802	-8.50676	-3.30318	201.6753	-6.85637	-6.31994
40.35045	-11.8107	-0.76124	97.14713	-12.0012	-1.80365	172.1199	-11.539	-3.32362	265.9745	-9.67753	-6.12384
51.96865	-15.5374	-0.77188	125.6069	-15.7833	-1.83655	223.1281	-15.2921	-3.36725	345.2854	-13.2008	-6.03624
66.26015	-20.0817	-0.78771	160.3207	-20.3885	-1.87722	285.2245	-19.8669	-3.42742	441.7717	-17.5268	-6.01737

Tabla C.7 Coeficientes para DAR = 0.7

DAR						0.7					
P/D		0.6	P/D		0.8	P/D		1	P/D		1.2
KT	KQ	Eff	KT	KQ	Eff	KT	KQ	Eff	KT	KQ	Eff
-0.08813	0.221775	0	-1.68474	0.299541	0	-5.08144	0.299193	0	-10.8974	0.172169	0
0.498086	0.180731	0.219312	0.779188	0.326161	0.190108	0.816917	0.490457	0.132546	0.428021	0.655921	0.051928
-0.0354	0.223898	-0.00252	-1.49191	0.301402	-0.07878	-4.66389	0.303915	-0.24424	-10.1518	0.18382	-0.87896
0.046331	0.221889	0.004985	-1.24652	0.301889	-0.09857	-4.15205	0.311059	-0.31866	-9.24782	0.202908	-1.08806
0.149232	0.218064	0.021783	-0.93209	0.302272	-0.09815	-3.48749	0.321554	-0.34523	-8.06279	0.231004	-1.111
0.258313	0.2127	0.048321	-0.57886	0.302799	-0.07606	-2.72082	0.335684	-0.3225	-6.67298	0.268534	-0.98874
0.358777	0.206188	0.083081	-0.2189	0.303849	-0.0344	-1.90768	0.353958	-0.25733	-5.16414	0.316389	-0.77932
0.438246	0.19905	0.122643	0.117561	0.305955	0.021404	-1.10341	0.377192	-0.16295	-3.62426	0.376127	-0.53675
0.488595	0.191937	0.162058	0.40548	0.309816	0.083319	-0.35783	0.406576	-0.05603	-2.13613	0.45017	-0.30209
0.507264	0.185591	0.195754	0.627985	0.316262	0.142212	0.289912	0.443689	0.046797	-0.7695	0.541941	-0.10169
0.498086	0.180731	0.219312	0.779188	0.326161	0.190108	0.816917	0.490457	0.132546	0.428021	0.655921	0.051928
0.471923	0.177865	0.232254	0.867371	0.340231	0.223159	1.223341	0.548993	0.195058	1.442508	0.797576	0.158318
0.447555	0.176982	0.241485	0.919273	0.358731	0.244707	1.541608	0.621316	0.236937	2.309339	0.973122	0.226617
0.453366	0.177104	0.264822	0.986364	0.381029	0.267801	1.849247	0.708921	0.269855	3.134613	1.189105	0.272708
0.53039	0.175711	0.33629	1.153893	0.405013	0.317406	2.286443	0.812179	0.313637	4.123704	1.451778	0.31645
0.73719	0.168018	0.523726	1.553303	0.426368	0.434864	3.078998	0.929591	0.395366	5.617767	1.76629	0.37965
1.156841	0.146132	1.007948	2.378262	0.437724	0.691783	4.566833	1.05689	0.550168	8.138145	2.135692	0.485173
1.90606	0.09812	2.627955	3.904118	0.427718	1.234821	7.237481	1.186052	0.825511	12.43764	2.559817	0.657307
3.146255	0.007035	64.06362	6.510102	0.380005	2.453924	11.76332	1.304238	1.291921	19.55664	3.034079	0.923273
5.095984	-0.15005	-5.13491	10.70323	0.272277	5.94358	19.04068	1.392746	2.067066	30.88114	3.54825	1.3159
8.044109	-0.40294	-3.1773	17.14244	0.075357	36.20503	30.2284	1.426027	3.373708	48.1993	4.085306	1.877744
12.36277	-0.78907	-2.61824	26.66142	-0.24758	-17.9963	46.78339	1.370833	5.703175	73.75247	4.620393	2.667516
18.51924	-1.3541	-2.39434	40.28835	-0.74159	-9.5111	70.49035	1.185547	10.40935	110.2771	5.119991	3.770762
27.0858	-2.15223	-2.30341	59.26106	-1.46032	-7.42743	103.4835	0.819766	23.10464	161.0343	5.541329	5.318907
38.74668	-3.24631	-2.27953	85.03633	-2.46612	-6.58555	148.2581	0.214145	132.2244	229.8232	5.832091	7.526117
54.30168	-4.7076	-2.29479	119.2922	-3.82979	-6.1968	207.6706	-0.69945	-59.0674	320.9785	5.930439	10.76761
74.66574	-6.61529	-2.33526	163.9229	-5.63012	-6.02401	284.9264	-1.9975	-29.5127	439.3485	5.765357	15.7669
100.8646	-9.0557	-2.39315	221.0261	-7.95313	-5.97117	383.5556	-3.7641	-21.8938	590.256	5.257312	24.12296
134.0263	-12.1213	-2.46371	292.883	-10.891	-5.99202	507.3774	-6.08993	-18.5638	779.4425	4.319196	40.20956
175.3692	-15.9094	-2.54383	381.9317	-14.541	-6.06149	660.4534	-9.07109	-16.8024	1012.997	2.857519	81.81013
226.1863	-20.5207	-2.63139	490.735	-19.0037	-6.16481	847.0332	-12.8076	-15.7886	1297.272	0.773796	400.2356

Tabla C.7 Coeficientes para DAR = 0.9

DAR						0.9					
P/D		0.6	P/D		0.8	P/D		1	P/D		1.2
KT	KQ	Eff	KT	KQ	Eff	KT	KQ	Eff	KT	KQ	Eff
-1.45408	0.237792	0	-5.85493	0.170624	0	-14.3915	-0.15307	0	-28.3763	-0.84383	0
0.619662	0.239873	0.205572	0.646543	0.384273	0.13389	-0.06027	0.492675	-0.00973	-1.88899	0.520024	-0.28907
-1.28409	0.241392	-0.08466	-5.39498	0.178905	-0.47994	-13.4663	-0.13288	1.612948	-26.7714	-0.80252	0.530926
-1.06791	0.241438	-0.10559	-4.8355	0.187799	-0.61469	-12.3503	-0.10595	2.782729	-24.8373	-0.74601	0.794818
-0.79303	0.240537	-0.10494	-4.10988	0.200051	-0.65394	-10.8848	-0.06761	5.12451	-22.2755	-0.66529	1.065769
-0.4877	0.238962	-0.08121	-3.27274	0.215982	-0.60291	-9.15958	-0.01729	21.07852	-19.2202	-0.55927	1.367389
-0.18123	0.237112	-0.03649	-2.38367	0.236163	-0.48192	-7.27534	0.046192	-7.52012	-15.8246	-0.4255	1.775708
0.099599	0.23553	0.023556	-1.50149	0.261514	-0.31983	-5.33543	0.124931	-2.37896	-12.2497	-0.25951	2.629428
0.333593	0.234915	0.090404	-0.67858	0.293379	-0.14725	-3.43688	0.222208	-0.98466	-8.65121	-0.05414	10.17207
0.507764	0.236085	0.154038	0.044734	0.333559	0.009605	-1.66074	0.342715	-0.34706	-5.16522	0.200999	-1.84046
0.619662	0.239873	0.205572	0.646543	0.384273	0.13389	-0.06027	0.492675	-0.00973	-1.88899	0.520024	-0.28907
0.680176	0.246942	0.241107	1.131655	0.448012	0.22111	1.355174	0.679821	0.174495	1.144952	0.920947	0.108827
0.717735	0.257479	0.266191	1.543501	0.527263	0.279544	2.642814	0.913191	0.276361	4.005465	1.425639	0.268296
0.784974	0.270752	0.299928	1.981329	0.624077	0.328437	3.958338	1.202719	0.340473	6.91351	2.059439	0.347283
0.968884	0.284529	0.37937	2.624173	0.739466	0.39536	5.598914	1.558592	0.400211	10.30948	2.850445	0.402942
1.405168	0.294355	0.569821	3.762518	0.872654	0.514657	8.058472	1.990397	0.483275	14.93838	3.828459	0.465759
2.297144	0.292701	0.999248	5.83779	1.020167	0.728597	12.09502	2.506063	0.614504	21.95224	5.023637	0.556379
3.938956	0.268032	1.988076	9.488881	1.174826	1.092649	18.80834	3.110658	0.81797	33.02688	6.464906	0.691106
6.742335	0.203817	4.738399	15.6039	1.324681	1.68727	29.7249	3.805084	1.118971	50.48812	8.178196	0.884289
11.2656	0.07756	21.96134	25.37453	1.451942	2.642364	46.8856	4.584751	1.546206	77.44089	10.18462	1.149659
18.24315	-0.14011	-20.7234	40.34975	1.531976	4.191881	72.93092	5.438303	2.134364	117.8932	12.49866	1.501223
28.61361	-0.48619	-9.83494	62.48525	1.532438	6.814031	111.1779	6.346467	2.927492	176.8666	15.1265	1.953966
43.54439	-1.00594	-7.5783	94.18497	1.412583	11.67294	165.6829	7.281105	3.983761	260.4854	18.06452	2.524467
64.45095	-1.75317	-6.72857	138.3314	1.122831	22.54886	241.286	8.204524	5.382656	376.0361	21.29819	3.231505
93.00902	-2.79036	-6.36599	198.3022	0.604598	62.64154	343.631	9.069084	7.236529	531.9932	24.80117	4.09671
131.1586	-4.18846	-6.22978	277.9705	-0.20957	-263.88	479.1613	9.817144	9.710168	738.0061	28.53493	5.145331
181.0992	-6.02636	-6.21763	381.689	-1.39554	-56.5887	655.0871	10.38133	13.05598	1004.846	32.44868	6.407166
245.2754	-8.39016	-6.28112	514.2568	-3.03692	-36.3832	879.3267	10.68517	17.68165	1344.315	36.47979	7.917763
326.3545	-11.3721	-6.39434	680.8707	-5.22399	-29.041	1160.422	10.64395	24.2919	1769.115	40.55449	9.719979
427.1953	-15.0695	-6.54209	887.0621	-8.05253	-25.422	1507.434	10.16593	34.21993	2292.691	44.58896	11.86605
550.8109	-19.5829	-6.71486	1138.622	-11.6224	-23.3881	1929.815	9.153737	50.33019	2929.043	48.49074	14.42043

APÉNDICE B

DATOS DE ENTRADA DEL PROGRAMA SAVITSKY64FLAPS

```
Villamarin optimizada Intercep 100% carga
8.31 VOL m3
2.72 BM Chine beam at transom m
22.00 BETA
5.58 mov a Popa ?? referencia LCG desde el espejo
0.79 VCG
4.00 EPSILON, degrees, angulo empuje/quilla
0.635 f, m, dist. empuje/CG en x,
0.0 0.0 0.0 FLAPCH, FLAPSPRATIO,FLAPANGLE x,y/mchina, angulo de flap(rango
1 60 1.0 V0, VF, dvel kntos
1025.0 RHO
1.020E-6 VISCOS
```

Figura D. 1 Datos de entrada para el programa Savitsky64conflaps

```
Melendez optimizada Intercep 100% carga
8.79 VOL m3
2.84 BM Chine beam at transom m
30.00 BETA
4.211 mov a Popa ?? referencia LCG desde el espejo
0.8 VCG
4.00 EPSILON, degrees, angulo empuje/quilla
0.73 f, m, dist. empuje/CG en x,
0.21 0.40 10.57 FLAPCH, FLAPSPRATIO,FLAPANGLE x,y/mchina, angulo de flap(ran
1 60 1.0 V0, VF, dvel kntos
1025.0 RHO
1.020E-6 VISCOS
```

Figura D. 2 Datos de entrada para el programa Savitsky64conflaps

Tabla D.1 Datos de ingreso para el programa Savitsky64flaps

Datos de entrada de programa Savitsky64flaps	
beta	Ángulo de astilla muerta en grados.
b	Manga de la china en [m]
V	Volumen en [m3]
LCG	Posición del centro de gravedad longitudinal desde el espejo en [m]
VCG	Posición del centro de gravedad vertical desde la línea base en [m]
V	Velocidad en [nudos]
ε	Inclinación del eje de propulsión respecto a la horizontal en grados
ρ	Densidad [kg/m3]
ν	Viscosidad [m2/s]
f	Distancia del eje propulsor al centro de gravedad en [m]
LF	Longitud de la cuerda del flap en [m]

Datos de entrada de programa Savitsky64flaps	
σ	Razón de aspecto (Ancho de flap/manga de la china)
δ	Angulo del flap en grados

Para el cálculo de f se utilizó la siguiente ecuación (Marín, 2020):

$$f = (KG + 0.66 * D_{prop} - LCG * \tan \varepsilon) * \cos \varepsilon \quad (D.1)$$

Donde:

KG : Centro de gravedad vertical de la embarcación [m]

D_{prop} : Diámetro de la hélice (Apéndice C) [m]

LCG : Distancia al centro de gravedad en el eje x [m]

ε : Ángulo formado entre el eje de propulsión y la horizontal

Asumimos un épsilon de 4 grados en base a publicaciones especializadas (Candon, 1967), para el cálculo del VCG del casco utilizamos (Marín, 2020).

$$Z_{casco} = 0.01 * D * \left(46.6 + 0.135 * \frac{0.81 - Cb}{\left(\frac{L}{D}\right)^2} \right) \quad (D.2)$$

Donde:

D : Puntal de la embarcación [m]

Cb : Coeficiente de bloque

L : Eslora de la embarcación [m]

De acuerdo a los datos de las lanchas optimizadas (Villamarín, 2020) (Meléndez, 2021) se obtuvieron los valores de LCG y se corroboraron realizando una estimación de pesos para encontrar el KG de la embarcación de acuerdo con la Tabla D.2 y Tabla D.3.

Tabla D.2 Estimación de pesos Lancha optimizada (Villamarín, 2020)

Componentes	Peso[ton]	x[m]	y[m]	z[m]	Cantidad	Peso total[ton]	Momento x	Momento z
Motores	0.36	0.30	0.00	1.55	2.00	0.71	0.21	1.10
Pasajeros	0.08	6.78	0.00	0.48	24.00	1.80	12.20	0.86
Equipaje	0.00	6.78	0.00	0.48	24.00	0.10	0.65	0.05
Peso del combustible	0.70	1.20	0.00	0.28	1.00	0.70	0.84	0.19
Caseta	0.60	6.84	0.00	1.77	1.00	0.60	4.10	1.06
Tanque de agua	0.29	10.00	0.00	0.24	1.00	0.29	2.90	0.07
Equipo de navegación	0.01	10.21	0.00	1.76	1.00	0.01	0.05	0.01
Peso del casco	4.32	6.16	0.00	0.79	1.00	4.32	26.61	3.39
					TOTAL	8.52	47.57	6.74
						LCG	5.58	m
						KG	0.79	m

Tabla D.3 Estimación de pesos lancha optimizada (Meléndez, 2021)

Componentes	Peso[ton]	x[m]	y[m]	z[m]	Cantidad	Peso total[ton]	Momento x	Momento z
Motores	0.36	0.10	0.00	1.55	2.00	0.72	0.07	1.12
Pasajeros	0.08	5.50	0.00	0.48	24.00	1.80	9.90	0.86
Equipaje	0.00	5.50	0.00	0.48	24.00	0.10	0.53	0.05
Peso del combustible	0.70	1.15	0.00	0.28	1.00	0.70	0.80	0.19
Caseta	0.60	5.50	0.00	1.77	1.00	0.60	3.30	1.06
Tanque de agua	0.29	6.50	0.00	0.24	1.00	0.29	1.89	0.07
Equipo de navegación	0.01	10.21	0.00	1.76	1.00	0.01	0.05	0.01
Peso del casco	4.80	5.50	0.00	0.80	1.00	4.80	26.40	3.86
					TOTAL	9.01	42.94	7.22
						LCG	4.767009	m

Componentes	Peso[ton]	x[m]	y[m]	z[m]	Cantidad	Peso total[ton]	Momento x	Momento z
						KG	0.801362	m

APÉNDICE C

BASE DE DATOS DE COMPONENTES DEL SISTEMA PROPULSOR

A continuación, se muestran las tablas en donde se implementó información de base de datos para obtener las ecuaciones de cada uno de los componentes del sistema de propulsión propuesto.

Tabla E. 1 Base de datos de motores eléctricos

(Motors, 2020)(Siemens, 2021)(Cemer, 2020)

Para el motor eléctrico											
Modelo	Unidades	Siemens	Weg	Siemens	Weg	OME	Siemens	Cemer	Siemens	Cemer	Cemer
Potencia	Kw	15.00	22.00	30.00	55.00	75.00	110.00	160.00	185.00	200.00	315.00
Volumen	m3	0.09	0.10	0.12	0.31	0.37	0.39	0.52	0.68	0.71	1.12
Masa	kg	145.00	164.00	260.00	413.00	470.00	940.00	1110.00	1140.00	1190.00	1850.00
Potencia específica	Kw/kg	0.10	0.13	0.12	0.13	0.16	0.12	0.14	0.16	0.17	0.17
Densidad de potencia	kW/m3	172.41	220.00	258.40	177.42	202.70	280.54	308.05	272.46	281.69	281.25

Tabla E. 2 Base de datos de Thruster azimuthal
(Marine, 2020)

Thruster azimuthal								
Modelo	Unidades	SJMATEK	SJMATEK	SJMATEK	SJMATEK	SJMATEK	SJMATEK	SJMATEK
Potencia	Kw	15.00	50.00	80.00	100.00	160.00	200.00	300.00
Masa	kg	40.00	65.00	115.00	190.00	520.00	840.00	1370.00
Potencia específica	Kw/kg	0.38	0.77	0.70	0.53	0.31	0.24	0.22

Tabla E. 3 Base de datos de motores intraborda
(Ac Magnets, 2020)(Krautler, 2018)

MOTORES INTRABORDA						
Modelo	Unidades	ELCO	Torqueado	ELCO	ELCO	ELCO
Potencia	Kw	14.70	30.00	30.00	51.50	73.50
Volumen	m3	0.10	0.13	0.17	0.20	0.20
Masa	kg	118.00	139.00	182.00	295.00	336.00
Potencia específica	Kw/kg	0.12	0.22	0.16	0.17	0.22
Densidad de potencia	kW/m3	147.00	230.77	176.47	257.50	365.67

Tabla E. 4 Base de datos para servomotor

(Teschler, 2004)(RDM, 2020)

Para el servomotor							
Modelo	Unidades	RDM	Siemens	GSK	KYMOTOR	KY MOTOR	KYMOTOR
Potencia	Kw	0.22	2.29	3.90	6.00	10.00	16.00
Volumen	m3	1.02E-05	6.40E-05	1.02E-04	2.03E-04	3.36E-04	6.00E-04
Masa	kg	1.90	11.50	15.00	26.00	30.00	90.00
Potencia específica	Kw/kg	0.12	0.20	0.26	0.23	0.33	0.18
Densidad de potencia	kW/m3	21526.42	35781.25	38423.65	29556.65	29761.90	26666.67

APÉNDICE D

ECUACIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LA HÉLICE

La selección y dimensionamiento de la hélice se realizó en base a las hélices de la serie Gawn Burril. Los factores clave para seleccionar la hélice adecuada son el torque y el empuje. Estos valores pueden ser calculados empleando los polinomios específicos para cada tipo de hélice.

En la Ilustración F.1, se presentan las series de hélices existentes con sus principales características.

<i>Series</i>	<i>Number of propellers in series</i>	<i>Range of parameters</i>			<i>D (mm)</i>	<i>r_h/R</i>	<i>Cavitation data available</i>	<i>Notes</i>
		<i>Z</i>	<i>A_E/A_O</i>	<i>P/D</i>				
Wageningen B-series	≈120	2–7	0.3–1.05	0.6–1.4	250	0.169	No	Four-bladed propeller has non-constant pitch dist
Au-series	34	4–7	0.4–0.758	0.5–1.2	250	0.180	No	
Gawn-series	37	3	0.2–1.1	0.4–2.0	508	0.200	No	
KCA-series	≈30	3	0.5–1.25	0.6–2.0	406	0.200	Yes	
Ma-series	32	3 and 5	0.75–1.20	1.0–1.45	250	0.190	Yes	
Newton–Rader series	12	3	0.5–1.0	1.05–2.08	254	0.167	Yes	
KCD-series	24	3–6 (mainly 4)	0.587 Principal 0.44–0.8	0.6–1.6	406	0.200	Yes	Propellers not geosyms
Meridian series	20	6	0.45–1.05	0.4–1.2	305	0.185	Yes	Propellers not geosyms

Figura F.1 Resumen de la serie de hélices de paso fijo

(Carlton, 2007)

Se emplearon las hélices de la serie Gawn Burril, las cuales son de cara plana y con sección segmentaria simple de fabricar, fácil de reparar y presenta respetables características de cavitación y aguas abiertas. (Radojic et al., 2009)

La figura F.2 muestra el desarrollo de las aspas para cada relación de área desarrollada.

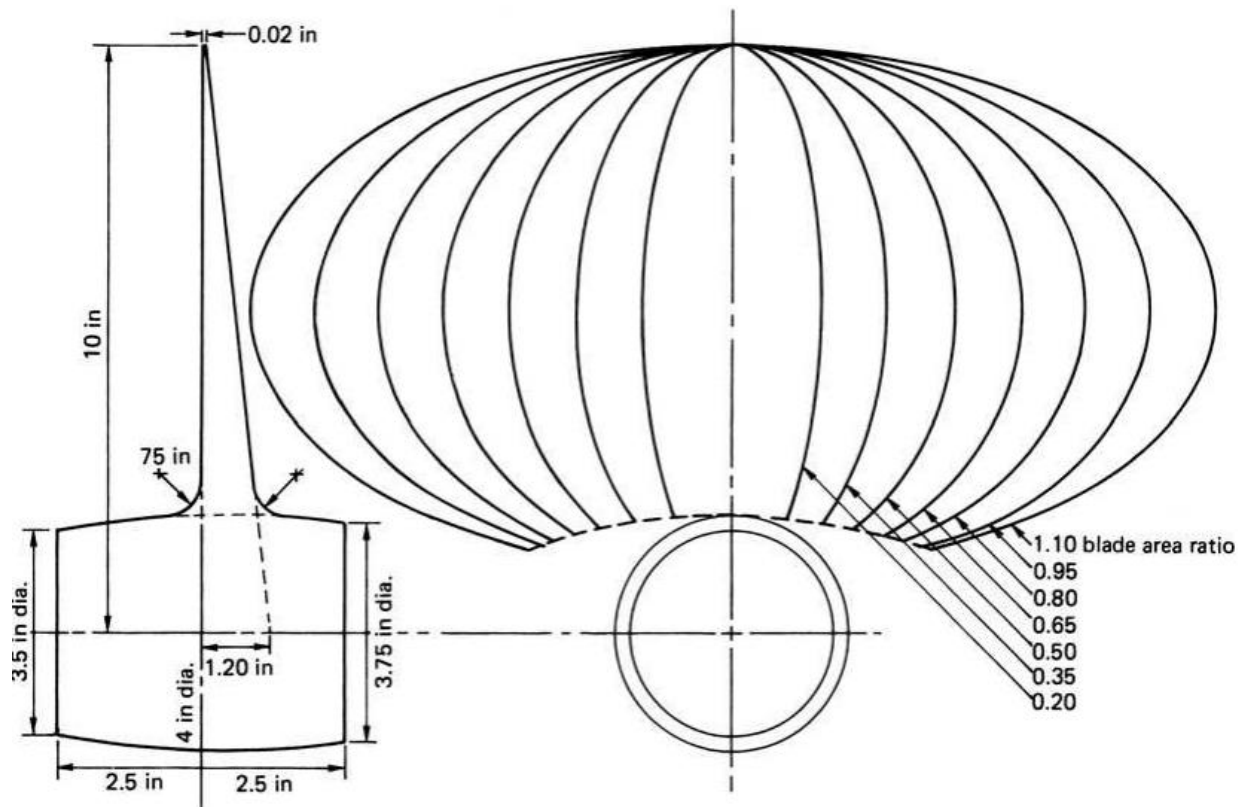


Figura F. 2 Contorno de las aspas de las series Gawn

(Carlton, 2007)

Para el desarrollo de los coeficientes de empuje y torque se trabajaron con las siguientes ecuaciones que corresponden a las series seleccionadas.

$$K_T = \sum_1^{16} (C_T x 10^e x (DAR)^x x \left(\frac{P}{D}\right)^y x J^z) \quad (F.1)$$

$$K_Q = \sum_1^{17} (C_Q x 10^e x (DAR)^x x \left(\frac{P}{D}\right)^y x J^z) \quad (F.1)$$

$$\eta_0 = \frac{K_T * J}{K_Q * 2 * \pi} \quad (F.2)$$

$$J = \frac{V_A}{n D} \quad (F.3)$$

Donde:

J: Razón de avance

V_A : Velocidad de avance [m/s]

Donde:

DAR: Relación del área desarrollado de la hélice y del disco.

J: Coeficiente de avance

V_A : Velocidad de avance [m/s]

n: Revoluciones por segundo.

D: Diámetro de la hélice [m].

C_t, C_Q, e, x, y, z son coeficientes para condiciones no cavitantes los cuales se muestran en el apéndice C.

Adicional existe una corrección debido a los efectos de cavitación.

$$\sigma = \frac{Pa + Ph - Pv}{0.5 * \rho * V_A^2} \quad (F.4)$$

$$\sigma_{0.7R} = \frac{\sigma}{(1 - wt)^2} * \frac{J^2}{J^2 + 4.84} \quad (F.5)$$

$$\Delta K_T = \sum_1^{20} (d_T x 10^e x (DAR)^s x \left(\frac{P}{D}\right)^v x \sigma_{0.7R}^t x (K_T)^u) \quad (F.6)$$

$$\Delta K_Q = \sum_1^{18} (d_Q x 10^e x (DAR)^s x \left(\frac{P}{D}\right)^v x \sigma_{0.7R}^t x (K_Q)^u) \quad (F.7)$$

Donde:

Pa: Presión atmosférica (1atm).

Ph: Presión ocasionada por el cabezal de agua sobre la hélice.

Pv: Presión de vapor.

d_T, d_Q, e, s, v, t, u son coeficientes para condiciones cavitantes los cuales se muestran en el apéndice C.

Una estimación del factor de deducción de empuje se puede obtener del trabajo de Holtrop y Harvald, en donde se emplea la siguiente regresión para barcos de una sola hélice.(Carlton, 2007)

$$t = \frac{0.25014 \left(\frac{B}{L}\right)^{0.28956} \left(\sqrt{\frac{B}{T}} D\right)^{0.2624}}{(1 - C_p + 0.0225 lcb)^{0.01762}} + 0.0015 C_{stern} \quad (F.9)$$

Donde:

B: Manga de la embarcación. 3.44 [m]

L: Eslora total. 13.66 [m]

T: Calado de diseño. 0.54 [m]

D: Puntal de diseño 1.55 [m]

Cp: Coeficiente prismático. 0.83

lcb: centro longitudinal de boyantez. 6.24 [m] (desde popa)

Cstern: Parámetro de forma de popa dado em a tabla 3.10.

Tabla F. 1 Parámetro de forma de popa según Holtrop
(Carlton, 2007)

<i>Afterbody form</i>	C_{stern}
Pram with gondola	-25
V-shaped sections	-10
Normal section ship	0
U-shaped sections with Hogner stern	10

A partir del fator de deducción de empuje es posible calcular el empuje de diseño requerido.

$$T = \frac{R}{1 - t}$$

(F.10)

Donde R es la resistencia total igual a 9210 [N]

APÉNDICE E

COMPONENTES DE LOS SISTEMAS QUE VAN A SER COMPARADOS

Paneles solares

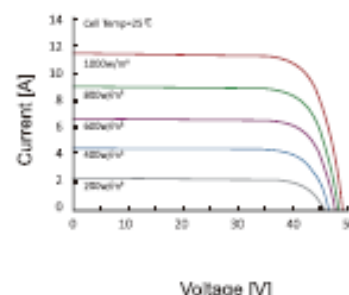
Para empezar con el dimensionamiento se va a escoger un panel solar que pueda suplir la necesidad energética que requiere la embarcación, por tal motivo, se escogió el panel monocristalino debido a su alto rendimiento de 20.12% y su facilidad para encontrarlo en el mercado, se muestra el número de paneles que se deben considerar para alcanzar una velocidad de 28 nudos.

MONOCRYSTALLINE, 144-CELL SERIES

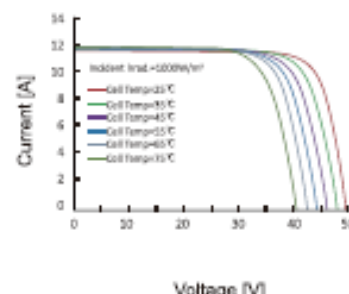
ELECTRICAL PERFORMANCE

Module type: ESPHSC	4s0M
Maximum Power(Wp)	4s0W
Open circuit Voltage(Voc)	49.3V
Short circuit Current(Isc)	11.60A
Maximum Power Voltage(Vm)	41.5V
Maximum Power Current(Imp)	10.8sA
Module efficiency	20.7%
Maximum Series Fuse	20A
Watts positive tolerance	0-+5%
Number of Diode	3
Standard Test Conditions	1000W/M ² , 25°C, AM1.5
Maximum System Voltage	1000/1s00 V/DC
Temperature-Coefficient Isc	+0.049%/°C
Temperature-Coefficient Voc	-0.271%/°C
Temperature-Coefficient Pmpp	-0.3s2%/°C
Normal Operating Cell Temperature	-40°C...+8s°C
Load Capacity for the cover of the module (glass)	5400Pa(IEC6121s)(snow)
Load Capacity for the front & back of the module	2400Pa(IEC6121s)(wind)
Product Certificate	TUV(IEC 6121s,IEC 61730),CE, ROHS,PID Resistant,INMETRO
Company Certificate	ISO9001,ISO14001,ISO18001

CURRENT-VOLTAGE CURVES:



Module characteristics at constant module temperatures of 25°C and variable levels of irradiance



Module characteristics at variable module temperatures and constant module irradiance of 1.000 W/m²

MODULE DIAGRAM:

Figura G.1 Características del panel solar seleccionado

(Caihong, 2008)

Tabla G.1 Características del panel solar seleccionado

Panel Solar Monocristalino 144- Cell series		
Descripción	Valor	Unidades
Área	2.17	m2
Volumen	0.08	m3
Potencia nominal del panel	0.45	kWp
Pérdidas del sistema Kt	0.72	
EPR	2172.87	kWh
Peso	24	kg
Eficiencia	0.9	
Número de paneles	272	
Peso total	6528	kg
Volumen total	21.76	m3

Banco de Baterías

Para dimensionar el banco de baterías se seleccionó la más eficiente que permita tener el mejor rendimiento posible, en este caso la batería Deep Blue de la empresa Torqueedo, es una batería de ion litio que permite gran cantidad de almacenamiento y es fácil de encontrar en el mercado, a continuación, se detalla en la Tabla G.2 el número de baterías que se debe usar para suplir la necesidad energética propuesta



Figura G. 2 Batería Deep Blue
(Torqueedo, 2020)

Tabla G. 2 Características de la batería Deep Blue

Deep Blue Battery-Torqueedo		
Descripción	Valor	Unidades
Área	1.60	m2
Volumen	0.28	m3
Voltaje	360.00	V
Capacidad de la batería	38.00	kWh
EPR	2172.87	kWh

Deep Blue Battery-Torqueedo		
Descripción	Valor	Unidades
Peso	260.00	kg
Número de baterías	57	
Peso total	14820	kg
Volumen total	15.96	m3

También se consideró las baterías solares típicas que se utilizan en una instalación fotovoltaica con máximo rendimiento (batería de Plomo-Acido de Master Volt, AGM de 12 V y 90 Ah de capacidad), dando como resultado el número de baterías a utilizar de acuerdo a la descripción de la Tabla G.3.



Figura G. 3 Batería AGM de 12 V
(Azimut, 2020)

Tabla G. 3 Características de las baterías solares de 12 V

Batería solar 12 V		
Descripción	Valor	Unidades
Área	0.06	m2
Volumen	0.01	m3
Voltaje	12.00	V
EPR	2172.87	kWh
Capacidad de la batería	90	Ah
Peso	37.6	kg
Número de baterías	855	

Batería solar 12 V		
Descripción	Valor	Unidades
Peso total	32148	kg
Volumen total	8.55	m ³
Capacidad Nominal	100.00	Ah

Finalmente se considera también el peso del motor principal eléctrico de acuerdo con el IHP de la embarcación a 28 nudos, se escogió un motor de 450 kW de potencia y las características del motor se detallan en la Tabla G.4.

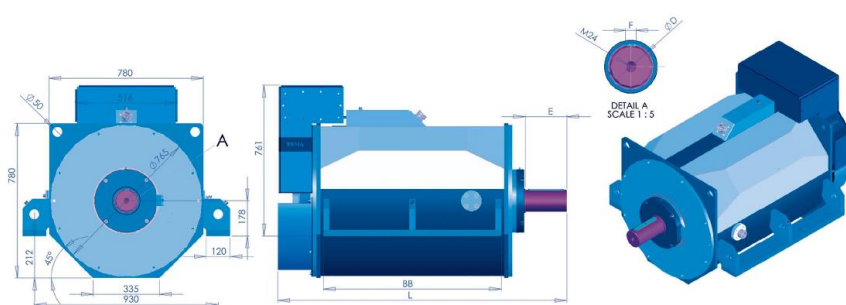


Figura G. 4 Motor eléctrico seleccionado
(TEMA, 2020)

Tabla G. 4 Características del motor seleccionado

Motor eléctrico LPMR550.6.11BW		
Descripción	Valor	Unidades
Potencia nominal	450.00	kW
Torque	3210.00	Nm
Eficiencia	0.97	
RPM máximo	4000.00	rev/min
Área	1.37	m ²
Volumen	1.07	m ³
Peso	931.00	kg

Componentes del sistema de Hidrógeno gaseoso para la embarcación seleccionada

Para el sistema a base de hidrógeno gaseoso se utilizó las ecuaciones especificadas en el capítulo 2, mediante lo cual se puede dimensionar el número de tanques de hidrógeno y celdas de combustible, así como su peso y volumen,

también se consideró el peso del motor para obtener el peso y volumen total del sistema tal como se muestra en la Tabla G.5.

Tabla G. 5 Sistema empleando hidrógeno gaseoso

Hidrógeno gaseoso		
Parámetros	Valor	Unidades
EPR	1564.47	kWh
Energía de h2	3476.60	kWh
Masa de h2	104.33	kg
Masa del tanque de h2	1869.64	kg
Volumen del tanque de h2	9.78	m3
Masa total de h2	1973.97	kg
Celda de combustible		
Potencia instalada	443.54	kW
Masa de la celda	3085.45	kg
Volumen de la celda	6.62	m3
Motor		
Peso del motor	931.00	kg
Volumen del motor	1.07	m3
Peso total del sistema	5990.42	kg
Volumen total del sistema	17.46	m3

Componentes del sistema Hidrógeno líquido para la embarcación seleccionada

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de acuerdo con las ecuaciones empleadas en el capítulo 2, el objetivo es obtener el peso y volumen total del sistema considerando los componentes que forman parte del hidrógeno líquido, en la Tabla G.6 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla G. 6 Celdas de combustibles empleando hidrógeno líquido

Hidrógeno líquido		
Parámetros	Valor	Unidades
EPR	1564.47	kWh
E h2	3476.60	kWh
Masa de h2	104.33	kg
Masa del tanque de h2	907.69	kg
Volumen del tanque de h2	2.59	m3
Masa total	1012.03	kg
Celda de combustible		
Potencia instalada	443.54	kW
Masa de la celda	3085.45	kg
Volumen de la celda	6.62	m3
Motor		
Peso del motor	931.00	kg
Volumen del motor	1.07	m3
Vaporizador		
Peso del vaporizador	100	kg
Volumen del vaporizador	0.192	m3
Voltaje	380	V
Peso total del sistema	5232.81	kg
Volumen total del sistema	10.47	m3

Script del programa para el numero de paneles y baterías desarrollado en Python

```
#####PARA EL PANEL SOLAR#####
import math
###ENERGIA DE LA BATERIA##
nd=0.85
fi=0.35 #hay que poner valor latitud en grados
n=180# peor mes numero de dia del ano
Vbatt=24
H=5.75
t=6.5
Ppv=450
Eload=2172.87 # considerando las perdidas
```



```

d=23.45*math.sin(360*((284+n)/365))
h=13## angulo de elevacion
W=360*(h-12)/24# ANGULO HORARIO SOLAR
Ws=math.degrees(math.acos(-math.tan(d)*math.tan(fi)))
a=0.4090+0.5016*math.sin(Ws-60)
b=0.6609-0.4767*math.sin(Ws-60)
fc=a+(0.5*b*((math.pi*Ws/180)-math.sin(Ws)*math.cos(Ws))/(math.sin(Ws)-
(math.pi*Ws/180)*math.cos(Ws)))
ro=(math.pi/24)*((math.cos(W)-math.cos(Ws))/(math.sin(Ws)-
(math.pi*Ws/180)*math.cos(Ws)))
I=((a+b*math.cos(W))*ro/fc)*H
x1=0
s=0
Min=[]
Eba=[]
Ebl=[]
while s<1000:
    Epv=Ppv/1000*0.8*0.85*x1*I*t
    #Balance de energia
    r=abs((Epv-Eload))/(1-0.5)
    Min.append(r)
    Ebatt=abs((Epv-Eload))/(1-0.5)
    s = s + 1
    x1 = x1 + 1# numero de paneles
    #x2 = x2 + 1
s=min(Min)
print(s)
a=Min.index(s)
print(a)# muestra el deficit de carga de la bateria
Cbatt=90
x2=(Eload/(Vbatt*Cbatt))*nd*1000
print(x2)# muestra el numero de baterias

```

APÉNDICE F

Componentes para el Motor eléctrico estacionario

Selección de hélice

La hélice seleccionada fue aquella con mayor eficiencia según los coeficientes obtenidos para las series de Gawn.

Para determinar los coeficientes de diseño se calculó el empuje que debe ser capaz de proveer la hélice, para esto se consideró el valor de la resistencia total a la velocidad de 13 nudos y el factor de deducción de empuje.

Finalmente se obtuvieron los siguientes resultados para la hélice seleccionada implementando el código del Anexo C.

Tabla H.1 Características de la hélice seleccionada

Resultados	
t [kN]	0.23
T [kN]	11.96
Z (aspas)	3
D [m]	0.35
Kt	4.56
Kq	1.05
J	0.8
RPM	1390
P/D	1
AE/A0	0.7
η_0	0.55

Eje propulsivo

Finalmente aplicando la ecuación 2.50 para los distintos segmentos, se tiene los siguientes resultados:

Eje de proa: 217 mm

Eje intermedio: 249 mm

Eje de cola: 265 mm

Pala del timón y servomotor

En la Ilustración H.1 se muestran los resultados obtenidos a partir de la velocidad máxima alcanzada, la potencia del servomotor que se requiere para mover la pala, esto se obtuvo de acuerdo a la sociedad de clasificación de buques Bureau Veritas (Register & Shipping, 2020) y el lenguaje de programación implementado.

###Componentes del sistema de propulsion###

Altura de la pala [m] : 0.722

Longitud de la pala [m] : 0.19169684210526317

Area de la pala [m2]: 0.13840512

Perfil de la pala : Naca0016

Par del timon maximo [kN.m]: 652.9007018763997

Potencia del servomotor[kW] : 6.841531412271302

Figura H. 1 Características del timón

Diagrama de provisión de hidrógeno

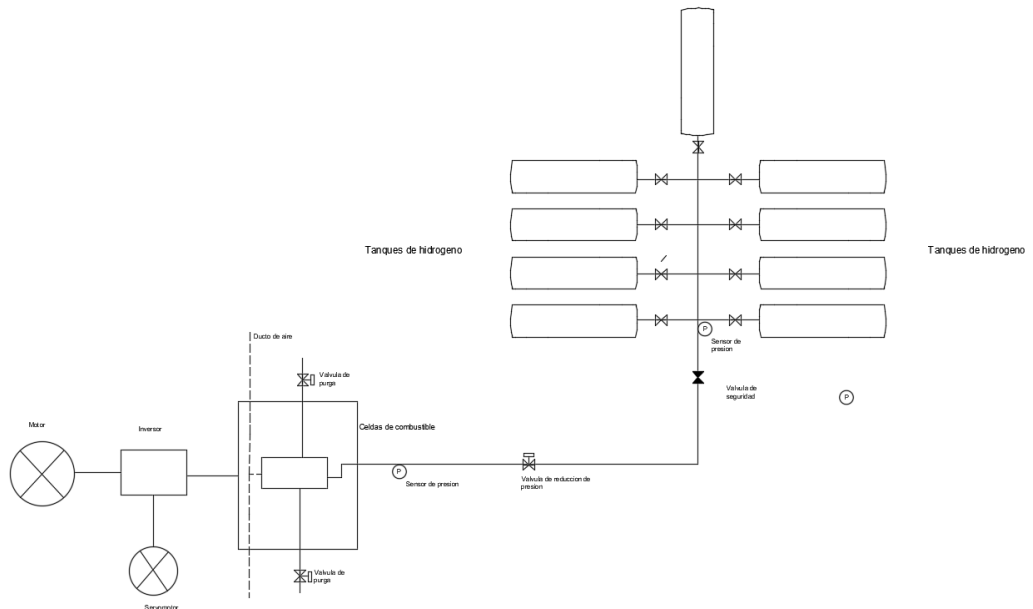


Figura H. 2 Diagrama de provisión de Hidrógeno

En la Figura H.2 se muestra el diagrama de abastecimiento de combustible, primero se encuentran los tanques de hidrógeno de alta presión (350 bar) en el cual

empieza el circuito de abastecimiento, cada tanque cuenta con una válvula de alivio para regular la presión a la salida de cada tanque y limitarla al valor establecido(Choi et al., 2016), luego se encuentra un sensor de presión el cual permite verificar la presión a la salida de los tanques de hidrógeno. Más adelante se coloca una válvula de seguridad que sirve como un dispositivo de seguridad y permita aliviar la presión en el circuito en caso de que exista una sobrepresión. Antes de que el suministro de hidrógeno ingrese a la pila de combustible se debe reducir la presión del circuito de 4 a 7 bar y garantiza que la presión del hidrógeno entrante en el cátodo es comparable con la presión en el ánodo (Chang et al., 2017b), por lo que se necesita una válvula reguladora de presión y un sensor de presión para verificar la presión de entrada a las celdas de combustible. En las celdas de combustible se colocan 2 válvulas de purga que permite eliminar cualquier gota de agua o impurezas que pueden haberse formado debido al proceso químico que se lleva dentro de las mismas (Rodatz et al., 2002), también debe existir un ducto de aire que permita el ingreso de oxígeno para que se produzca la reacción química con los iones de hidrógeno desprendidos para formar agua que posteriormente será expulsada(DNV-GL, 2019). Finalmente, la energía producida por las celdas de combustible es energía continua que debe ser modificada a corriente alterna mediante el inversor, para dimensionarlo se debe tener en consideración que se utiliza la potencia máxima instantánea de los consumidores, en este caso la potencia del motor eléctrico seleccionado. (Shabani & Andrews, 2011)(Quezada, 2008)

Resumen de componentes del sistema

La Tabla H.2 muestra las principales características del motor eléctrico, la potencia se seleccionó de acuerdo con el IHP obtenido del análisis de resistencia de la embarcación seleccionada, también se escogió un motor con RPM similares a la hélice para no utilizar reductor.

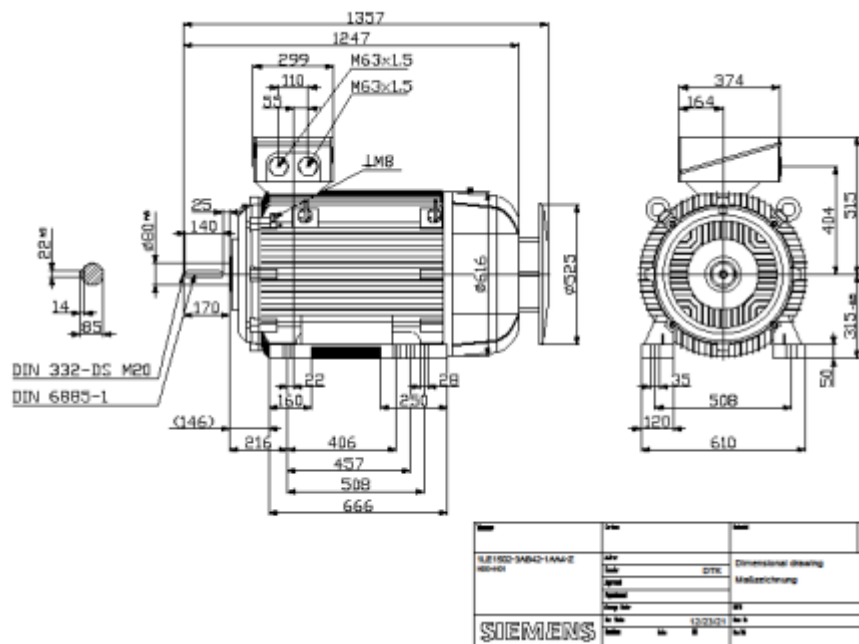


Figura H. 3 Motor eléctrico Siemens
(Siemens, 2021)

Tabla H. 2 Características del motor eléctrico

Motor principal eléctrico (SIEMENS)		
Polos	2	Unidades
Potencia	30	kW
RPM	1500	Rev/min
Frecuencia	50	Hz
Referencia del motor	1LE0141-2BA46-4AA4	
Eficiencia	93.6%	
Voltaje	220	Vac
Corriente	148	Amperios
Peso	340	kg

Para el servomotor se muestran las características principales en la Tabla H.3 de acuerdo con la velocidad máxima alcanzada.

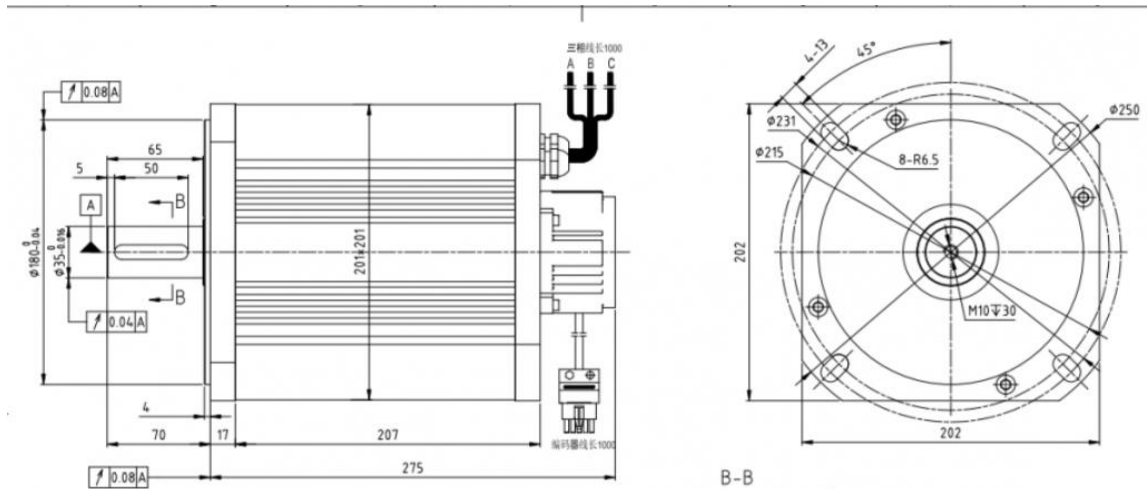


Figura H. 4 Servomotor seleccionado

(RDM, 2020)

Tabla H. 3 Características del servomotor

Servomotor		
Modelo	KY200AS0450-15	Unidades
Voltaje	72	V
Potencia	7.5	kW
RPM	1500	rev/min

Las características de los tanques de hidrógeno se muestran en la Tabla H.4, se seleccionaron tanques de 350 bar de acuerdo con lo recomendado por Pratt (Minnehan & Pratt, 2017b), adicional a esto el material utilizado es acero al carbono el cual se recomienda a utilizar por la sociedad clasificadora ABS.(ABS, 2021)



Figura H. 5 Tanque de Hidrógeno 350 bar

Tabla H. 4 Características de los tanques de hidrógeno

Tanque de Hidrógeno WH150H35		
Presión	350.00	bar
Longitud	1.60	m
Diámetro	0.42	m
Peso	73.00	kg
Capacidad para h2	3.63	kg

Para dimensionar la pala del timón se usó las formulaciones de la sociedad clasificadora Bureau Veritas (Register & Shipping, 2020), y las características del timón se muestran en la Tabla H.5.

Tabla H. 5 Características de la pala del timón

Pala del timón		
Longitud	0.19	m
Altura	0.72	m
Área del timón	0.14	m ²
Perfil	Naca 0016	
Par torsor	652.9	kN.m
Potencia requerida	6.84	kW

Para las celdas de combustible se realizó una búsqueda para seleccionar la que brinde mayor potencia y sea más ligera, por lo que se utilizó 2 celdas de 63.4kW de potencia para abastecer la potencia del motor y sus características se encuentran especificadas en la Tabla H.6.



Figura H. 6 Celda de combustible

(Ballard, 2011)

Tabla H. 6 Características de la celda de combustible

Celda de combustible Ballard		
Potencia	63.4	kW
Corriente máxima	360	Amperios
Voltaje máximo	176	V
Peso	38.5	kg
Largo	0.675	m
Espesor	0.443	m
Altura	0.11	m
Oxidante	Aire	

El inversor es un dispositivo que convierte la corriente continua en alterna y es necesario ya que el motor seleccionado funciona con corriente continua mientras que la celda de combustible que provee de energía genera corriente alterna, además también se considera el voltaje de entrada y de salida, tal como especifica la Tabla H.7.

Tabla H. 7 Características del inversor

(SIRIO, 2011)

Inversor		
Modelo	NXI_0168 5	
Corriente	187	Amperios
Potencia	75	KW
Voltaje	180-220	V
Largo	1.03	m
Ancho	0.239	m
Altura	0.372	m
Peso	65	kg

Componentes para el sistema motor intraborda y thruster

Resumen de los componentes del sistema

A continuación, se muestran los componentes del sistema de propulsión utilizando el motor Intraborda, lo único que cambia con respecto al estacionario es el motor ya que los tanques de hidrógeno y celdas de combustible son las mismas.

Para el Thruster azimutal se verifico la potencia de entrada que puede soportar de acuerdo con los requerimientos del motor intraborda seleccionado, así como las RPM, todo esto se encuentra especificado en la Tabla H.8.

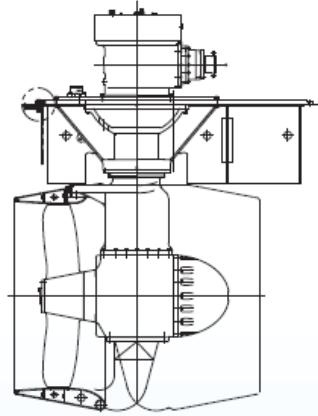


Figura H. 7 Thruster Azimutal
(Marine, 2020)

Tabla H. 8 Características del Thruster Azimutal

Thruster azimutal		
Tipo	SZP-5B	Unidades
Potencia de entrada	52	kW
Entrada RPM	2400	rev/min
Diámetro	415	mm
Peso	78	kg

El motor intraborda como se mencionó anteriormente es más ligero que el motor eléctrico tradicional, por eso fue una opción también considerarlo, a continuación, se muestran las características en la Tabla H.9.



Figura H. 8 Motor intraborda Elco

(Elco, 2020)

Tabla H. 9 Características del motor intraborda

Motor intraborda		
Modelo	EPI-70	Unidades
Potencia	52.5	kW
Corriente	275	Amperios
Voltaje	108	Vdc
Peso	295	kg
RPM	2100	rev/min

El convertidor DC-DC seleccionado permite disminuir solamente el voltaje, ya que la corriente que suministra la celda de combustible es continua al igual que el motor intraborda, pero con voltajes diferentes, en este caso debe ser reducido, estas consideraciones se especifican en la Tabla H.10.

Tabla H. 10 Características del convertidor DC-DC

Convertidor DC-DC		
Modelo	SUPSONIK	Unidades
Potencia	110	kW
Tensión de entrada	175	Vc
Tensión de salida	110	Vc
Corriente	300	Amp

Como esta es la mejor opción y brinda la mayor velocidad se procedió a calcular el LCG para verificar su variación con respecto al modelo inicial con el fin de que en estudios posteriores se verifique el trimado como se muestra en la tabla H.11 mientras que los resultados se observan en la tabla H.12.

Tabla H. 11 Distribución de pesos de embarcación propuesta

Componente	Peso[ton]	x[m]	y[m]	z[m]	Cantidad	Peso total[ton]	Momento x	Momento z
Motor intraborda	0.30	2.00	0.00	0.75	2.00	0.59	1.18	0.44
Pasajeros	0.07	6.78	0.00	0.48	24.00	1.70	11.55	0.82
Equipaje	0.00	6.78	0.00	0.48	24.00	0.10	0.65	0.05
Tanques de hidrogeno superior	0.07	3.09	0.00	1.26	11.00	0.77	2.38	0.97
Tanques de hidrogeno inferior	0.07	4.67	0.00	0.68	4.00	0.29	1.36	0.20
Caseta	0.60	8.82	0.00	1.77	1.00	0.60	5.29	1.06
Tanque de agua	0.29	10.00	0.00	0.24	1.00	0.29	2.90	0.07
Convertidor DC-DC	0.08	2.20	0.00	0.52	1.00	0.08	0.18	0.04
Thruster	0.08	0.34	0.00	0.27	2.00	0.16	0.05	0.04
Celdas de combustible	0.04	10.21	0.00	1.76	2.00	0.08	0.79	0.14
Peso del casco	4.32	6.16	0.00	0.79	1.00	4.32	26.61	3.39
					TOTAL	8.98	52.95	7.22
						LCG	5.90	m
						KG	0.80	m

Tabla H. 12 Comparaciones de valores de LCG

Descripción	Embarcación optimizada	Propuesta Actual
LCG [m]	5.58	5.90

Componentes para el motor eléctrico estacionario y thruster

Resumen de componentes del sistema

Para el thruster azimutal se consideró nuevamente la potencia de entrada que soporta y que es brindada por el motor eléctrico seleccionado, además las RPM son parecidas a las del motor eléctrico para no utilizar un reductor y así optimizar el peso de la embarcación, las características se muestran en la Tabla H.13.

Tabla H. 13 Características del thruster azimutal

Thruster		
Tipo	SZP-5B	Unidades
Potencia de entrada	48	kW
Entrada RPM	2400	rev/min
Diámetro	415	mm
Peso	65	kg

El motor eléctrico seleccionado se dio en base a la potencia requerida IHP obtenida del análisis de resistencia, las RPM son similares a las del thruster para evitar usar un reductor, en la Tabla H.14 se muestran las principales características.

Tabla H. 14 Características del motor eléctrico

Motor principal eléctrico HOYER		
Modelo	HMC3225M-2	Unidades
Potencia	45	kW
RPM	2970	Rev/min
Frecuencia	50	Hz
Eficiencia	93%	
Voltaje	400	Vac
Corriente	76.5	Amperios

Motor principal eléctrico HOYER		
Peso	336	kg

Como el motor seleccionado trabaja con corriente alterna y la celda de combustible con continua y diferente voltaje a este, se debe optar por usar un inversor que transforme la corriente y eleve el voltaje en este caso, a continuación, se muestran las características principales en la Tabla H.15.

Tabla H. 15 Características del inversor

Inversor		
Modelo	Sirio k100	
Corriente	320	Amperios
Potencia	130	kW
Voltaje	180-440	V
Largo	1.9	m
Ancho	0.8	m
Altura	0.8	m

APÉNDICE G

Obtención De La Velocidad Máxima

Paso 1

El programa lee un documento en Excel que contiene IHP, EPR, Pinversor y velocidad. Los datos de IHP fueron obtenidos a partir de la resistencia total calculada en el modelo y descrita en el capítulo 3.

Los datos de EPR se calcularon tomando como velocidad inicial 0 en adelante, estos datos varían ya que la velocidad va aumentando, también lo hacen los valores de IHP y el tiempo de recorrido entre islas, por lo cual se calculo el EPR para cada velocidad con su respectivo tiempo de acuerdo a la ecuación (2.17) y los valores fueron incluidos dentro del documento Excel como se observa en la Ilustración I.1.

0.00	0	12.08	0	0	0	1
0.20	0	21.88	3	0	0	2
0.90	0	41.5	5	0	0	3
1.60	0	51.16	5	0	0	4
3.50	0	80.71	5	0	0	5
7.20	0	129.63	8.1	0	0	6
13.31	0	198.35	8.1	0	0	7
24.01	0	306.12	18.5	0	0	8
31.52	0	355.21	35	0	0	9
48.87	0	490.93	58	0	0	10
68.34	0	620.87	58	0	0	11
86.87	0	721.52	65	0	0	12
104.87	0	802.59	65	0	0	13
120.32	0	854.24	65	0	0	14
138.32	0	915.64	65	0	0	15
155.97	0	967.35	65	0	0	16
172.95	0	1009.05	100	0	0	17
224.59	0	1234.84	100	0	0	18
MCR		EPR	PINV			V
POTENCIA DEL MOTOR		ENERGIA DE PROPULSION REQUERIDA	PESO DEL INVERSOR			VELOCIDAD ALCANZADA

Figura I. 1 Datos en Excel para iniciar el programa

Se utilizo una base de datos para incluir el peso del inversor en base al IHP por cada velocidad.

Paso 2

El programa después de haber leído el documento en Excel, a través de listas definidas para cada variable, guarda la información de acuerdo a la velocidad inicial especificada, es decir va de menor a mayor. Todos los datos de EPR, IHP y Pinversor son guardados de menor a mayor empezando con una velocidad de cero en cada una de las listas especificadas para cada variable.

Paso 3

En este paso se implementa las ecuaciones de hidrogeno gaseoso y también las ecuaciones de cada uno de los componentes de los sistemas propuestos en base a su potencia específica y densidad de potencia.

Paso 4

En este punto se implementa las restricciones para los condicionales, las restricciones a utilizar son el peso y volumen que se calcularon con la embarcación de referencia que actualmente opera en las Islas Galapagos con el fin de no afectar el desplazamiento de la misma(Que no sobrepase el peso de 1.76 toneladas y el volumen de 18.52 metros cúbicos), el condicional utilizado es while, el cual nos indica que cuando el programa comienza a iterar desde una velocidad inicial de 0 que va en aumento, llega un punto en el cual se sobrepasan las restricciones de peso y volumen, ya que todas las ecuaciones se encuentran en función del peso y volumen, el programa se detiene y muestra la velocidad máxima que ha alcanzado para no afectar las restricciones. Este procedimiento se lo realiza para los 3 sistemas de propulsión propuestos.

Código del programa implementado para la velocidad máxima

```
import pandas
import math
import openpyxl# Para poder leer los archivos excel
excel_document = openpyxl.load_workbook('Para optimizacion.xlsx')# para abrir
documentos ene excel
#print type(excel_document)
excel_document.get_sheet_names()# verificar el nombre del archivo excel
sheet = excel_document.get_sheet_by_name('Sheet1')# la hoja de excel que se
esta utilizando
#print sheet['A2'].value
multiple_cells = sheet['A1':'A18']# rango de las celdas que van a ser leidas
multiple_cells2 = sheet['C1':'C18']# rango de las celdas que van a ser leidas
multiple_cells3 = sheet['D1':'D18']# rango de las celdas que van a ser leidas
multiple_cells6 = sheet['G1':'G18']# rango de las celdas que van a ser leidas
MCR1=[]# valores del ihp de la embarcacion en una lista
EPR1=[]# valores de la energia de propulsion requerida de la embarcacion en
```

```

una lista
PINV=[]# valores del peso del inversor de acuerdo a la potencia IHP y voltaje
de entrada y salida
V=[] ## velocidad de la embarcacion
for row in multiple_cells:# se hace para recorrer la celda en la cual se
encuentra informacion sobre el MCR
    for cell in row:
        MCR1.append(cell.value)# los valores se agregan a la lista
correspondiente
for row in multiple_cells2:# se hace para recorrer la celda en la cual se
encuentra informacion sobre la energia de propulsion requerida
    for cell in row:
        EPR1.append(cell.value)# los valores se agregan a la lista
correspondiente
for row in multiple_cells3:# se hace para recorrer la celda en la cual se
encuentra informacion sobre el peso del inversor de acuerdo a la potencia
    for cell in row:
        PINV.append(cell.value)# los valores se agregan a la lista
correspondiente
for row in multiple_cells6: # se hace para recorrer la celda en la cual se
encuentra informacion sobre la energia de propulsion requerida
    for cell in row:
        V.append(cell.value) # los valores se agregan a la lista
correspondiente
#####INICIAZION DE LAS VARIABLES DE ENTRADA PARA EL LASO WHILE
Psistema=0# inicializacion de variables utilizadas en el laso while
MCR=0# inicializacion de variables utilizadas en el laso while
EPR=0# inicializacion de variables utilizadas en el laso while
Ntan=0# inicializacion de variables utilizadas en el laso while
Nceld=0# inicializacion de variables utilizadas en el laso while
i=0# inicializacion de variables utilizadas en el laso while
v=0# inicializacion de variables utilizadas en el laso while
Mr=0# inicializacion de variables utilizadas en el laso while
Poserv=0# inicializacion de variables utilizadas en el laso while
Pmot1=0# inicializacion de variables utilizadas en el laso while
EPR2=0# inicializacion de variables utilizadas en el laso while
Valc=0# inicializacion de variables utilizadas en el laso while
Ntan2=0# inicializacion de variables utilizadas en el laso while
Nceld2=0# inicializacion de variables utilizadas en el laso while
vtotal=0# inicializacion de variables utilizadas en el laso while
Pserv=0# inicializacion de variables utilizadas en el laso while
Vserv=0# inicializacion de variables utilizadas en el laso while
###VARIABLES DEL CALCULO DE LA PALA###
L=13.44## Eslora de la embarcacion
T=0.542## Calado de la embarcacion
hpala=0.722# de acuerdo a la sociedad de clasificacion utilizada
#####Para el cálculo del timon segun al BV, Parte B, capítulo
10,Sección 1.#####
Atimon=0.019*L*T# area del timón ##estimacion
Lpala=Atimon/hpala# longitud de la pala, de acuerdo a la sociedad
clasificadora
###CALCULO PARA EL MOTOR ESTACIONARIO CONSIDERANDO SOLO UNO###
while Psistema<=float(1764) and vtotal<=18.52:
    if Psistema>=1764 # asegura que se rompa el ciclo n+1
        break
#####PARA EL CALCULO DEL SISTEMA DE HIDROGENO GASEOSO PARA
SISTEMA ESTACIONARIO CONSIDERANDO 1 MOTOR#####
MCR=float(MCR1[i])# recorre cada posición de la lista asignada
EPR=float(EPR1[i])# recorre cada posición de la lista asignada
Pinv=float(PINV[i])# recorre la lista del peso del inversor
#PARA EL HIDROGENO GASEOSO

```



```

Eh2=(EPR)/0.45 # energía brindada por el hidrogeno considerando un factor
de rendimiento de 0.45 recomendada por el paper de la referencia
Massh2=Eh2*(3.6/119.96)#masa de hidrogeno
Massta=Massh2*17.92## masa de los tanques de hidrogeno
Voltan=Massh2*93.7/1000## volumen de los tanques de hidrogeno
#TANQUE DE HIDROGENO
Ptotan=Massta# Peso total del número de tanques
Ntan1=round(Massh2/3.63)# capacidad del tanque de hidrogeno a 350 bar
#CELDA DE COMBUSTIBLE
#MCR=1
Ptcel=(MCR-61.869)/0.1237## Peso de la celda de combustible
Vcel=(MCR-73.331)/55.944## Volumen de la celda de combustible
##Para el peso de la maquinaria##
Pmaq=(MCR+12.871)/0.169## PESO DE LA MAQUINARIA
Vmaq=(MCR+11.458)/292.08## VOLUMEN DE LA MAQUINARIA
#####Determinacion del par del timon#####$#
ng=0.85 # coeficiente de navegacion
lambda1=hpala**2/Atimon
r1=(lambda1+2)/3
r3=1.15 ## for rudders behind a fixed propeler
####Para el perfil del timon utilizamos el perfil NACA0016-Goettingen de
acuerdo a las embarcaciones consultadas
r2astern=0.80# for astern condition
r2ahead=1.10#ahead condition
###Rudder force###
Crastern = 132 * ng * Atimon * (v ** 2)*r1*r2astern*r3
Cahead=132 * ng * Atimon * (v ** 2)*r1*r2ahead*r3
###Rudder torque
x2=0.3297# De acuerdo al grafico de la sociedad clasificadora
x3=0.3397# # De acuerdo al grafico de la sociedad clasificadora
x1=0.15# # De acuerdo al grafico de la sociedad clasificadora
b=x2+x3-x1/2# mean breadth in m
alfaastern=0.66 # for astern condition
alfaahead=0.33# for ahead condition
Af=0.023# area de la porcion de la pala de acuerdo al grafico 1
rastern=b*(alfaastern-Af/Atimon)
rahead=b*(alfaahead-Af/Atimon)
Mtrastern=Crastern*rastern
Mtrahead=Cahead*rahead
if Mtrahead > Mtrastern: ### condicion para evaluar el maximo valor de
la fuerza
    Mr =Mtrahead
else:
    Mr = Mtrastern
#####CALCULO DEL SERVOMOTOR#####
#El SOLAS en su Capítulo II- 1.Parte C, Regla 29: Aparatos de gobierno
nos dice lo siguiente:
#La presión de proyecto utilizada en los cálculos para determinar los
#escantillones de las tuberías y de otros componentes del aparato de gobierno
#sometidos a presión hidráulica interna será por lo menos 1,25 veces la
presión
#máxima de trabajo.
##El aparato de gobierno principal y la mecha del timón:
#Tendrán resistencia suficiente y permitirá el gobierno del buque a la
velocidad
#máxima de servicio en marcha avante, lo cual deberá quedar demostrado;
#Permitirán el cambio del timón desde una posición de 35° a una banda hasta
#otra de 35° a la banda opuesta hallándose el buque navegando a la velocidad
#máxima de servicio en marcha avante y con su calado máximo en agua salada,
#y, dadas las mismas condiciones, desde una posición de 35° a cualquiera de
#ambas bandas hasta otra de 30° a la banda opuesta, sin que ello lleve más de

```

```

#28 s.
fr=1.3 # factor de riesgo determinado por solas
w=(65/28)/360### de acuerdo a lo que establece SOLAS
n=0.8 # rendimiento mecanico del sistema
Poserv=(Mr*w/n)*fr# potencia de servicio del servomotor en kW
##PESO DEL SERVOMOTOR##
Pserv=(Poserv-1.3415)/0.1741
Vserv=(Poserv-0.6566)/26219
##### para la helice#####
#####PESO DE LA HELICE ESTIMADO##
Dh=0.35 # valor del diametro asumido de acuerdo a las pruebas de mar
realizadas en GALAPAGOS
ph=0.080*Dh**3*1000 # Peso en kg
##para la estimacion del eje propulsor, de acuerdo a la ubicacion en el
erreglo general se asume la longitud y el diametro ##
Leje = 2
Deje = 0.15
dmaterial = 7850 ## densidad del acero forjado kg/m3
Vejemac = math.pi * ((Deje / 2)) ** 2 * (Leje)
Peje = (Vejemac * dmaterial)
##para la estimacion del peso de la pala##
d=0.16 # espesor maximo perfil naca 0016
Vpala=Atimon*d*0.8# estimacion del peso de la pala proyecto basico del
buque mercante
dmaterial=7850# densidad del acero
Ppala=Vpala*dmaterial
Psistema = Ptotan + Ptccl + Massh2 + Pmaq + Pinv+ Ppala+Peje+Pserv #
peso total que va a ser comparado con el laso while para que cumpla la
condicion
vtotal=Voltan+Vcel+Vmaq+Vserv
i = i + 1 # contador de variables
v = v + 1 # contador de variables
#####CALCULO PARA EL MOTOR ESTACIONARIO CONSIDERANDO 2
MOTORES#####
#####
Ptotal11=0## inicializacion de variables
Vtotal11=0# inicializacion de variables
s=1# inicializacion de variables
NMCR1=0# inicializacion de variables
NEPR1=0# inicializacion de variables
v44=0# inicializacion de variables
Ntan2=0# inicializacion de variables
while Ptotal11<=float(1764) and Vtotal11<=18.52:
    if Ptotal11>=1764 #asegurar que se corte el ciclo
        break# en caso de que se repita n+1 rompe el lazo while
    B=EPR1.index(EPR)### de la lista de energia de propulsion requerida busca
la posicion en la que se encuentra dicho valor
    C=MCR1.index(MCR)### de la lista de potencia de la maquina principal
requerida busca la posicion en la que se encuentra dicho valor
    NEPR1=EPR1[B]##
    NMCR1=float(MCR1[C]/2)
# PARA EL HIDROGENO GASEOSO
Pinv = float(PINV[B]) # recorre la lista del peso del inversor
# PARA EL HIDROGENO GASEOSO
Eh22 = (NEPR1) / 0.45 # energia brindada por el hidrogeno considerando
un factor de rendimiento de 0.45
Massh11 = Eh22 * (3.6 / 119.96) # masa de hidrogeno
Massta11 = Massh11 * 17.92 ## masa de los tanques de hidrogeno
Voltan11 = Massh11 * 93.7 / 1000 ## volumen de los tanques de hidrogeno
Ptccl11 = ((NMCR1*2) - 61.869) / 0.1237 ## Peso de la celda de
combustible

```

```

Vcell1 = (NMCR1*2 - 73.331) / 55.944 ## Volumen de la celda de
combustible
# TANQUE DE HIDROGENO
Ptotan = Massta11 # Peso total del numero de tanques
Ntan2=round(Massh11/3.63) # Numero de tanques de acuerdo a
##Peso del motor##
Pmaq44 = (NMCR1 + 12.871) / 0.169 ## PESO DE LA MAQUINARIA
Vmaq44 = (NMCR1 + 11.458) / 292.08 ## VOLUMEN DE LA MAQUINARIA
####PESO DE LA HELICE ESTIMADO##
Dh = 0.35 # valor del diametro asumido de acuerdo a las pruebas de mar
realizadas en GALAPAGOS
ph = 0.080 * Dh ** 3 * 1000 # Peso en kg
###para la estimacion del eje propulsor, de acuerdo a la ubicacion en el
erreglo general se asume la longitud y el diametro ##
Leje=2
Deje=0.15
dmaterial=7850 ## densidad del acero forjado kg/m3
Vejemac=math.pi*((Deje/2))**2*(Leje)
Pejel=(Vejemac*dmaterial)
##para la estimacion del peso de la pala##
d = 0.16 # espesor maximo perfil naca 0016
Vpala = Atimon * d * 0.8 # estimacion del peso de la pala proyecto
basico del buque mercante
dmaterial = 7850 # densidad del acero
Ppala = Vpala * dmaterial
## CALCULO DE LA PALA Y PESO DEL SERVOMOTOR##
Pserv=(Poserv-1.3415)/0.1741
Vserv=(Poserv-0.6566)/26219
#####Determination del par del timon#####$#
ng=0.85 # coeficiente de navegacion
lambda1=hpala**2/Atimon
r1=(lambda1+2)/3
r3=1.15 ## for rudders behind a fixed propeler
####Para el perfil del timon utilizamos el perfil NACA0016-Goettingen de
acuerdo a las embarcaciones consultadas
r2astern=0.80# for astern condition
r2ahead=1.10#ahead condition
####Rudder force###
Crastern = 132 * ng * Atimon * (v ** 2)*r1*r2astern*r3
Cahead=132 * ng * Atimon * (v ** 2)*r1*r2ahead*r3
####Rudder torque
x2=0.3297# De acuerdo al grafico de la sociedad clasificadora
x3=0.3397# # De acuerdo al grafico de la sociedad clasificadora
x1=0.15# # De acuerdo al grafico de la sociedad clasificadora
b=x2+x3-x1/2# mean breadth in m
alfaastern=0.66 # for astern condition
alfaahead=0.33# for ahead condition
Af=0.023# area de la porcion de la pala de acuerdo al grafico 1
rastern=b*(alfaastern-Af/Atimon)
rahead=b*(alfaahead-Af/Atimon)
Mtrastern=Crastern*rastern
Mtrahead=Cahead*rahead
if Mtrahead > Mtrastern: ### condicion para evaluar el maximo valor de
la fuerza
Mr =Mtrahead
else:
Mr = Mtrastern
fr=1.3 # factor de riesgo determinado por solas
w=(65/28)/360### de acuerdo a lo que establece SOLAS
n=0.8 # rendimiento mecanico del sistema
Poserv=(Mr*w/n)*fr# potencia de servicio del servomotor en kW

```

```

    Ptotal11 = Ptc11 + Massh11 + Ptotan + Pinv +
2*Pmaq44+2*Pejel+2*Ppala+2*Pserv
    Vtotal11=Voltan11+Vcell11+2*Vmaq44+2*Vserv
    v44 = V[B]
    s=s+1

#####SEGUNDA OPCION 01 MOTOR intraborda+thruster####
i1=0
Ptot22=0
vtot22=0
EPR22=0
Pmot22=0
while Ptot22<=float(1764) and vtot22<=18.52:
    if Ptot22>=1764
        break
    Pmot22 = float(MCR1[i1])
    EPR22=float(EPR1[i1]) # ENERGIA DE PROPULSION REQUERIDA
    Pinv22=float(PINV[i1])
    # PARA EL HIDROGENO GASEOSO
    Eh2 = EPR22 / 0.45 # energia brindada por el hidrogeno
    Massh22 = Eh2 * (3.6 / 119.96) # masa de hidrogeno
    Massta22=Massh22*17.92
    Voltan22=Massh22*93.7/1000
    # TANQUE DE HIDROGENO
    Ptotan22 = Massta22 # Peso total del numero de tanques
    Ntan3 = round(Massh22 / 3.63)
    # CELDA DE COMBUSTIBLE
    Ptc11 = (Pmot22 - 61.869) / 0.1237 ## Peso de la celda de combustible
    Vcell11 = (Pmot22 - 73.331) / 55.944 ## Volumen de la celda de
combustible
    #Peso del motor Intraborda##
    Pintr=((Pmot22)-8.9129)/0.2283
    Vintr=((Pmot22)+32.25)/450.66
    ## Peso del Thruster azimutal
    Pth22 = (Pmot22 - 43.046) / 0.1923 ## PESO DEL THRUSTHER AZIMUTAL
    Ptot22=Pth22+Pintr+Ptotan22+Massh22+Pinv22+Ptc11
    vtot22=Voltan22+Vcell11+Vintr
    i1=i1+1
##### CON 2 MOTORES INTRABORDA#####
Ptot155=0
Vtotal55=0
a=1
NEPR22=0
NMCR=0
Ntan4=0
v55=0
while Ptotal55<=float(1764) and Vtotal55<=18.52:
    if Ptotal55>=1764:
        break
        F=EPR1.index(EPR22)
        C=MCR1.index(Pmot22)
        NEPR22=float(EPR1[F+a])
        NMCR=float(MCR1[C+a]/2)
        Pinv22 = float(PINV[a + 1])
    # PARA EL HIDROGENO GASEOSO
    Pinv55 = float(PINV[F+1]) # recorre la lista del peso del inversor
    # PARA EL HIDROGENO GASEOSO
    Eh55 = (NEPR22) / 0.45 # energia brindada por el hidrogeno considerando
un factor de rendimiento de 0.45
    Massh55 = Eh55 * (3.6 / 119.96) # masa de hidrogeno
    Massta = Massh55 * 17.92 ## masa de los tanques de hidrogeno

```

```

    Voltan = Massh55 * 93.7 / 1000  ## volumen de los tanques de hidrogeno
    Ptccl44 = (2*NMCR - 61.869) / 0.1237  ## Peso de la celda de combustible
    Vcel55 = (Pmot22 - 73.331) / 55.944  ## Volumen de la celda de
combustible

# TANQUE DE HIDROGENO
    Ptotan55 = Massta  # Peso total del numero de tanques
    Ntan4 = round(Massh55 / 3.63)
##Peso del motor##
    Pmaq44 = (NMCR + 12.871) / 0.169  ## PESO DE LA MAQUINARIA
    Vmaq44 = (NMCR + 11.458) / 292.08  ## VOLUMEN DE LA MAQUINARIA
## peso del Thruster azimutal
    Pth44 = (C - 43.046) / 0.1923  ## PESO DEL THRUSTER AZIMUTAL
    Ptotal55 = 2*Pth44 + Ptccl44 + Massh55 + Ptotan55 + 2*Pmaq44+Pinv22
    Vtotal55=2*Vmaq44+Voltan+Vcell55
    v55=V[F+a]  ## presenta la velocidad alcanzada
    a=a+1
#####PARA LA TERCERA OPCION MOTOR ELECTRICO + TRUSTER
#####
Pmot3=0
EPR3=0
Ptotal3=0
i2=0
Valc3=0
Vtotal=0
MCR3=0
while Ptotal3<=float(1764) and Vtotal<=18.52:
    if Ptotal3 >= 1764
        break
    Pmot3 = float(MCR1[i2])
    EPR3=float(EPR1[i2])# ENERGIA DE PROPULSION REQUERIDA
    # PARA EL HIDROGENO GASEOSO
    MCR3 = float(MCR1[i2])  # recorre cada posicion de la lista asignada
    Pinv = float(PINV[i2])  # recorre la lista del peso del inversor
    # PARA EL HIDROGENO GASEOSO
    Eh2 = (EPR3) / 0.45  # energia brindada por el hidrogeno considerando un
factor de rendimiento de 0.45
    Massh2 = Eh2 * (3.6 / 119.96)  # masa de hidrogeno
    Massta = Massh2 * 17.92  ## masa de los tanques de hidrogeno
    Voltan = Massh2 * 93.7 / 1000  ## volumen de los tanques de hidrogeno
    # TANQUE DE HIDROGENO
    Ptotan = Massta  # Peso total del numero de tanques
    Ntan6 = round(Massh2 / 3.63)
    # CELDA DE COMBUSTIBLE
    Ptccl = (MCR3 - 61.869) / 0.1237  ## Peso de la celda de combustible
    Vcel = (MCR3 - 73.331) / 55.944  ## Volumen de la celda de combustible
##Peso del motor##
    Pmaq = (MCR3 + 12.871) / 0.169  ## PESO DE LA MAQUINARIA
    Vmaq = (MCR3 + 11.458) / 292.08  ## VOLUMEN DE LA MAQUINARIA
## peso del Thruster azimutal
    Pth=(MCR3-43.046)/0.1923## PESO DEL THRUSTER AZIMUTAL
    Ptotal3=Pth+Ptccl+Massh2+Ptotan+Pinv+Pmaq
    Vtotal=Vmaq+Vcel+Voltan
    Valc3 = i2  #####velocidad alcanzada###
    i2 = i2 + 1
#####Para el mismo sistema pero con 2 motores#####
Ptotal44=0
Vtotal44=0
NEPR8=0
NMCR8=0
v66=0

```

```

Ntan7=0
s=1
while Ptotal44<=float(1764) and Vtotal44<=18.52:
    If Ptotal44>=1764:
        break
        B=EPR1.index(EPR3)
        C=MCR1.index(MCR3)
        NEPR8=EPR1[B+s]
        NMCR8=float(MCR1[C+s]/2)
# PARA EL HIDROGENO GASEOSO
    Pinv = float(PINV[B+1]) # recorre la lista del peso del inversor
# PARA EL HIDROGENO GASEOSO
    Eh22 = (NEPR8) / 0.45 # energia brindada por el hidrogeno considerando
un factor de rendimiento de 0.45
    Massh448 = Eh22 * (3.6 / 119.96) # masa de hidrogeno
    Massta = Massh448 * 17.92 ## masa de los tanques de hidrogeno
    Voltan = Massh448 * 93.7 / 1000 ## volumen de los tanques de hidrogeno
    Ptsel44 = (2*NMCR8 - 61.869) / 0.1237 ## Peso de la celda de combustible
    Vceli = (MCR3 - 73.331) / 55.944 ## Volumen de la celda de combustible
# TANQUE DE HIDROGENO
    Ptotan = Massta # Peso total del numero de tanques
##Peso del motor##
    Pmaq44 = (NMCR8 + 12.871) / 0.169 ## PESO DE LA MAQUINARIA
    Vmaq44 = (NMCR8 + 11.458) / 292.08 ## VOLUMEN DE LA MAQUINARIA
## peso del Thruster azimutal
    Pth44 = (NMCR8 - 43.046) / 0.1923 ## PESO DEL THRUSTHER AZIMUTAL
    Ptotal44 = 2*Pth44 + Ptsel44 + Massh448 + Ptotan + Pinv + 2*Pmaq44
    Vtotal44=2*Vmaq44+Voltan+Vceli
    Ntan7=round(Massh448/3.63)
    v66 = V[B + s]
    s=s+1

print("####Maxima velocidad alcanzada con el sistema a base de H2 gaseoso
para 2 motores estacionario####")
print("Potencia del motor [kW] :",NMCR1*2)# imprime la potencia requerida del
motor
print("Energia propulsiva requerida [kWh] :",NEPR1)# imprime la energia
propulsiva maxima que cumpla la condicion
print("Velocidad Maxima Alcanzada [Nudos] :",v44)# imprime la velocidad
requerida
print("Numero de tanques de H2 requeridos :",Ntan2)# imprime el numero de
tanques requeridos
print("####Maxima velocidad alcanzada con el sistema a base de H2 gaseoso
para 2 motores intraborda electrico####")
print("Potencia del motor [kW] :",NMCR*2)# imprime la potencia requerida del
motor
print("Energia propulsiva requerida [kWh] :",NEPR22)# imprime la energia
propulsiva maxima que cumpla la condicion
print("Velocidad Maxima Alcanzada [Nudos] :",v55)# imprime la velocidad
requerida
print("Numero de tanques de H2 requeridos :",Ntan4)# imprime el numero de
tanques requeridos
#print(PSERV)
print("####Maxima velocidad alcanzada con Trhusters Azimutales+ Motor
electrico####")
print("Potencia del motor [kW] :",NMCR8*2)# imprime la potencia requerida del
motor
print("Energia propulsiva requerida [kWh] :",NEPR8)# imprime la energia
propulsiva maxima que cumpla la condicion
print("Velocidad Maxima Alcanzada [Nudos] :",v66)# imprime la velocidad
requerida

```

```

print("Numero de tanques de H2 requeridos :",Ntan7)# imprime el numero de
tanques requeridos

#####PARA EL TIMON DE LA
PALA#####
print("###Componentes del sistema de propulsion###")# imprime el titulo
print("Altura de la pala [m] :",hpala)# imprime el valor de la altura de la
pala
print("Longitud de la pala [m] :",Lpala)# imprime la longitud de la pala
print("Area de la pala [m2]:",Atimon)# imprime el valor del área de la pala
print("Perfil de la pala :", "Naca0016")# imprime el perfil naca utilizado
print("Par del timon maximo [kN.m]:",Mr)# imprime el par del timon
print("Potencia del servomotor[kW] :",Poserv)# imprime la potencia del servo.

```

Estimación del peso de la hélice

El peso de una hélice de paso fijo se puede estimar con la siguiente ecuación: libro de Proyectos y Artefactos. (Cálculo de desplazamiento (pág. 9-47))

$$P_H = 0.080 * Dh^3 * 1000 \quad (1.1)$$

Donde:

- P_H : Peso de la hélice en [kg]
- Dh^3 : Diámetro de la hélice en [m]

Estimación del peso del eje

Para estimar el peso del eje se consideró que es macizo, y con la ecuación del volumen multiplicado por la densidad del acero se obtiene el peso aproximado

$$P_{eje} = d_{eje} * \pi * r^2 * L \quad (1.2)$$

Donde:

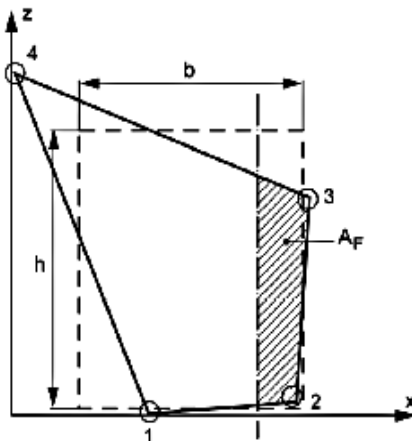
- P_{eje} : Peso del eje en [kg]
- d_{eje} : Densidad del acero en [kg/m³]
- r : Radio del eje en [m]
- L : Longitud del eje[m]

Estimación de las características de la pala y el servomotor

Esto se realizó de acuerdo a la sociedad clasificadora para embarcaciones rápidas (Register & Shipping, 2020).

A_T : area, in m^2 , obtained by adding, to the rudder blade area, the area of rudder post or rudder horn, if any, up to height h ,
 k_2 : factor depending on rudder profile, the value of which is given in Table K3.10.1. For high-efficiency rudders, k_2 is to be equal to 1,7 for ahead condition and 1,2 for astern condition,

Figure K3.10.3



b : mean breadth of rudder, in m, equal to:

$$b = \frac{x_2 + x_3 - x_1}{2}$$

h : mean height of rudder, in m, equal to:

$$h = \frac{z_3 + z_4 - z_2}{2}$$

k_3 : factor equal to:

- $k_3 = 0,8$ for rudders outside the propeller jet
- $k_3 = 1,15$ for rudders behind a fixed propeller nozzle
- $k_3 = 1,0$ in other cases,

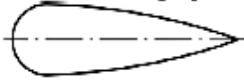

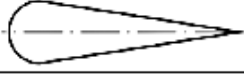
d_{TF} : rule diameter, in mm, of rudder stock subject to combined torque and bending,

d_T : rule diameter, in mm, of rudder stock subject to torque only,

C_R : rudder force, in N, i.e. force acting on the rudder blade, as defined in K3.10.5,

Q_R : rudder torque, in N (m, i.e. torque acting on the rudder stock, as defined in K3.10.5.

Table K3.10.1 -Factor k_2

Profile type	k_2	
	ahead condition	astern condition
NACA-00 - Göttingen profiles 	1,10	0,80
Hollow profiles 	1,10 - 1,35	0,90
Flat side profiles 	1,10	0,90

K3.10.3 Materials

- 1 Rudder stocks, pintles, keys and bolts are to be made of rolled, forged or cast C-Mn steel, in accordance with the relevant requirements of the Rules.
- 2 The material used for rudder stocks, pintles, keys and bolts is to have a minimum yield stress R_{eH} of not less than 200 N/mm^2 .
- 3 The requirements for the determination of scantlings contained in this article apply to steels having a minimum yield stress R_{eH} equal to 235 N/mm^2 .
- 4 In the case of steels with a yield stress R_{eH} other than 235 N/mm^2 , the values of diameters and thicknesses calculated with the formulae contained in the following sub-articles are to be modified as indicated, depending on the factor K_1 obtained from the following formula:

$$K_1 = \left(\frac{235}{R_{eH}} \right)^y$$

where:

R_{eH} : minimum yield stress of steel employed, in N/mm^2 , in no case is R_{eH} to be greater than 450 N/mm^2 or 0,7 R_m , whichever is less,

R_m : minimum ultimate tensile strength of steel employed, in N/mm^2 ,

- for $R_{eH} > 235 N/mm^2$: $y = 0,75$
- for $R_{eH} \leq 235 N/mm^2$: $y = 1,0$

- 5 In general, significant reductions in rudder stock diameter for the application of steels with $R_{eH} > 235 N/mm^2$ may be accepted by the Register, subject to the results of a calculation to check rudder stock deformation.

- 7 Welded parts of rudders are to be made of rolled hull steels of a type approved by the Register.

K3.10.4 Arrangement

- 1 Effective means are to be provided to support the weight of the rudder without excessive bearing pressure (e.g. by means of a rudder carrier attached to the upper part of the rudder stock). The hull structure in way of the rudder carrier is to be suitably strengthened.
- 2 Suitable arrangements are to be made to prevent the rudder from accidental lifting.
- 3 In addition, structural rudder stops of suitable strength are to be provided, except where the steering gear is provided with its own rudder stopping devices.
- 4 In rudder trunks which are open to the sea, a seal or stuffing box is to be fitted above the deepest load waterline, to prevent water from entering the steering gear compartment and lubricant being washed away from the rudder carrier.
If the top of the rudder trunk is below the deepest waterline, two separate seals or stuffing boxes are to be provided.

K3.10.5 Determination of the force acting on the rudder blade and the torque acting on the rudder stock

- 1 The rudder force C_R , in N, is to be calculated by the following formula:

$$C_R = 132 \cdot A \cdot V^2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$$
 where:

$$V : \min[V_{AV}, 2/3 \cdot (V_{AV} + 2 \cdot L^{0.5})]$$
- 2 The rudder torque Q_R , in N · m, is to be calculated for both ahead and astern conditions according to the formula:

$$Q_R = C_R \cdot r$$
 where:

$$r : \text{distance, in m, equal to:}$$

$$r = b \cdot (\alpha - k_A)$$
 for the ahead condition, r is to be taken not less than $0,1 \cdot b$,
 b : mean breadth of rudder area, in m, measured in accordance with Figure K3.10.3,
 α :- for ahead condition: $\alpha = 0,33$
 - for astern condition: $\alpha = 0,66$
 $k_A = A_F / A$
 A_F being the area, in m^2 , of the rudder blade portion afore the centreline of rudder pintles (see Figure K3.10.3).

$$\tau_{TALL} = 68/K_1$$

- 2 The rudder stock diameter is therefore to be not less than d_T , in mm, calculated by the following formula:

$$d_T = 4,2 \cdot (Q_R \cdot K_1)^{1/3}$$

K3.10.6.2 Rudder stock subject to combined torque and bending

- 1 Rudder stocks subject to combined torque and bending are to have scantlings such that their equivalent stress σ_e , in N/mm^2 , does not exceed the value determined by the formula:

$$\sigma_{eALL} = 118 / K_1$$

- 2 σ_e is given by the formula:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_B^2 + 3 \cdot \tau_T^2}$$

where:

σ_B : bending stress component, in N/mm^2 , given by the formula:

$$\sigma_B = \frac{10,2 \cdot M}{d_T^3} \cdot 10^6$$

τ_T : torsional stress component, in N/mm^2 , given by the following formula:

$$\tau_T = \frac{5,1 \cdot Q_R}{d_T^3} \cdot 10^6$$

- 3 The rudder stock diameter, in mm, is therefore to be not less than the value d_{TF} , in mm, calculated according to the formula:

$$d_{TF} = d_T \cdot \left(1 + \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{M}{Q_R}\right)^{1,8}\right)^{1/1,8}$$

where:

M : bending moment, in $N \cdot m$, which may be expressed as:

$$M = 0,866 \cdot (C_R / A) \cdot H$$

H : - for spade rudders (see Figure K3.10.1):

$$H = A_2 \cdot (H_C + H_2 / 2)$$

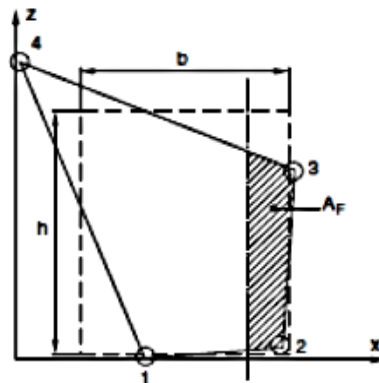
- for rudders with 2 bearings (with solepiece) (see Figure K3.10.2):

$$H = A_1 \cdot a_1 \cdot u \cdot H_1$$

A_1, A_2, H_C, H_1 and H_2 are shown in Figure K3.10.1 and Figure K3.10.2.

The values of the coefficients a_1 and u are given in Table K3.10.2 as a function of the ratio c , where:

$$c = H_1 / (H_C + H_1)$$



2.1.3 Rudder torque

The rudder torque M_{1R} , for both ahead and astern conditions, is to be obtained, in N.m, from the following formula:

$$M_{1R} = C_R r$$

where:

r : Lever of the force C_R , in m, equal to:

$$r = b \left(\alpha - \frac{A_2}{A} \right)$$

and to be taken not less than 0,1 b for the ahead condition

b : Mean breadth, in m, of rudder area to be taken equal to (see Fig 1):

$$b = \frac{x_2 + x_1 - x_3}{2}$$

α : Coefficient to be taken equal to:

- $\alpha = 0,33$ for ahead condition
- $\alpha = 0,66$ for astern condition

A_1 : Area, in m^2 , of the rudder blade portion afore the centreline of rudder stock (see Fig 1).

2.2 Rudder blade with cut-outs (semi-spade rudders)

2.2.1 Rudder blade description

A rudder blade with cut-outs may have trapezoidal or rectangular contour, as indicated in Fig 2.

2.2.2 Rudder force

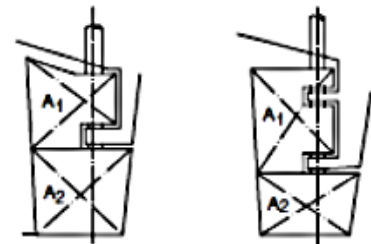
The rudder force C_R , in N, acting on the blade is to be calculated in accordance with [2.1.2].

2.2.3 Rudder torque

The rudder torque M_{1R} , in N.m, is to be calculated in accordance with the following procedure.

The rudder blade area A is to be divided into two rectangular or trapezoidal parts having areas A_1 and A_2 , defined in Fig 2, so that:

$$A = A_1 + A_2$$



Trapezoidal rudder blade
Semi-spade rudder with
rudder horn - 2 bearings

Trapezoidal rudder blade
Semi-spade rudder with
rudder horn - 3 bearings

The rudder forces C_{R1} and C_{R2} , acting on each part A_1 and A_2 of the rudder blade, respectively, are to be obtained, in N, from the following formulae:

$$C_{R1} = C_R \frac{A_1}{A}$$

$$C_{R2} = C_R \frac{A_2}{A}$$

The levers r_1 and r_2 of the forces C_{R1} and C_{R2} , respectively, are to be obtained, in m, from the following formulae:

$$r_1 = b_1 \left(\alpha - \frac{A_{2F}}{A_1} \right)$$

$$r_2 = b_2 \left(\alpha - \frac{A_{2F}}{A_2} \right)$$

where:

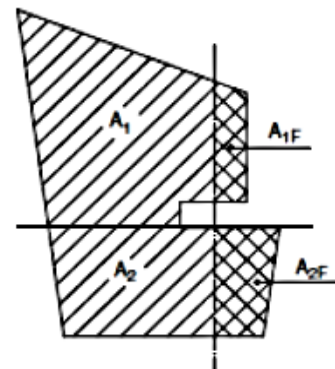
b_1, b_2 : Mean breadths of the rudder blade parts having areas A_1 and A_2 , respectively, to be determined according to [2.1.3]

A_{1F}, A_{2F} : Areas, in m^2 , of the rudder blade parts, defined in Fig 3

α : Coefficient to be taken equal to:

- $\alpha = 0,33$ for ahead condition
 - $\alpha = 0,66$ for astern condition
- For rudder parts located behind a fixed structure such as a rudder horn, α is to be taken equal to:
- $\alpha = 0,25$ for ahead condition
 - $\alpha = 0,55$ for astern condition.

Figure 3 : Geometry of rudder blade with cut-outs



El SOLAS en su Capítulo II- 1. Parte C, Regla 29: Aparatos de gobierno nos dice lo siguiente:

La presión de proyecto utilizada en los cálculos para determinar los escantillones de las tuberías y de otros componentes del aparato de gobierno sometidos a presión hidráulica interna será por lo menos 1,25 veces la presión máxima de trabajo.

El aparato de gobierno principal y la mecha del timón:

Tendrán resistencia suficiente y permitirá el gobierno del buque a la velocidad máxima de servicio en marcha avante, lo cual deberá quedar demostrado;

Permitirán el cambio del timón desde una posición de 35° a una banda hasta otra de 35° a la banda opuesta hallándose el buque navegando a la velocidad máxima de servicio en marcha avante y con su calado máximo en agua salada, y, dadas las mismas condiciones, desde una posición de 35° a cualquiera de ambas bandas hasta otra de 30° a la banda opuesta, sin que ello lleve más de 28 s.

Figura I. 2 Reglamento SOLAS para dispositivos de gobierno

(International Maritime Organization., 2001)

APÉNDICE H

Costos iniciales de los sistemas que se van a comparar

Se tomó como referencia los valores presentados en el documento “Análisis del Sistema de transporte Interislas” desarrollado por la Ing. Gaona para el proyecto ZEGal.

Como referencia, se trabaja con los gastos y costos operativos de la lancha de cabotaje “El Mangle” la cual tiene una capacidad para 34 pasajeros.

Costos iniciales

Para los costos iniciales del sistema actual se consideraron la adquisición de los 3 motores fuera de borda instalados en la embarcación tomada como referencia. Por otro lado, para el sistema cero emisiones propuesto se debe considerar 2 motores intraborda, 2 thruster azimutal y 2 celdas de combustible. Los precios de los componentes del sistema propulsor cero emisiones son solo referenciales ya que no son proporcionados por un distribuidor específico.

Los precios antes mencionados se muestran en las tablas J.1, J.2, J.3.

La cotización para el thruster y motor intraborda se especifican en las Ilustraciones J.1 y J.2.

Tabla J. 1 Costo de motor fuera de borda para el sistema actual
(Gaona, 2021b)

Motor Fuera de borda (1)		Motor Fuera de borda	
Costo	\$37,000.00	Nro. Motores	3.00
10% del costo	\$3,700.00	Costo	\$111,000.00
Préstamo	\$33,300.00	10% del costo	\$11,100.00
Tiempo (Meses)	24	Préstamo	\$99,900.00
Tasa de interés	11.83%	Tiempo (Meses)	24
Pago mensual	-\$1,564.90	Tasa de interés	11.83%
Pago Annual	-\$18,778.85	Pago mensual	-\$4,694.71
		Pago Annual	-\$56,336.55

Tabla J. 2 Costos de los componentes para el sistema cero emisiones

Componente	Cantidad	Precio Unitario	Precio total
Motor intraborda	2	\$17,260.00	\$34,520.00
Thruster azimutal	2	\$63,323.00	\$126,646.00
Celdas de combustible	2	\$300.00	\$600.00
		TOTAL	\$161,766.00

Tabla J. 3 Inversión en maquinaria para el sistema cero emisiones

Inversión maquinaria	
Costo total	\$161,766.00
10% del costo	\$16,176.60
Préstamo	\$145,589.40
Tiempo (Meses)	24
Tasa de interés	11.83%
Pago mensual	-\$6,841.85
Pago Annual	-\$82,102.15

Descripción de costos generados

Para el detalle de los costos se consideran solo aquellos que difieren entre un sistema y otro, es decir, aquellos relacionados con el mantenimiento de la maquinaria para cada sistema ya que se busca identificar cuál presenta mayor rendimiento económico, por lo tanto, los egresos comunes no sirven como punto de comparación.

Para el sistema tradicional los gastos son tomados de (Gaona, 2021a), mientras que para el mantenimiento del sistema cero emisiones se toma como referencia (Rubbiolo, 2020). Por otro lado, el precio del hidrógeno gaseoso considerado es de 9.5 €/kg y fue tomado de (Saito, 2018)

Tabla J. 4 Detalle de los egresos totales de la embarcación “El Mangle” (Modelo Actual)
(Gaona, 2021b)

Descripción	Costo	Nro. Mantenimiento anual	Diario	Mensual	Anual
Cambio de aceite de transmisión	\$90.00	44.0		\$990.00	\$11,880.00
Mantenimiento de la máquina General	\$20.00	44.0		\$73.33	\$880.00
Cambio de filtro de aceite	\$40.00	15.0		\$150.00	\$1,800.00
Cambio de filtro de Comb	\$3.00	174.0		\$130.50	\$1,566.00
Cambio de filtro Racor	\$50.00	12.0		\$150.00	\$1,800.00
Cambio de la Transmisión del motor	\$5,000.00	2.0			\$10,000.00
Cambio de ánodos de sacrificio	\$50.00	2.0			\$600.00
Consumo de combustible			\$400.00	\$11,600.00	\$139,200.00
Total					\$167,726.00

Tabla J. 5 Detalle de los egresos totales del sistema cero emisiones

Descripción	Costo	Nro. Mantenimiento anual	Diario	Mensual	Anual
Cambio de rodamientos	\$60.00	1 / 10 años			
Balanceo de motor	\$60.00	1 / 10 años			
Mantenión (limpieza con desarmado)	\$160.00	1.0			\$320.00
Diagnostico (Eléctrico/Surge - Vibraciones)	\$160.00	1.0			\$320.00
Cambios de ánodos (thruster)	\$50.00	1.0			\$100.00
Consumo de combustible - hidrógeno			\$490.05	\$14,905.69	\$171,517.50
Total					\$172,257.50

Ingresos generados

En las siguientes tablas se muestran la ganancia generada con la venta de pasajes. Este proceso se realiza mediante una agencia de viajes externa, la cual obtiene como comisión un tercio del valor total del pasaje.

Los ingresos entre el sistema actual y el sistema cero emisiones varían porque para la embarcación “El Mangle” tiene un promedio de 30 pasajeros, mientras que para el diseño de la embarcación con cero emisiones solo se toma en cuenta 24 pasajeros.

Tabla J. 6 Ingresos de la embarcación “El Mangle”

(Gaona, 2021b)

Descripción	Costo	servicio	Diario	Mensual	Anual
Valor de Pasaje	\$30.00	2	\$1,800.00	\$52,500.00	\$630,000.00
Comision de Boleteria	\$10.00	2	\$600.00	\$17,500.00	\$210,000.00
TOTAL			\$1,200.00	\$35,000.00	\$420,000.00

Tabla J. 7 Ingresos para el sistema cero emisiones

Descripción	Costo	servicio	Diario	Mensual	Anual
Valor de Pasaje	\$30.00	2	\$1,440.00	\$42,000.00	\$504,000.00
Comision de Boleteria	\$10.00	2	\$480.00	\$14,000.00	\$168,000.00
TOTAL			\$960.00	\$28,000.00	\$336,000.00

苏州苏净船用机械有限公司

SJMATEK (Suzhou) Marine Machine Co., Ltd.
地址: 苏州工业园区唯新路2号 Tel: 0512-69172831 Fax: 051289172831 P.C. 215122

收件单位 To: ESPOL 寄件人 From: Kevin Chan +8615656658538
收件人 Consignee: Mr. Daniel Lalaleo 页数 Pages: 1
收件方电话 Tel: +593-4-994445474 日期 Date: 11th Jan, 2022
收件方传真 Fax: _____ 审批 Approved: _____

QUOTATION

I. Main Data:

Product Name	Fixed Pitch Diesel Powered Azimuth Thruster
Model	SZP5A-FP well mounted
Rated Input Power	50 kW
Actual Input Power	50 kW
Rated Input Speed	2400 r/min
Actual Input Speed	1500 r/min
Diameter of Propeller	about 500 mm
Speed of Propeller	about 541 r/min
Material of Propeller	Cu3
Number of Blades	4 PCS (with nozzle)
PAL*	to be confirmed
Net Weight	about 65kg/set

*PAL is the distance between input shaft center and propeller center.

II. Scope of Supply:

Azimuth Thruster Propulsion System:	
Azimuth Thruster (with well box, gearbox and propeller)	2 SETS
Coupling (with short drive shaft)	2 SETS
Hydraulic Clutch	2 SETS
Cardan Shaft	4 PCS
Electric-Hydraulic Steering System (including hydraulic power unit)	2 SETS
Control System (including central control unit, bridge panel and local control facility)	2 SETS
Documents, Spare Parts and Special Tools	2 SETS
CCS Classification Certificate and Product Quality Certificate	1 SET

III. Price

1. Price of 2 sets azimuth thruster propulsion system: FOB SHANGHAI US\$63,323.
2. The above budget price does not include oversea service cost, final price shall be set according to the signed technical requirements.
3. The above pricing is valid within 60 days since the date of quotation.

IV. Delivery Time

within 4 months from the date receiving down payment to the date of delivery.

V. Payment Method

30% T/T as down payment, 70% T/T before delivery.

Figura J. 1 Cotización del thruster

MOTOR ELECTRICO EPI-70 INTRABORDA



PRECIO
SOLO
MOTOR

\$17.260,00

Tiempo de entrega despues del pedido: 15 - 30 Dias
dependiendo de la disponibilidad

Figura J. 2 Cotización del motor intraborda

APÉNDICE I

Análisis de estabilidad intacta de la embarcación propuesta

La tabla K.1 muestra la distribución de pesos de la embarcación propuesta con el nuevo sistema propulsor.

Tabla K. 1 Distribución de pesos

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
Lightship	1	4.320	4.320			-0.690	0.000	0.790
Tanques de hidrogeno superior	11	0.070	0.770			-3.760	0.000	1.260
Tanques de hidrogeno inferior	4	0.070	0.280			-2.180	0.000	0.680
Motores Intraborda	2	0.300	0.600			-4.850	0.000	0.750
Convertidor DC-DC	1	0.080	0.080			-4.650	0.000	0.520
Celdas de combustible	2	0.040	0.080			3.360	0.000	0.000
Caseta	1	0.600	0.600			1.970	0.000	1.770
Pasajeros	24	0.075	1.800			-0.070	0.000	0.480
Equipaje	24	0.003	0.072			-0.070	0.000	0.480
Thruster	2	0.080	0.160			-6.510	0.000	0.270
Tanque de agua	95%	0.289	0.275	0.289	0.275	3.248	0.000	0.299
Total Loadcase			8.97	0.289	0.275	-0.951	0.000	0.791
FS correction								0.038
VCG fluid								0.829

Tabla K. 2 Propiedades hidrostáticas

Draft Amidships m	0.560
Displacement t	8.97
Heel deg	0.0
Draft at FP m	0.570
Draft at AP m	0.549
Draft at LCF m	0.558

Trim (+ve by stern) m	-0.021
WL Length m	13.670
Beam max extents on WL m	2.727
Wetted Area m ²	35.131
Waterpl. Area m ²	31.398
Prismatic coeff. (Cp)	0.832
Block coeff. (Cb)	0.418
Max Sect. area coeff. (Cm)	0.508
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.842
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	-0.951
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	-0.972
KB m	0.373
KG fluid m	0.829
BMt m	1.956
BML m	43.003
GMt corrected m	1.500
GML m	42.547
KMt m	2.329
KML m	43.376
Immersion (TPc) tonne/cm	0.322
MTc tonne.m	0.282
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	0.237
Max deck inclination deg	0.0867
Trim angle (+ve by stern) deg	-0.0867

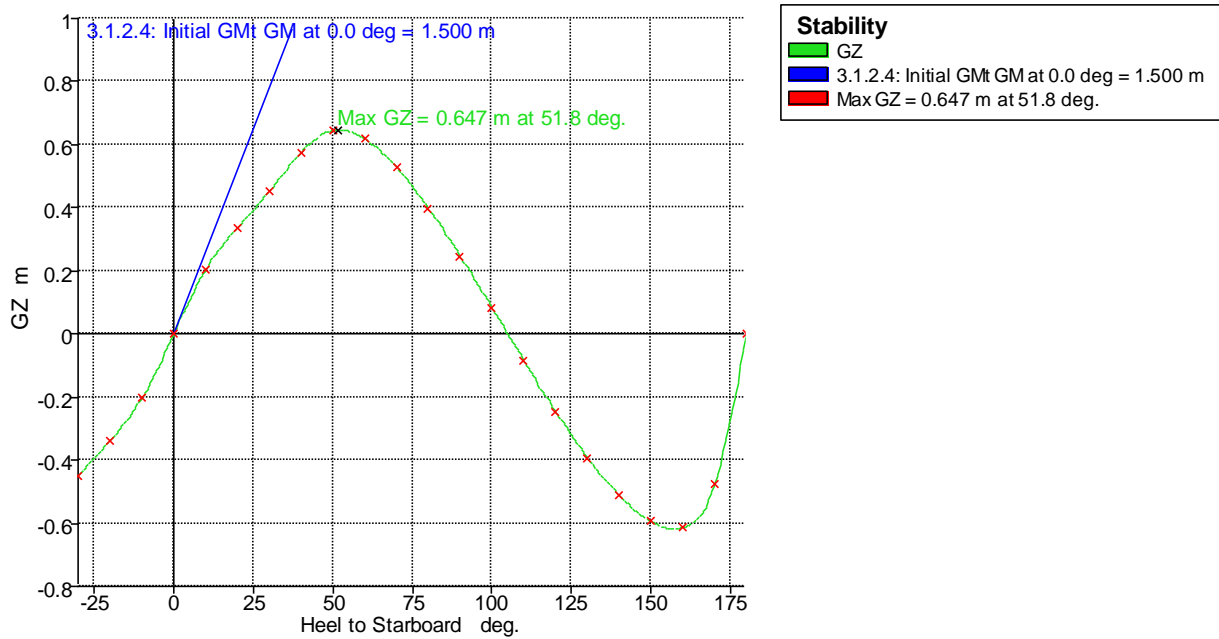


Figura K. 1 Curva Gz de estabilidad

Tabla K. 3 Criterios de estabilidad

Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
A.749(18) Ch3 - Design criteria applicable to all ships	3.1.2.1: Area 0 to 30	3.1513	m.deg	7.7572	Pass	+146.16
A.749(18) Ch3 - Design criteria applicable to all ships	3.1.2.1: Area 0 to 40	5.1566	m.deg	12.8973	Pass	+150.11
A.749(18) Ch3 - Design criteria applicable to all ships	3.1.2.1: Area 30 to 40	1.7189	m.deg	5.1401	Pass	+199.03
A.749(18) Ch3 - Design criteria applicable to all ships	3.1.2.2: Max GZ at 30 or greater	0.200	m	0.647	Pass	+223.50
A.749(18) Ch3 - Design criteria applicable to all ships	3.1.2.3: Angle of maximum GZ	25.0	deg	51.8	Pass	+107.27
A.749(18) Ch3 - Design criteria applicable to all ships	3.1.2.4: Initial GMt	0.150	m	1.500	Pass	+900.00

La tabla K.3 muestra que la embarcación cumple con los criterios de estabilidad básicos que se aplican para todo tipo de embarcaciones.

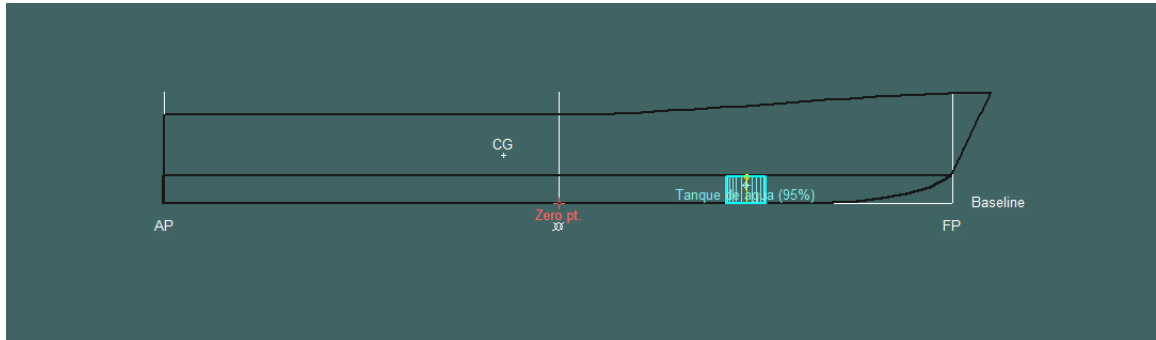


Figura K. 2 Vista de perfil de la embarcación

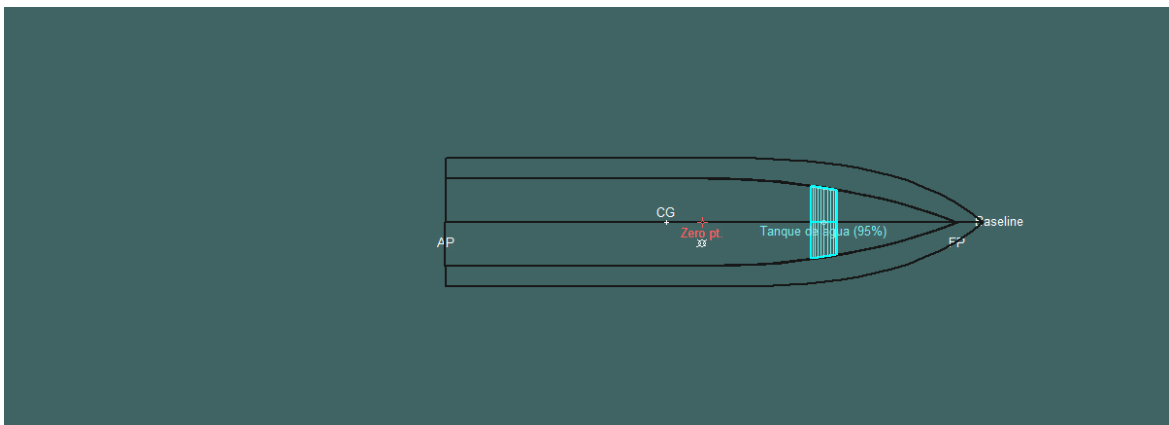


Figura K. 3 Vista de planta de la embarcación

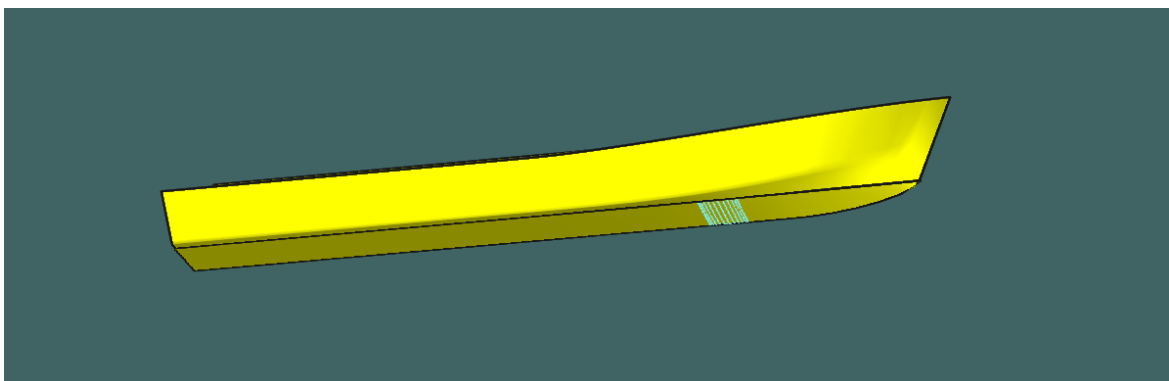


Figura K. 4 Vista 3d de la embarcación

APÉNDICE J

CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE LA EMBARCACIÓN PROPUESTA

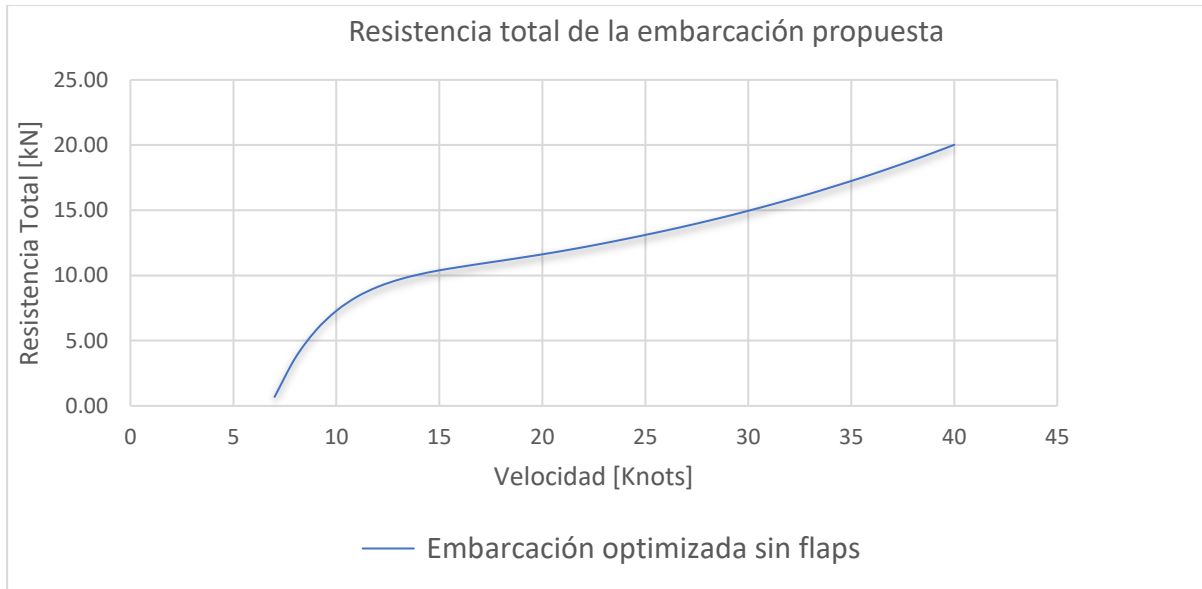


Figura L. 1 Resistencia total de la embarcación propuesta

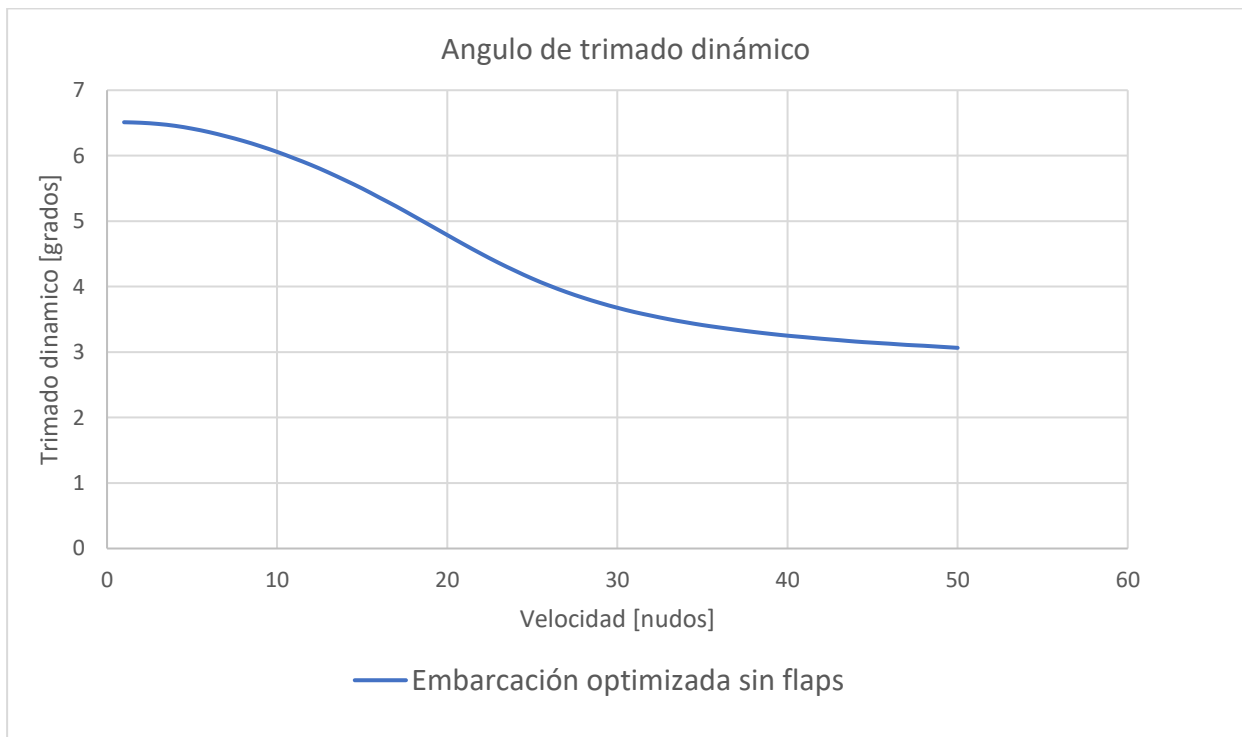


Figura L. 2 Angulo de trimado de la embarcación seleccionada

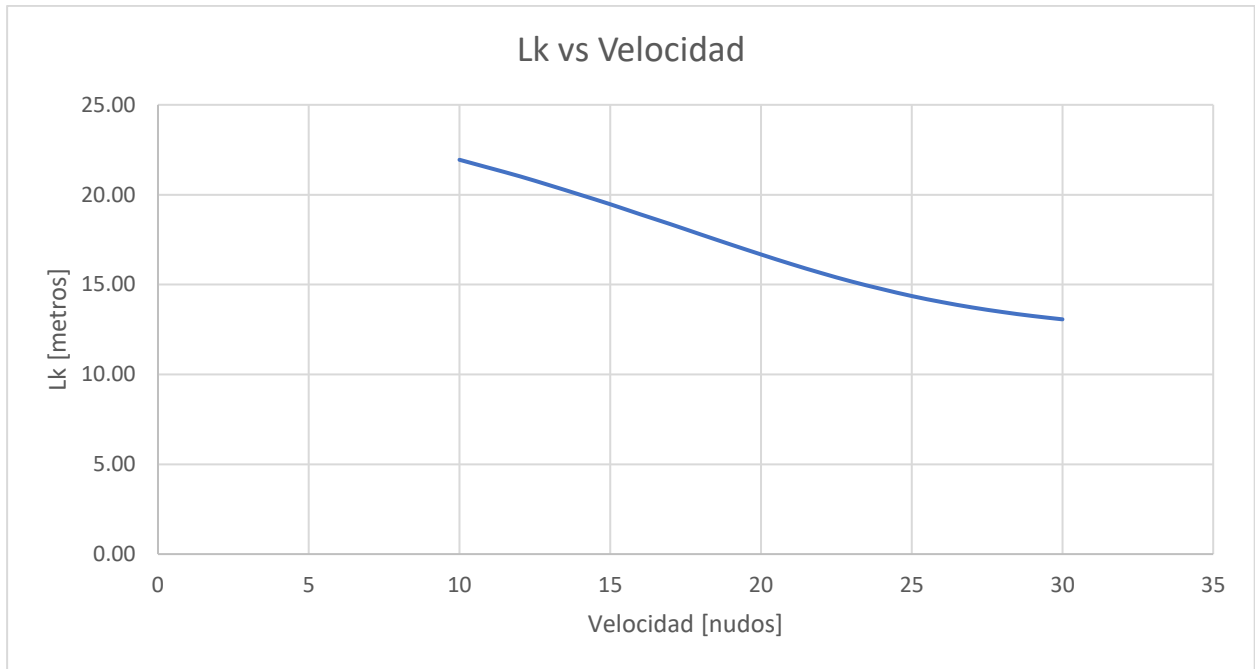


Figura L. 3 Grafica Lk vs Velocidad

```

Interislas propuesta optimizada
8.75 VOL m3
2.72 BM Chine beam at transom m
22.00 BETA
5.90 mov a Popa ?? referencia LCG desde el espejo
0.80 VCG
4.00 EPSILON, degrees, angulo empuje/quilla
1.07 f, m, dist. empuje/CG en x,
0.0 0.0 0.0 FLAPCH, FLAPSRATIO,FLAPANGLE x,y/mchina, angulo de flap
1 60 1.0 V0, VF, dvel kntos
1025.0 RHO
1.020E-6 VISCOS

```

Figura L. 4 Datos de entrada del programa Savitsky64flaps