

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Marítima y Ciencias del Mar**

**"ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE UN SISTEMA PROPULSOR CON  
BAJAS EMISIONES PARA TRANSPORTE DE PASAJEROS  
INTERISLAS DE GALÁPAGOS"**

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Naval**

Presentado por:

**Sergio Andrés Zurita Núñez**

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**Año: 2020**

## DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres Sr. Sergio Zurita S. y Sra. Blanca Núñez N. por su ejemplo de superación, y apoyo incondicional en los momentos más difíciles de mi vida.

Lo dedico a la Dra. Angie Arriaga porque a pesar del tiempo y la distancia siempre estuvo presente, siendo un pilar fundamental.

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi más sincero agradecimiento a Dios en primer lugar, a mi familia por su entrega y sacrificio, a mi mentor Cap. EMS William Vaca Ramos por direccionarme en la ruta naval donde reconocí mi gran pasión por el mar, y a las personas que han sido de gran influencia en mi desarrollo profesional.

## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Sergio Andrés Zurita Núñez* y doy mi 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"

Sergio A. Zurita Núñez

## EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:  
NADIA ROSENDA  
MUNOZ AGILA

---

**Ing. Nadia Muñoz, MSc**

PROFESOR DE LA MATERIA

A handwritten signature in black ink, consisting of the letters 'RP' in a stylized, cursive font, positioned above a horizontal line.

---

**Rubén Paredes, PhD**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

En el 2019, 31 lanchas rápidas interislas con motores fuera de borda transportaron pasajeros entre las 4 islas habitadas de Galápagos, emitieron a la atmósfera aproximadamente 16 mil toneladas de CO<sub>2</sub> dentro de este patrimonio natural. El presente trabajo exploró la posibilidad de cambiar el sistema de propulsión usado en estas lanchas que permita reducir el consumo de combustibles y emisiones de CO<sub>2</sub>. Inicialmente, el requerimiento energético de dos interislas fue establecido considerando su perfil de operación diario cuando navega, a 28 nudos, entre dos de las islas habitadas. Para esto fue necesario predecir su resistencia al avance mediante métodos semi-empíricos apropiados. A continuación, se dimensionaron de forma preliminar 7 alternativas de sistema de propulsión marinos que permitirían alcanzar el objetivo del presente trabajo.

Durante el proceso de evaluación se descartaron algunas de estas configuraciones debido a las condiciones de diseño y restricciones de espacio a bordo. Además, se identificó que el uso de motores eléctricos requiere de gran espacio para la generación y suministro de energía a bordo. Finalmente, se identificó como una alternativa técnicamente viable a los sistemas de propulsión híbridos en paralelo, que tienen poco tiempo de vida comercial. En la parte económica se identificaron los costos de adquisición, operativos, y de mantenimiento del sistema fuera de borda tradicional con el propósito compararlos con los respectivos costos del sistema híbrido en paralelo. Sin embargo, aún es necesario definir los detalles del mantenimiento de esta tecnología comercial para definir los costos necesarios que permitan tomar una decisión definitiva.

**Palabras Clave:** Sistema de propulsión híbrido, Propulsión eléctrica, Reducción de emisiones.

## **ABSTRACT**

*In 2019, 31 inter-island speedboats with outboard motors transported passengers between the 4 inhabited islands of Galapagos, emitting approximately 16 thousand tons of CO<sub>2</sub> into the atmosphere within this natural heritage. The present work explored the possibility of changing the propulsion system used in these boats that allows reducing fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions. Initially, the energy requirement of two inter-islands was established considering its daily operating profile when sailing, at 28 knots, between two of the inhabited islands. For this it was necessary to predict their resistance to advance by means of appropriate semi-empirical methods. Next, 7 marine propulsion system alternatives were preliminarily dimensioned that would allow to achieve the objective of this work.*

*During the evaluation process some of these configurations were ruled out due to design conditions and space restrictions on board. In addition, it was identified that the use of electric motors requires a large space for the generation and supply of energy on board. Ultimately, it was identified as a technically viable alternative to parallel hybrid powertrains, which have a short commercial life. In the economic part, the acquisition, operating, and maintenance costs of the traditional outboard system were identified to compare them with the respective costs of the parallel hybrid system. However, it is still necessary to define the details of the maintenance of this commercial technology to define the necessary costs that allow a final decision to be made.*

**Keywords:** *Hybrid propulsion system, Electric propulsion, Emission reduction.*

## ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES .....	5
RESUMEN .....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS .....	VI
SIMBOLOGÍA .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
CAPÍTULO 1 .....	14
1. Polucion por hidrocarburos en galapagos.....	14
1.1 Descripción del problema .....	14
1.2 Evolución de la Propulsión marina con baja huella de carbono.....	17
1.3 Antecedentes de propulsión de baja huella de carbono en Ecuador.....	20
1.3.1 Proyecto KaraSolar .....	20
1.3.2 Proyecto Solaris .....	21
1.3.3 Proyecto Génesis Solar.....	21
1.4 Objetivos.....	22
1.4.1 Objetivo General .....	22
1.4.2 Objetivos Específicos.....	23
1.5 Marco teórico.....	23
1.5.1 Sistemas de propulsión marino típicos.....	23
1.5.2 Lanchas rápidas interislas operando en Galápagos.....	24
1.5.3 Limitaciones tecnológicas del Ecuador .....	27
1.5.4 Proceso de dimensionamiento preliminar .....	29

CAPÍTULO 2.....	32
2. Metodología .....	32
2.1 Energía propulsiva efectiva.....	32
2.1.1 Perfil de operación .....	33
2.1.2 Resistencia al avance de las embarcaciones modelo .....	35
2.1.3 Cálculo de energía propulsiva efectiva.....	37
2.2 Energía propulsiva requerida.....	38
2.3 Eficiencia energética típica de los sistemas de propulsión marinos .....	40
2.3.1 Motor Principal .....	40
2.3.2 Transmisión.....	49
2.3.3 Mecanismos de propulsión marina / propulsores marinos .....	50
CAPÍTULO 3.....	55
3. Resultados Y ANÁLISIS.....	55
3.1 Selección de los motores principales.....	57
3.2 Resumen de sistemas de propulsión .....	60
3.3 Reducción de emisiones de CO2 .....	63
3.4 Verificación Técnica de Viabilidad .....	64
3.5 Sistema propulsor propuesto para lanchas rápidas con bajas emisiones.....	66
3.5.1 Cambios ocasionados en actuales lanchas interislas .....	67
3.6 Comparación de costos .....	69
CAPÍTULO 4.....	73
4. Conclusiones Y Recomendaciones.....	73
Conclusiones .....	73
Recomendaciones y trabajo futuro .....	75
BIBLIOGRAFÍA.....	76
APÉNDICES .....	81

## ABREVIATURAS

ALDEA	Asociación Latinoamericana para el Desarrollo Alternativo
BHP	Potencia al Freno
BP	British Petroleum
CE	Combustible Equivalente
DHP	Potencia en la Hélice
EHP	Potencia Efectiva
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
EPE	Energía Propulsiva Efectiva
EPR	Energía Propulsiva Requerida
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GLP	Gas Licuado de Petróleo
IHP	Potencia Instalada
INOCAR	Instituto Oceanográfico de la Armada
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
ITTC	International Towing Tank Conference
MARPOL	Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques
NAE	Nacionalidad Achuar del Ecuador
NOAA	Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PIB	Producto Interno Bruto
PRFV	Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio
SHP	Potencia al Eje
SPTMF	Subsecretaría de Puertos y Transporte Marítimo y Fluvial
THP	Potencia de Empuje
WWF	Fondo Mundial para la Naturaleza

## SIMBOLOGÍA

CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
m	Metro
m <sup>2</sup>	Metro cuadrado
m <sup>3</sup>	Metro cubico
Nm <sup>3</sup>	Metro cubico a condiciones normales
Ton	Tonelada
kg	Kilogramos
°	Grados
HP	Caballos de Potencia
in	Pulgada
mn	Milla náutica
h	Horas
min	Minutos
knots	Nudos
V	Voltio
A	Amperio
Ah	Amper hora
kW	kilovatios
kWh	kilovatios hora
MJ	Mega Julios

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Proyectos SF-BREEZE y ZERO-V (Sandia National Laboratories, 2019).	18
Figura 1.2 Soel Cruiser 11 (Soel Yachts, 2019).....	18
Figura 1.3 Frauscher 740 Mirage Air (Frauscher Shipyard, 2019).....	19
Figura 1.4 Soel Shuttle 14 (Soel Yachts, 2019). ....	19
Figura 1.5 Embarcación solar Tapiatpia (ALDEA, 2017). ....	20
Figura 1.6 Embarcación solar Solaris (WWF, 2014).....	21
Figura 1.7 Embarcación solar Génesis Solar (Moya & Arroyo, 2016).....	22
Figura 1.8 Sistema de propulsión típico.....	23
Figura 1.9 Lancha L/P El Mangle denominada modelo M. ....	25
Figura 1.10 Lancha L/P Angy denominada modelo A.....	25
Figura 1.11 Fragmento de la ruta de análisis de innovación en el Ecuador [Guaipatin & Schwartz, 2014]. ....	28
Figura 1.12 Transición de potencia en el sistema de propulsión. ....	29
Figura 2.1 Rutas (Resolución 0082-R, 2018).....	33
Figura 2.2 Perfil operacional significativo (Ruta Puerto Ayora – Puerto Villamil). ....	35
Figura 2.3 Formas típicas de casco (Claramunt & Granados, 2018). ....	36
Figura 2.4 Curvas de resistencia de Modelo M y Modelo A.....	36
Figura 2.5 Trimado dinámico y su influencia sobre la resistencia al avance.....	37
Figura 2.6 Esquema de sistema propulsor típico (VOLVO PENTA, 2020). ....	40
Figura 2.7 Motores típicos en lanchas menores de 30 Ton (Fuente propia).....	41
Figura 2.8 Esquema de sistema de propulsión con banco de baterías (TORQEEDO, 2020).....	44
Figura 2.9 Esquema de sistema de propulsión con paneles solares (TORQEEDO, 2020).....	46
Figura 2.10 Componentes del sistema de propulsión con H2 Fuel Cell (TORQEEDO, 2020).....	47
Figura 2.11 Ejemplos de transmisión Z-drive y POD (YAMAHA, 2020)(VOLVO PENTA, 2020).....	49

Figura 2.12 Hélice de sección segmentada de cara plana, KCA Series (YAMAHA, 2020).....	51
Figura 2.13 Partes principales de un WaterJet (Bulten, 2006).....	52
Figura 2.14 Empuje requerido a una velocidad determinada (HOLEDECK, 2017)....	54
Figura 3.1 Curva de IHP para dimensionamiento de alternativas de propulsión .....	57
Figura 3.2 Esquema sistema propulsivo híbrido en serie (Matijasevic et al., 2013)...	59
Figura 3.3 Esquema sistema propulsivo híbrido en paralelo (Matijasevic et al., 2013). .....	60
Figura 3.4 Esquema del sistema de propulsión Volvo Penta Híbrido (VOLVO PENTA, 2020).....	65
Figura 3.5 Control del sistema de propulsión (VOLVO PENTA, 2020). .....	66
Figura 3.6 Vista de perfil de la instalación del nuevo sistema vs el actual.....	68
Figura 3.7 Vista superior de la instalación del nuevo sistema vs el actual.....	69
Figura 4.1 Eficiencia de Hélice P/D = 1.2, 0.5 BAR. ....	84
Figura 4.2 Eficiencia de Hélice P/D = 1.2, 0.65 BAR. ....	85
Figura 4.3 Eficiencia de Hélice P/D = 1.2, 0.8 BAR. ....	85
Figura 4.4 Eficiencia de Hélice P/D = 1.2, 1 BAR. ....	85
Figura 4.5 Eficiencia de Hélice P/D = 1.2, 1.1 BAR. ....	86
Figura 4.6 Eficiencia de Hélice P/D = 1, 0.5 BAR. ....	86
Figura 4.7 Eficiencia de Hélice P/D = 1, 0.65 BAR. ....	86
Figura 4.8 Eficiencia de Hélice P/D = 1, 0.8 BAR. ....	87
Figura 4.9 Eficiencia de Hélice P/D = 1, 1 BAR. ....	87
Figura 4.10 Eficiencia de Hélice P/D = 1, 1.1 BAR. ....	87
Figura 4.11 IHP requerido por el Modelo A.....	88
Figura 4.12 Motor eléctrico estacionario seleccionado marca TEMA (TEMA Marine, 2019).....	89
Figura 4.13 Batería Torqueedo modelo i3 seleccionada (TORQEEDO, 2020).....	90
Figura 4.14 Panel solar seleccionado. ....	91
Figura 4.15 Irradiación solar mensual total en Galápagos (Meteonorm, 2019). ....	91
Figura 4.16 Celda H2 Fuel Cell seleccionada (Ballard, 2019). ....	92
Figura 4.17 Tanque seleccionado para almacenamiento de hidrogeno a presión.....	93
Figura 4.18 Grupo electrógeno seleccionado (VOLVO PENTA, 2020).....	95

Figura 4.19 Espacio disponible para sistema de propulsión.....	96
Figura 4.20 Motor sugerido como alternativa (TORQEEDO, 2020).....	97
Figura 4.21 Impacto de reducción de velocidad.....	98
Figura 4.22 Impacto de la reducción de velocidad sobre el tiempo de navegación... ..	98
Figura 4.23 Ahorro de energía debido a la reducción de velocidad. ....	99

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Sistemas típicos utilizados en lanchas rápidas de menos de 50 Ton .....	24
Tabla 1.2 Características principales. ....	25
Tabla 1.3 Coeficientes de formas. ....	26
Tabla 1.4 Información del sistema de propulsión instalado Modelo M. ....	26
Tabla 1.5 Información del sistema de propulsión instalado Modelo A. ....	26
Tabla 2.1 Distancias entre puertos poblados (INOCAR, 2005). ....	34
Tabla 2.2 Perfil operacional Puerto Ayora – Puerto Villamil. ....	34
Tabla 2.3 Calculo de EPE de modelo A. ....	38
Tabla 2.4 Rendimientos del sistema propulsor actualmente instalado. ....	39
Tabla 2.5 EPR y transición de potencias de modelo A .....	39
Tabla 2.6 Principio de funcionamiento de los motores. ....	41
Tabla 2.7 Eficiencia energética de los motores. ....	42
Tabla 3.1 Tipos de sistemas de propulsión identificadas para lanchas menores de 30 toneladas. ....	55
Tabla 3.2 Opciones consideradas en el análisis de viabilidad .....	56
Tabla 3.3 Motores principales seleccionados para cada opción de sistema de propulsión. ....	58
Tabla 3.4 Especificaciones técnicas preliminares. ....	61
Tabla 3.5 Resumen de componentes principales .....	61
Tabla 3.6 Proveedores más cercanos de los motores seleccionados y sugeridos. ...	62
Tabla 3.7 Facilidades de adquisición, operación y mantenimiento. ....	62
Tabla 3.8 Emisiones equivalentes por EPR de Modelo A. ....	64
Tabla 3.9 Matriz de validación técnica del sistema de propulsión. ....	65
Tabla 3.10 Sistema de propulsión seleccionado. ....	66
Tabla 3.11 Costos operativos típicos en las interislas. ....	69
Tabla 3.12 Frecuencia de mantenimiento para fuera de borda (Torralvo Jiménez, 2011). ....	70
Tabla 3.13 Costos operativos de un sistema fuera de borda en una interislas. ....	71
Tabla 3.14 Comparación de costos operativos aproximados. ....	71
Tabla 4.1 Hélices de serie KCA de características similares a las de Modelo A. ....	83

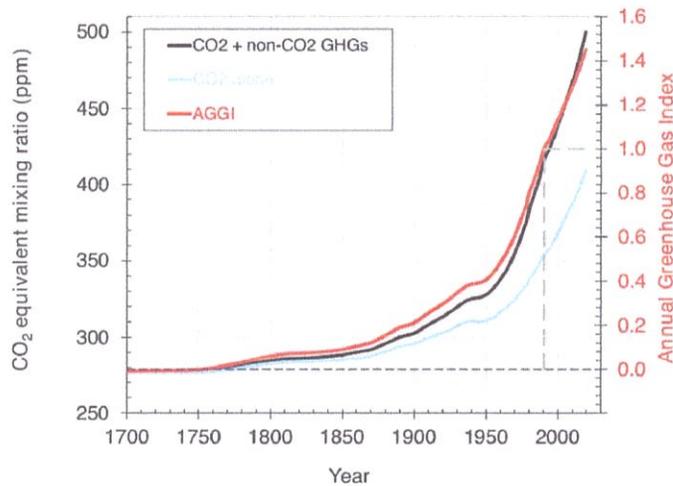
Tabla 4.2 Hélices de serie KCA de características similares a las de Modelo M. ....	84
Tabla 4.3 Calculo de capacidad mínima del banco de baterías.....	89
Tabla 4.4 Características batería ion-litio seleccionada.....	90
Tabla 4.5 Cantidad de baterías requeridas.....	90
Tabla 4.6 Características panel solar seleccionado.....	91
Tabla 4.7 Calculo de cantidad de paneles requeridos .....	92
Tabla 4.8 Características celda de hidrogeno seleccionada.....	93
Tabla 4.9 Calculo de cantidad de celdas de hidrogeno requeridas.....	93
Tabla 4.10 Características tanque seleccionado. ....	94
Tabla 4.11 Calculo de masa del hidrogeno requerido (Asociacion Española de Hidrogeno, 2020). ....	94
Tabla 4.12 Características grupo electrógeno. ....	95
Tabla 4.13 Resumen de componentes de los sistemas eléctricos.....	96
Tabla 4.14 Motor eléctrico sugerido.....	97
Tabla 4.15 Costos aproximados de los sistemas eléctricos.....	99
Tabla 4.16 Proveedores locales e internacionales contactados .....	100
Tabla 4.17 Armadores de lanchas interislas contactados.....	100

# CAPÍTULO 1

## 1. POLUCION POR HIDROCARBUROS EN GALAPAGOS

### 1.1 Descripción del problema

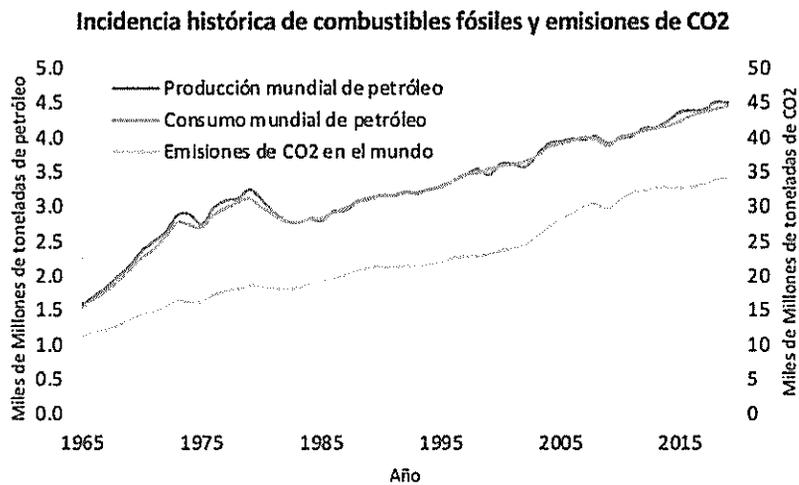
El uso de combustibles y la deforestación han incrementado progresivamente la concentración de gases de efecto invernadero "GEI", hasta alcanzar las 500 partes por millón en la atmósfera para enero del 2020, como se muestra en la Gráfica 1.1. Los GEI como el CO<sub>2</sub> en la concentración actual tienen un impacto negativo pues incrementan la temperatura del planeta por lo que es prioritario controlar esta polución para preservar el equilibrio de ecosistemas únicos como el de la Reserva Marina Galápagos. El incremento de emisiones anuales está acelerando la tasa de crecimiento de la concentración de CO<sub>2</sub>, tan solo en Ecuador se liberaron 37,1 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> en el 2018 (BP, 2020).



Gráfica 1.1 Histórico de concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (NOAA Research, 2020).

Este aumento sostenido de la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférica, ver Gráfica 1.2, ha motivado a Organismos Internacionales a impulsar iniciativas para reducir la emisión de gases de efecto invernadero. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático "IPCC", creado

por la ONU en 1988, recientemente concluyó que es prioritario alcanzar una reducción a los altos índices de emisión de GEI debido a sus consecuencias en el cambio climático (IPCC, 2014). Posteriormente, 193 países adoptaron la Agenda de 2030 y sus 17 Objetivos para el Desarrollo Sostenible (ODS) luego de la aprobación del Acuerdo de París (ONU, 2019). El Acuerdo de París tiene como objetivo evitar que el incremento de la temperatura media global del planeta supere los 2°C respecto a los niveles preindustriales.

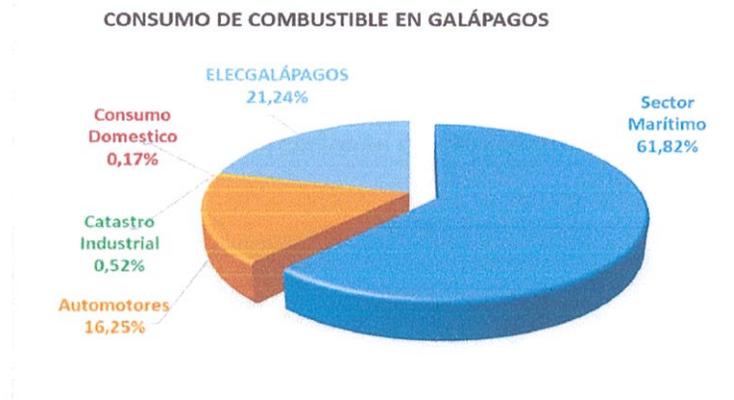


**Gráfica 1.2 Hidrocarburos y las emisiones de CO2 en el mundo (BP, 2020).**

En el ámbito marítimo, la Organización Marítima Internacional, como parte de la ONU, adopta y promueve estas iniciativas (OMI, 2018). Específicamente, plantea respecto del 2008 reducir un 50% la emisión de gases de efecto invernadero para el año 2050 como parte de la Agenda del 2030 (Hu et al., 2019). El estado ecuatoriano, como estado miembro de la ONU y país que suscribe los convenios de la OMI, tiene planificado sumarse al cumplimiento de la Agenda de 2030 para el desarrollo sostenible, y en virtud del Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques "MARPOL" reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero "GEI" del sector marítimo.

Recientemente, el gobierno ecuatoriano implementó el programa Cero Combustibles Fósiles en Galápagos para promover su desarrollo sostenible y disminuir el riesgo de afectar su frágil ecosistema relacionado con el traslado y procesamiento de derivados del petróleo (Decreto Ejecutivo 270, 2007). Con este programa se pretende reducir la dependencia energética del Archipiélago con el continente, promoviendo la generación de energía eléctrica utilizando fuentes renovables, optimizando la red de conectividad y el transporte marítimo y terrestre (Plan de Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial Del Régimen Especial de Galápagos, 2016).

A pesar de los proyectos implementados bajo este programa, en el 2019 se comercializaron aproximadamente 13 millones de galones de diésel premium y 4 millones de galones de gasolina extra para cubrir las necesidades energéticas de los habitantes y turistas. Los mismos fueron destinados en un 0,17% al consumo doméstico, 0,52% al catastro industrial (sector productivo), 21,24% a la generación de energía eléctrica, 16,25% al transporte terrestre, y 61,82 % al sector marítimo (Dirección Regional ARCH-Galápagos, 2020), como se muestra en la Gráfica 1.3. Es decir, el sector marítimo operando en esta reserva marina es el mayor consumidor de combustibles, el cual está compuesto por más de 800 embarcaciones. Uno de los grupos que más consume gasolina está conformado por cerca de 50 embarcaciones rápidas de transporte de pasajeros conocidas como "Interislas". Las mismas que tienen aproximadamente 12 metros de eslora, capacidad de 25 a 30 pasajeros, y en promedio recorren cerca de 100 millas náuticas a una velocidad de 28 nudos por día (Subsecretaría de Puertos y Transporte Marítimo y Fluvial, 2020).



**Gráfica 1.3 Combustibles en Galápagos** (Dirección Regional ARCH-Galápagos, 2020).

## 1.2 Evolución de la Propulsión marina con baja huella de carbono

En los últimos dos siglos, la industria naval ha explorado la posibilidad de reducir o reemplazar el uso de combustibles fósiles para propulsar embarcaciones, con resultados muy prometedores (Skjong et al., 2015). Una de las primeras propuestas para propulsar embarcaciones pequeñas con un motor eléctrico alimentado por un banco de baterías fue desarrollada en Rusia en 1830. Este sistema propulsor impulsó una embarcación fluvial de 8 metros de eslora con capacidad de transportar 14 pasajeros a una velocidad de 3 nudos, pero con autonomía muy limitada. Desde entonces se han desarrollado varias alternativas con el potencial de reducir las emisiones de GEI, como por ejemplo: turbinas de GLP, motores híbridos, generadores nucleares, e incluso gigantescos bancos de baterías de ion litio para impulsar buques de diferentes tamaños y propósitos (Kumar & Zare, 2019).

Las soluciones tecnológicas que eliminan por completo las emisiones de carbono no han tenido acogida en el sector marítimo debido principalmente a las bajas velocidades alcanzadas, su limitada potencia de empuje, y autonomía. Sin embargo, recientemente se ha confirmado la factibilidad de dos proyectos que usan tecnología de cero emisiones mediante el uso de celdas de hidrógeno: i) el ferry SF-BREEZE en San Francisco (USA) para 150 pasajeros con aproximadamente 135 Ton de desplazamiento, ver Figura 1.1 (Pratt & Klebanoff, 2016), y ii) el Buque de investigación de celdas de hidrógeno Zero-V

de aproximadamente 1194 Ton de desplazamiento, ver Figura 1.1 (Madsen & Mccauley, 2017). Estos buques aplican tecnologías de alta eficiencia recientemente desarrolladas, en algunos casos experimentales o hechas a medida. Ambas propuestas podrían ser clasificadas como soluciones para embarcaciones de desplazamiento.



**Figura 1.1 Proyectos SF-BREEZE y ZERO-V** (Sandia National Laboratories, 2019).

En lo que respecta a embarcaciones menores, existen varios proyectos que han logrado la navegación en modo cero emisiones, con limitaciones en la autonomía, velocidad, y capacidad de carga. Algunos de las mejores propuestas comerciales actuales son:

- i. Lancha solar "Soel Cruiser 11" para 12 pasajeros con autonomía de 15 millas náuticas a 11 nudos y una velocidad máxima de 14 nudos, ver Figura 1.2 (Soel Yachts, 2019).



**Figura 1.2 Soel Cruiser 11** (Soel Yachts, 2019).

- ii. Lancha alimentada por baterías ion litio de alta densidad "Frauscher 740 Mirage Air" para 8 pasajeros con autonomía de 110 millas náuticas a 6 nudos y una velocidad máxima 26 nudos, ver Figura 1.3 (Frauscher Shipyard, 2019).



**Figura 1.3 Frauscher 740 Mirage Air** (Frauscher Shipyard, 2019).

- iii. Catamarán solar "Soel Shuttle 14" para 30 pasajeros con autonomía de 45 millas náuticas a 8 nudos y una velocidad máxima de 14 nudos, ver Figura 1.4 (Soel Yachts, 2019).



**Figura 1.4 Soel Shuttle 14** (Soel Yachts, 2019).

Estas propuestas no podrían ser implementadas sin modificaciones en Galápagos para operar como las interislas, porque implicaría triplicar el tiempo de navegación para los casos con autonomía mayor a las 40 millas náuticas. Por lo tanto, es necesario determinar la combinación de tecnologías cero emisiones que permita alcanzar la autonomía requerida de cada viaje, sin reducir significativamente la velocidad crucero, ni perder capacidad de carga.

### 1.3 Antecedentes de propulsión de baja huella de carbono en Ecuador

Las Interislas por su papel dentro del desarrollo de los puertos poblados de Galápagos operan diariamente (Resolución 0082-R, 2018), transformándolo en un importante rubro en el consumo de combustible y generación de GEI en este Archipiélago. Por otro lado, existen casos exitosos implementados en Ecuador que lograron reducir o eliminar la emisión de GEI modificando el sistema de propulsión.

#### 1.3.1 Proyecto KaraSolar

Este proyecto fue impulsado por la Asociación Latinoamericana para el Desarrollo Alternativo (ALDEA) y la Nacionalidad Achuar del Ecuador (NAE). La primera embarcación, ver Figura 1.5, de este proyecto inició operaciones en la Amazonia ecuatoriana como transporte social comunitario para la población Achuar en marzo de 2017 (ALDEA, 2017).



Figura 1.5 Embarcación solar Tapiatpia (ALDEA, 2017).

Esta embarcación es similar a las usadas en la región, y tiene 16 m de eslora, 2.15 m de manga, con una capacidad para transportar 18 pasajeros. El sistema propulsor está compuesto por: 2 motores fuera de borda eléctricos marca Torqueedo, y su suministro energético es generado con 32 paneles fotovoltaicos ( $64\text{m}^2$ ) y almacenado en 12 baterías. Por su funcionalidad y servicio social el proyecto ha sido ampliamente galardonado y en la actualidad está gestionando fondos para construir una segunda embarcación (Arribas & Amador, 2017).

### 1.3.2 Proyecto Solaris

Este proyecto fue impulsado por el Ministerio del Medio Ambiente a través del Parque Nacional Galápagos y financiada por el Fondo Mundial para la Naturaleza “WWF”. Se construyó una embarcación de 11 pasajeros que inició operaciones en las Islas Galápagos como Taxi acuático para turistas en junio de 2014, realizando recorridos cortos dentro de la rada de Puerto Ayora (Moya & Arroyo, 2016).



**Figura 1.6 Embarcación solar Solaris** (WWF, 2014).

Esta embarcación de 7.5m de eslora y 1.85m de manga, tiene capacidad para transportar 11 pasajeros, cuenta con un motor fuera de borda eléctrico de 4kW que desarrolla velocidades de hasta 7 nudos, y su suministro energético es generado con ocho paneles fotovoltaicos y almacenado en 2 baterías de litio para una autonomía de 4 horas. Por su funcionalidad la embarcación demostró la viabilidad de embarcaciones con sistemas de propulsión de baja emisión de carbono dando paso al proyecto “Génesis Solar” (Arribas & Amador, 2017).

### 1.3.3 Proyecto Génesis Solar

La embarcación construida por este proyecto, impulsado por el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER), inició operaciones en el canal de Itabaca en julio de 2015 para transportar pasajeros entre las Islas Baltra y Santa Cruz (Moya & Arroyo, 2016).



**Figura 1.7 Embarcación solar Génesis Solar** (Moya & Arroyo, 2016).

Esta embarcación es de tipo catamarán, tiene 15.4 m de eslora y 6.4 m de manga, y tiene capacidad para transportar 42 pasajeros. Además, cuenta con dos motores in-board de 10kW que le permite desarrollar velocidades de hasta 5 nudos, y su suministro energético consta de 15 de paneles fotovoltaicos y 16 baterías de litio-ferrofosfato (Moya & Arroyo, 2016).

De los proyectos descritos se comprendió que existe la posibilidad de implementar sistemas de propulsión marina que no produzcan emisiones y además ayuden a preservar el medio ambiente, pero se tendrían que verificar la existencia de limitaciones, requerimientos de operación, y factores geográficos típicos de la zona.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Establecer la factibilidad para la implementación de un sistema propulsor con baja huella de carbono en la flota de transporte público Interislas de Galápagos, a través del análisis de factores técnicos y económicos.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

1. Establecer la demanda energética de la operación diaria de dos lanchas existentes para el transporte público Interislas.
2. Identificar los componentes del sistema de propulsión marino que logre minimizar las emisiones de carbono en Galápagos.
3. Verificar la viabilidad técnica del sistema propuesto para satisfacer los requerimientos de diseño.
4. Identificar el impacto económico por el cambio de sistema propulsivo en una embarcación existente.

## 1.5 Marco teórico

### 1.5.1 Sistemas de propulsión marino típicos

El sistema de propulsión marino, a partir de una fuente de energía, genera la fuerza de empuje necesaria para mover la embarcación a una determinada velocidad. Las partes principales de un sistema de propulsión típico son motor principal, transmisión, y propulsor, ver Figura 1.8. Esta alternativa tecnológica es clasificada como Out-Board o In-Board dependiendo de la ubicación del motor principal en la embarcación.

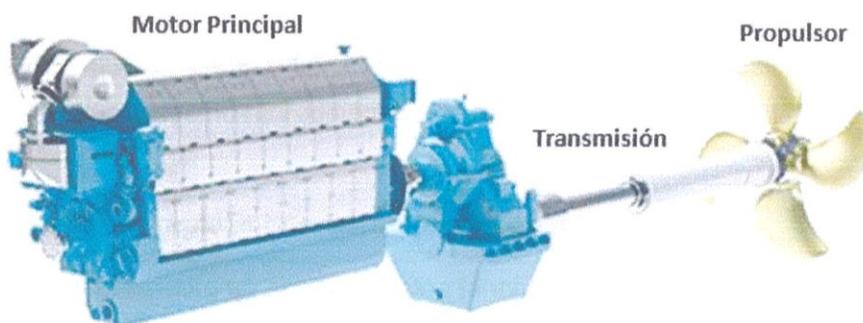


Figura 1.8 Sistema de propulsión típico.

La diversidad observada en los sistemas de propulsión instalados en las embarcaciones se debe esencialmente a la variación de los componentes de las partes principales que son seleccionados según la operación específica

del buque. En este trabajo se ha identificado para lanchas rápidas de menos de 30 toneladas el uso típico de los sistemas descritos en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1 Sistemas típicos utilizados en lanchas rápidas de menos de 50 Ton**

Motor Principal	Fuente de energía	Transmisión	Propulsor	Disposición	Cantidad
Combustión interna	Combustibles fósiles	Compacto con el sistema	Hélice	Out-board	1 – 4
Combustión interna	Combustibles fósiles	Reductor + Eje	Hélice	In-Board	1 – 3
Combustión interna	Combustibles fósiles	Reductor + Eje	Water Jet	In-Board	1 – 3
Eléctrico	Química - Solar Hidrogeno	Drive	Hélice	In-Board	1 – 2
Hibrido	Combustibles fósiles - Química	Reductor + Eje / Drive	Hélice	In-Board	1 – 2
Hibrido	Combustibles fósiles - Química	Reductor + Eje / Drive	Water Jet	In-Board	1 – 2

La propulsión LNG no es aplicable en estas embarcaciones por el alto costo y requerimiento de espacio de estos sistemas (Fernández et al., 2017). Además, existen otros sistemas en desarrollo para lanchas rápidas que no serán tomados en cuenta en este estudio debido a que no son tecnologías comerciales, como los sistemas de impulso lineal rotativo, de electromagnetismo-hidrodinámico, entre otros (Martínez, 2011).

### 1.5.2 Lanchas rápidas interislas operando en Galápagos

Para este estudio se analizaron dos lanchas interislas actualmente operando en Galápagos como base para el dimensionamiento preliminar de los sistemas de propulsión considerados como alternativas. Estas interislas son la L/P “El Mangle” en adelante llamada “Modelo M”, ver Figura 1.9; y la L/P “Angy” de ahora en adelante llamada “Modelo A”, ver Figura 1.10.

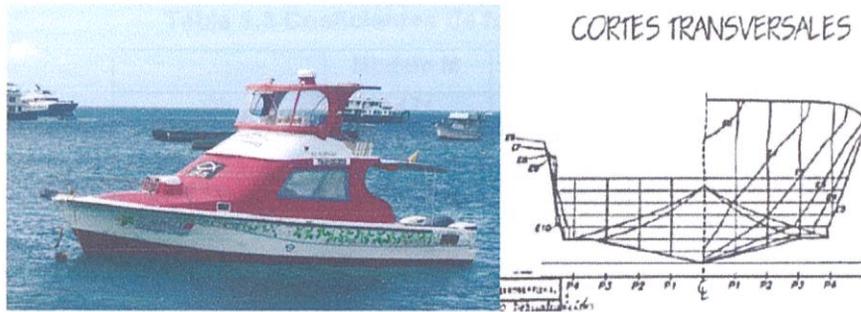


Figura 1.9 Lancha L/P El Mangle denominada modelo M.

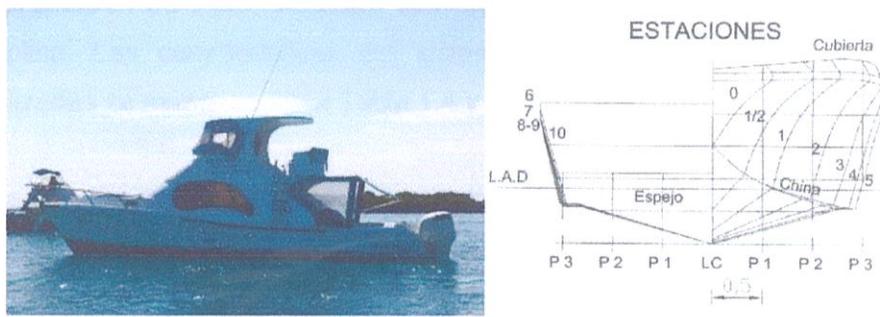


Figura 1.10 Lancha L/P Angy denominada modelo A.

Las formas de los cascos de las embarcaciones base son típicas de embarcaciones planeadoras. La Tabla 1.2 muestra las características principales, y la Tabla 1.3 resume los coeficientes de formas para el calado.

Tabla 1.2 Características principales.

	Modelo M	Modelo A
Eslora (m)	13,5	12,02
Eslora mojada(m)	11,56	11,00
Manga (m)	4	3,45
Manga mojada (m)	3,62	3,08
Puntal (m)	1,6	1,51
Calado (m)	0,45	0,51
Capacidad de pasajeros	34	29
Volumen (m <sup>3</sup> )	8,89	8,58
Desplazamiento (Ton)	9,11	8,79
$\beta$ (°)	13	15

**Tabla 1.3 Coeficientes de formas.**

	Modelo M	Modelo A
Cb	0,471	0,496
Cp	0,693	0,768
Cx	0,682	0,646
Cw	0,747	0,756

### **1.5.2.1 Sistema de propulsión actual**

En la actualidad, las embarcaciones interislas en Galápagos utilizan sistemas de propulsión de triple out-board con motor de combustión en 4 tiempos a gasolina. Las características del sistema de propulsión de las lanchas analizadas se muestran en la Tabla 1.4 y Tabla 1.5.

**Tabla 1.4 Información del sistema de propulsión instalado Modelo M.**

	Potencia (HP)	Nº Palas	Diámetro (in)	Paso (in)
Motor babor (HP)	300	3	15.5	17
Motor crujía (HP)	350	3	16	17
Motor Estribor (HP)	300	3	15.5	17

**Tabla 1.5 Información del sistema de propulsión instalado Modelo A.**

	Potencia (HP)	Nº Palas	Diámetro (in)	Paso (in)
Motor babor (HP)	300	3	15.5	17
Motor crujía (HP)	250	3	16	18.5
Motor Estribor (HP)	300	3	15.5	17

### **1.5.2.2 Aplicabilidad de biocombustibles**

Los biocombustibles son una alternativa comercial disponible en el Ecuador para todas las industrias locales. Por lo que fue considerado como una fuente de energía alternativa para disminuir las emisiones de GEI en las interislas. Este biocarburante es el resultado de la mezcla de combustibles fósiles con combustibles de origen orgánico. Para tomar una decisión sobre su uso en sistemas de propulsión marina con motores de combustión es necesario

identificar las ventajas y desventajas de esta fuente de energía en el sector naval.

Las siguientes ventajas sobre los combustibles fósiles sin mezclar han sido identificadas (Torralvo Jiménez, 2011):

- Tienen mayor octanaje.
- Requieren de una relación aire-combustible más baja.

Sin embargo, estos combustibles presentan las siguientes desventajas:

- Debido a su composición química, tienen una acción solvente afectando a los tanques de combustible fabricados con materiales plásticos reforzados con fibra de vidrio PRFV.
- Los combustibles orgánicos, por su afinidad química suelen mezclarse con el agua del condensado dentro de los tanques, provocando una separación de fase de los bio-combustibles. Esto genera que la mezcla de agua con combustible orgánico se decante en el fondo del tanque, afectando al sistema de combustible y al motor.

### **1.5.3 Limitaciones tecnológicas del Ecuador**

La transferencia de tecnología hacia el Ecuador depende de la cooperación del Estado, Sector Privado y Academia. Sin embargo, las políticas estatales limitan la innovación, asignando un presupuesto de 0.35% del PIB para Investigación y Desarrollo. Por esta razón, la responsabilidad de innovar recae principalmente sobre el sector privado, a pesar de las políticas de Ecuador, donde aproximadamente el 45% de las empresas sobreviven más de 10 años, ver Figura 1.11 (Guaipatin & Schwartz, 2014).

Debido a estos factores, Ecuador tiene innegables limitaciones para fomentar cualquier tipo de desarrollo tecnológico. Sin embargo, la academia y el sector privado lideran la investigación y desarrollo luchando por crear innovación. La principal fuente de transferencia de tecnología proviene de la importación de bienes desde otros países, pero los elevados aranceles incrementan sus costos y han provocado que en el mercado ecuatoriano exista una escasa

representación de productos y marcas, afectando directamente a la industria naval.

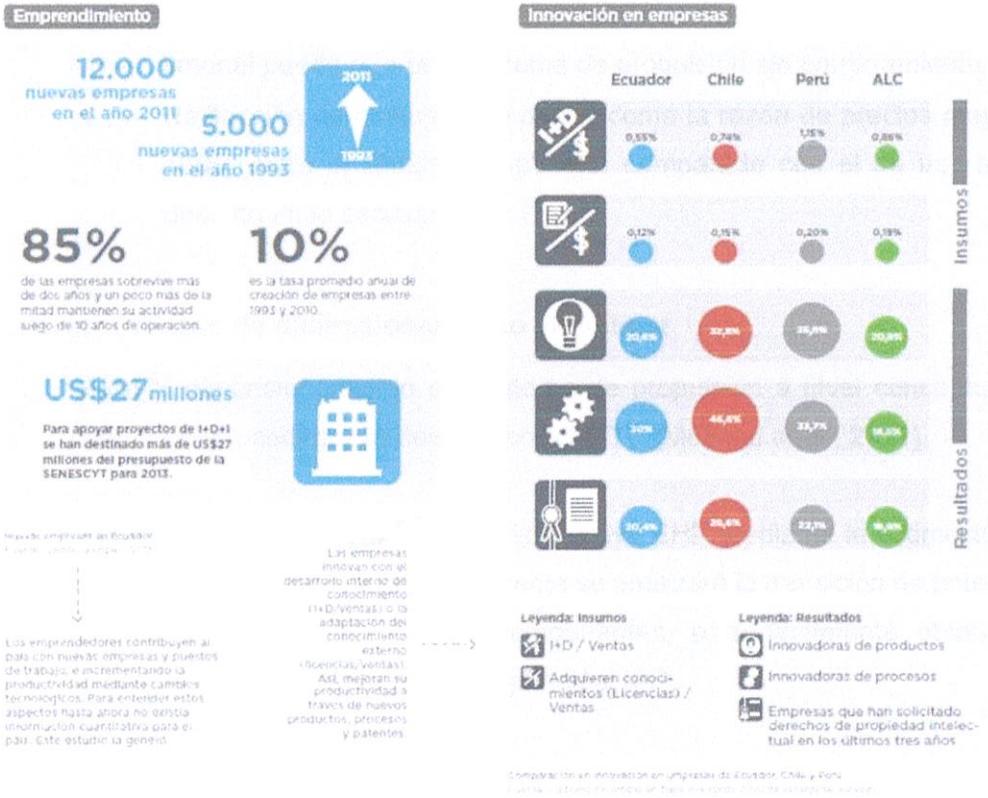


Figura 1.11 Fragmento de la ruta de análisis de innovación en el Ecuador [Guaipatin & Schwartz, 2014].

Sea cual fuere el resultado de este estudio de factibilidad, todos los componentes requeridos para un sistema de propulsión deben ser importados desde otros países y posteriormente trasladados a las Islas Galápagos, por lo cual dentro de este análisis se tomarán en cuenta algunos factores de restricción tecnológica relacionados:

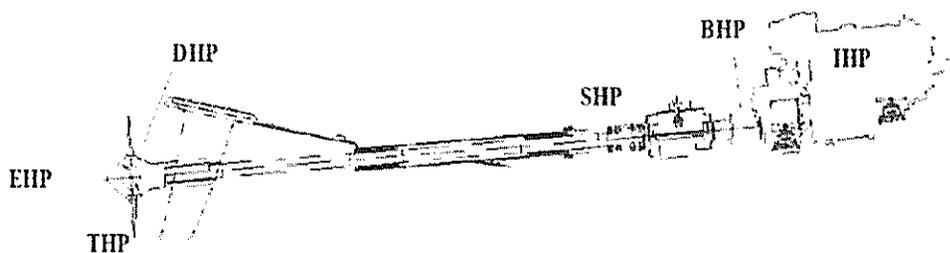
- Restricción de acceso/disponibilidad comercial local. - se define como la ausencia de representación de marcas o proveedores en el Ecuador que puedan facilitar la adquisición de los equipos o sus repuestos.

- Restricción de mantenimiento. - se define como la necesidad de personal entrenado especializado para realizar mantenimientos básicos o preventivos.
- Restricción de operación. - se define como la dificultad para que el timonel pueda operar el sistema de propulsión sin entrenamiento.
- Restricción de costos. – se define como la razón de precios mayor al 100% entre el sistema propuesto, comparado con el de uso actual descrito en la sección 1.5.2.1.

#### 1.5.4 Proceso de dimensionamiento preliminar

Para el dimensionamiento del sistema de propulsión a nivel conceptual se seguirá el procedimiento descrito por el ITTC (Molland et al., 2011).

Primero, se determinará la potencia efectiva EHP mediante la estimación de resistencia al avance, y posteriormente se analizará la transición de potencias debido al rendimiento de los componentes, para finalmente obtener la potencia requerida de la maquina principal IHP.



**Figura 1.12 Transición de potencia en el sistema de propulsión.**

En la Figura 1.12 se muestra la transmisión de la potencia dentro de un sistema propulsor típico, para identificar las pérdidas de energía por rozamiento entre los componentes.

El procedimiento de cálculo sugerido por el ITTC para obtener la potencia requerida de la maquina instalada (Molland et al., 2011) detalla paso a paso como pasar de Resistencia al avance a IHP, incluyendo las eficiencias necesarias. Tal como se muestra a continuación:

1. Cálculo de la resistencia al avance ( $R_t$ ) utilizando un método semi-empírico apropiado.

2. Cálculo de la potencia efectiva (EHP).

$$EHP = R_t \times v \quad (1.1)$$

Donde:

$R_t$ : Resistencia total al avance.

$v$ : Velocidad del buque.

3. Cálculo potencia entregada a la hélice (DHP).

$$DHP = \frac{EHP}{\eta_D} \quad (1.2)$$

Donde:

$\eta_D$ : Rendimiento cuasi-propulsivo.

4. Cálculo del rendimiento cuasi-propulsivo.

$$\eta_D = \eta_o \eta_R \eta_H \quad (1.3)$$

Donde:

$\eta_o$ : Rendimiento de la hélice en aguas abiertas.

$\eta_R$ : Rendimiento rotativo relativo.

$\eta_H$ : Rendimiento del casco, definido por la ecuación 1.4.

$$\eta_H = \frac{1-t}{1-w} \quad (1.4)$$

Donde:

w: coeficiente de estela.

t: coeficiente de succión.

5. Potencia al freno (BHP).

$$BHP = \frac{DHP}{\eta_M} \quad (1.5)$$

Donde:

$\eta_M$ : Rendimiento mecánico.

6. Potencia Instalada (IHP).

$$IHP = BHP \times F_s \quad (1.6)$$

Donde:

Fs: Factor de seguridad por los márgenes de potencia de servicio.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

El análisis técnico, necesario para establecer la factibilidad de implementación de un sistema de propulsión con baja huella de carbono, fue realizado mediante la comparación del diseño preliminar de sistemas típicamente utilizados en lanchas de menos de 30 toneladas con el potencial de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Para el diseño preliminar de los sistemas de propulsión, se estimó la potencia requerida por los modelos A y M a partir de las predicciones de la resistencia al avance utilizando el método de Savitsky del 64 (Savitsky, 1964). Luego, se escogió al modelo A como la interisla representativa de la flota operando en Galápagos considerando sus características principales. Por esta razón, solamente el modelo A fue usado para establecer la demanda energética propulsiva de un día completo de operación.

Finalmente, se dimensionaron siete sistemas de propulsión incluyendo su fuente de suministro de energía considerando los valores de potencia y energía propulsiva requerida previamente calculadas. Además, se estimó la masa de CO<sub>2</sub> emitida por el consumo respectivo de cada tipo de combustible y se verificó la capacidad de reducción de emisiones de cada una de las alternativas de propulsión en comparación con el sistema actualmente utilizado en las interislas.

### 2.1 Energía propulsiva efectiva

La Energía Propulsiva Efectiva "EPE" representa la energía necesaria para navegar un determinado tiempo a una velocidad dada, este valor va acorde a cada una de las actividades del perfil de operaciones descrito en la Sección 2.1.1. Para cada actividad la energía es definida como el producto del tiempo de remolque o propulsión a una determinada velocidad, multiplicada por la potencia efectiva requerida para alcanzarla, tal como se muestra en la ecuación 2.1.

$$EPE = EHP \times t \quad (2.1)$$

Donde:

EPE: energía propulsiva efectiva en kWh.

EHP: potencia efectiva en kW.

t: tiempo de propulsión a una determinada velocidad.

Debido a las pérdidas internas del sistema, la EPE no representa la energía que se debe entregar al sistema para la propulsión, ver Figura 1.12.

### 2.1.1 Perfil de operación

Para calcular el requerimiento de energía propulsiva efectiva "EPE", se estableció el perfil de operación diario de las lanchas interislas en Galápagos, partiendo de la información obtenida de las embarcaciones Modelo M y Modelo A, y las rutas definidas por la Subsecretaría de Puertos y Transporte Marítimo y Fluvial (Resolución 0082-R, 2018).



**Figura 2.1 Rutas** (Resolución 0082-R, 2018).

**Tabla 2.1 Distancias entre puertos poblados (INOCAR, 2005).**

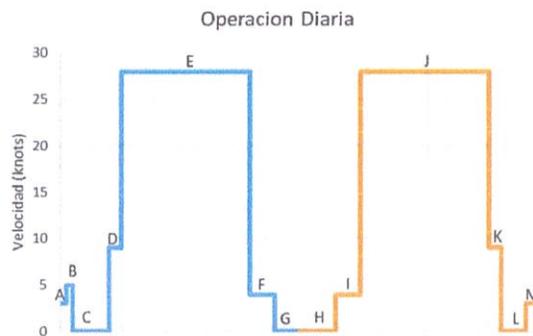
Ruta	Distancia (millas náuticas)	Tiempo típico de operación diario (min)
Puerto Ayora – Puerto Villamil	44 millas náuticas	390
Puerto Ayora – Puerto Baquerizo Moreno	44 millas náuticas	375
Puerto Ayora – Isla Floreana	40 millas náuticas	300

La Tabla 2.1 presenta la distancia de navegación de las rutas típicas según datos del INOCAR, y el tiempo promedio de operación diario para una travesía completa según datos obtenidos de armadores de las interislas, este tiempo corresponde al recorrido del doble de la distancia más las maniobras dentro de la rada. El perfil operacional consiste en el desglose de las velocidades a las que la lancha se desplaza en cada maniobra con los respectivos tiempos que tarda en realizarlo. La Tabla 2.2 muestra el perfil operacional típico para una las rutas realizadas por las interislas.

**Tabla 2.2 Perfil operacional Puerto Ayora – Puerto Villamil.**

Operación / Maniobra		V (nudos)	t (min)	Autonomía (mn)
Ida	Maniobra de combustible A	3	5	0,25
	Traslado a zona de embarque B	5	5	0,42
	Embarque de pasajeros C	0	30	0
	Salida de la rada D	9	10	1,50
	Navegación entre islas E	28	105	49,00
	Ingreso a la rada F	4	20	1,33
	Desembarque de pasajeros G	0	20	0
	Traslado a boya de amarre	0	0	0
Vuelta	Traslado a muelle	0	0	0
	Embarque de pasajeros H	0	30	0
	Salida de la rada I	4	20	1,33
	Navegación entre islas J	28	105	49,00
	Ingreso a la rada K	9	10	1,50
	Desembarque de pasajeros L	0	20	0
	Traslado a boya de fondeo M	3	10	0,50
<b>Total</b>			<b>390</b>	<b>104,83</b>

La Figura 2.2 muestra el perfil operacional más significativo por ser el que mayor autonomía requiere para completar una ruta diaria.

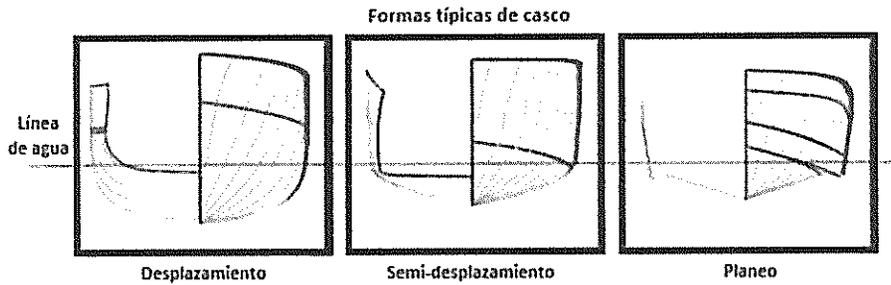


**Figura 2.2 Perfil operacional significativo (Ruta Puerto Ayora – Puerto Villamil).**

Con este perfil operacional significativo se establecen los requerimientos de diseño, garantizando que la embarcación tendrá la autonomía suficiente para realizar una ruta completa de 6.5 horas de duración total, y navegar en un tiempo aproximado de 2 horas por travesía entre islas a 28 nudos de velocidad, Ver Tabla 2.2.

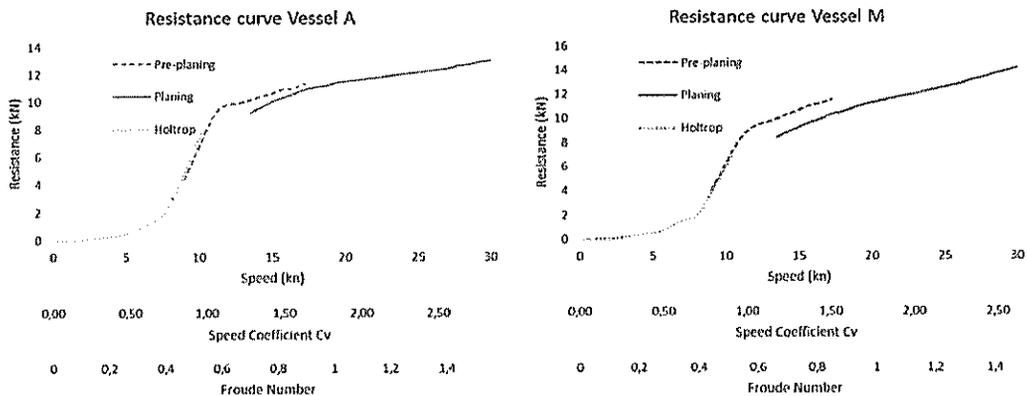
### 2.1.2 Resistencia al avance de las embarcaciones modelo

La estimación de resistencia al avance puede ser realizada mediante experimentación con modelos a escala, utilizando métodos estadísticos, o numéricos (CFD). Los altos costos de la experimentación la restringen como una opción de análisis para un diseño conceptual. Por esta razón, en el presente trabajo se implementan métodos estadísticos, como el de Holtrop-Mennen (Holtrop & Mennen, 1982), Savitsky-Mercier (Savitsky & Mercier, 1967), y Savitsky (Savitsky, 1964), que permiten realizar una predicción rápida de resistencia de una embarcación planeadora, en los regímenes de desplazamiento, semi-desplazamiento, y planeo respectivamente, en función de las características principales del casco (Molland et al., 2011).



**Figura 2.3 Formas típicas de casco** (Claramunt & Granados, 2018).

Comparando las formas de los cascos de las embarcaciones A y M mostradas en las Figura 1.9 y Figura 1.10, con las formas típicas de cascos mostradas en la Figura 2.3, se puede concluir que las embarcaciones A y M tienen formas típicas de planeo. Sin embargo, estas embarcaciones deben de pasar por todo el rango de velocidades donde, a bajas velocidades se comportan como una embarcación de desplazamiento, y con el incremento de la velocidad se genera un efecto de sustentación dinámica bajo el casco, elevando a la embarcación a un estado de planeo y reduciendo la resistencia al avance.



**Figura 2.4 Curvas de resistencia de Modelo M y Modelo A.**

Debido a las formas de los cascos de los modelos A y M, el método de predicción de resistencia que se siguió para el dimensionamiento de los sistemas de propulsión fue Savitsky de planeo (Savitsky, 1964), ver Figura 2.4, la condición de planeo fue corroborada con el número de Froude (Almeter, 1993) y el coeficiente de velocidad

(Savitsky, 1964). Ambos valores adimensionales guardan relación con la resistencia al avance en función de la velocidad, pero solo el segundo se podría considerar un valor real en el fenómeno de planeo por sustentación hidrodinámica.

La Figura 2.5 presentan las respuestas de la embarcación frente al comportamiento hidrodinámico del casco, dentro del rango de velocidades en la que los modelos A y M se desplazan en condiciones de planeo.

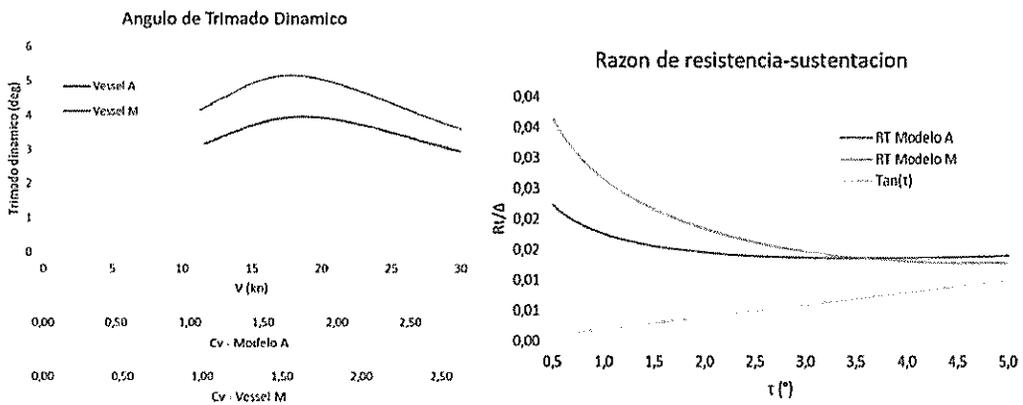


Figura 2.5 Trimado dinámico y su influencia sobre la resistencia al avance.

El trimado dinámico es el ángulo de inclinación longitudinal que varía por la influencia de la sustentación generada por las formas del casco. Por esta razón notamos que al presentarse el fenómeno de sustentación en el fondo del casco el ángulo crece, elevando a la embarcación sobre la línea de flotación reduciendo la superficie mojada y por tanto la resistencia total de remolque.

### 2.1.3 Cálculo de energía propulsiva efectiva

La Tabla 2.3 presenta el procedimiento utilizado para calcular la cantidad de energía de propulsión efectiva total, que se define como la sumatoria de la energía requerida para cada operación, ver ecuación 2.2

$$EPE = \sum_{i=1}^n EHP_i \times t_i \quad (2.2)$$

**Tabla 2.3 Cálculo de EPE de modelo A**

Operación / Maniobra		V (nudos)	t (min)	t (h)	Autonomía (mn)	EHP (kW)	EPE (kWh)	EPE (MJ)
Ida	Maniobra de combustible A	3	5	0,08	0,25	0,279	0,02	0,08
	Traslado a zona de embarque B	5	5	0,08	0,42	1,5	0,13	0,48
	Embarque de pasajeros C	0	30	0,50	0	0	0	0
	Salida de la rada D	9	10	0,17	1,50	20,2	3,37	12,15
	Navegación entre islas E	28	105	1,75	49,00	186,2	325,9	1173,3
	Ingreso a la rada F	4	20	0,33	1,33	0,937	0,31	1,12
	Desembarque de pasajeros G	0	20	0,33	0	0	0	0
	Traslado a boya de amarre	0	0	0	0	0	0	0
Vuelta	Traslado a muelle	0	0	0	0	0	0	0
	Embarque de pasajeros H	0	30	0,50	0	0	0	0
	Salida de la rada I	4	20	0,33	1,33	0,937	0,31	1,12
	Navegación entre islas J	28	105	1,75	49,00	186,2	325,9	1173,3
	Ingreso a la rada K	9	10	0,17	1,50	20,2	3,37	12,15
	Desembarque de pasajeros L	0	20	0,33	0	0	0	0
	Traslado a boya de fondeo M	3	10	0,17	0,50	0,279	0,05	0,17
<b>Modelo A</b>		<b>Total</b>	<b>390</b>	<b>6.5</b>	<b>104,83</b>		<b>Total</b>	<b>2374,06</b>

## 2.2 Energía propulsiva requerida

La Tabla 2.4 detalla los rendimientos calculados, y recomendados para el diseño preliminar del sistema de propulsión, estos cuantifican la pérdida de energía entre los componentes del sistema.

El factor  $F_s$  comprende el incremento de potencia debido al margen de operación del motor (>90% potencia máxima), incrustaciones, y estado de mar de la zona conforme la escala de Beaufort (Molland et al., 2011).

**Tabla 2.4 Rendimientos del sistema propulsor actualmente instalado.**

Rendimiento	Descripción	Modelo A	Modelo M	Bibliografía consultada
$\eta_O$	Rendimiento de la hélice en aguas abiertas	0.59	0.51	(Radojic, 1988)
$\eta_R$	Rendimiento rotativo relativo	0.95	0.95	(Molland et al., 2011)
$\eta_H$	Rendimiento de la hélice atrás del casco	1.03	1.03	(Blount & Barte, 1997)
$\eta_D$	Rendimiento Cuasi-propulsivo	0.58	0.50	(Molland et al., 2011)
$\eta_M$	Rendimiento mecánico para transmisión con reductor	0.93	0.93	(Bueno Juan Pablo, 2017)
Fs	Margen de Potencia en Servicio	1.32	1.32	(Molland et al., 2011)

**Tabla 2.5 EPR y transición de potencias de modelo A**

Operación / Maniobra		t (h)	EHP (kW)	DHP (kW)	BHP (kW)	IHP (kW)	EPR (kWh)	EPR (MJ)	
Ida	Maniobra de combustible	A 0,08	0,28	0,48	0,52	0,69	0,06	0,21	
	Traslado a zona de embarque	B 0,08	1,60	2,76	2,97	3,92	0,33	1,18	
	Embarque de pasajeros	C 0,50	0	0	0	0	0	0	
	Salida de la rada	D 0,17	20,25	35,04	37,67	49,73	8,29	29,84	
	Navegación entre islas	E 1,75	186,25	322,33	346,59	457,50	800,62	2882,24	
	Ingreso a la rada	F 0,33	0,94	1,62	1,74	2,30	0,77	2,76	
	Desembarque de pasajeros	G 0,33	0	0	0	0	0	0	
Vuelta	Embarque de pasajeros	H 0,50	0	0	0	0	0	0	
	Salida de la rada	I 0,33	0,94	1,62	1,74	2,30	0,77	2,76	
	Navegación entre islas	J 1,75	186,25	322,33	346,59	457,50	800,62	2882,24	
	Ingreso a la rada	K 0,17	20,25	35,04	37,67	49,73	8,29	29,84	
	Desembarque de pasajeros	L 0,33	0	0	0	0	0	0	
	Traslado a boya de fondeo	M 0,17	0,28	0,48	0,52	0,69	0,11	0,41	
<b>Modelo A</b>							<b>Total</b>	<b>1619,8</b>	<b>5831,48</b>

Recordando que 1 kWh equivale a 3,6 MJ; la Tabla 2.5 presenta el total de la energía propulsiva requerida “EPR” en el modelo A para una ruta completa de navegación, y que actualmente es entregada por los motores a gasolina instalados.

## 2.3 Eficiencia energética típica de los sistemas de propulsión marinos

En esta sección se identificaron los sistemas típicos en lanchas menores de 30 toneladas, su principio de funcionamiento, rendimiento energético, y el modo típico de selección para motor principal y propulsor. La Figura 2.6 presenta el esquema típico de los sistemas de propulsión de estas lanchas, ejemplificando las posiciones donde se podrían ubicar los controles del sistema. Para el análisis realizado en este trabajo no se describen detalles de los controles, ni equipos de navegación típicamente utilizados, en esta sección solo se tomarán en cuenta los componentes principales tal y como se presentó en la Figura 1.8.

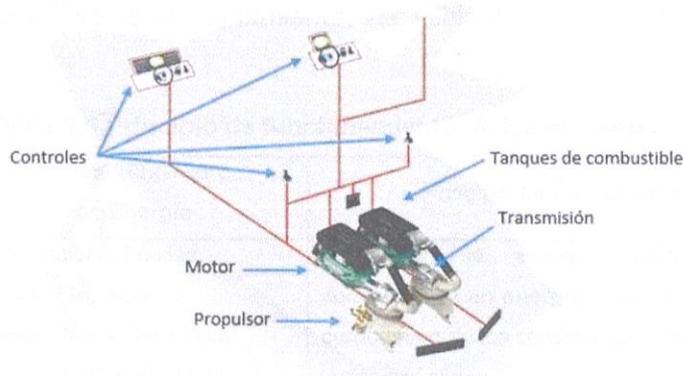
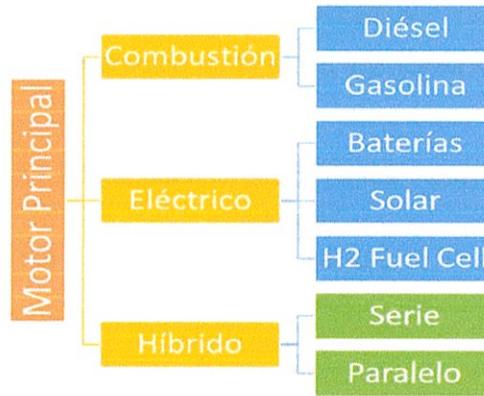


Figura 2.6 Esquema de sistema propulsor típico (VOLVO PENTA, 2020).

### 2.3.1 Motor Principal

El motor principal es el componente del sistema propulsor que provee la energía mecánica en forma de fuerza motriz, entregando en el freno un par-motor con la suficiente potencia para vencer la resistencia al avance e impulsar la embarcación a la velocidad requerida. De la información recopilada en este trabajo de proyectos y lanchas menores de 30 toneladas ya existentes, se resumen en la Figura 2.7 los motores típicamente instalados con sus respectivas fuentes de energía.



**Figura 2.7 Motores típicos en lanchas menores de 30 Ton** (Fuente propia).

Dado que el objetivo fundamental de los motores es transformar la fuente de energía almacenada en el combustible en energía mecánica, surge la posibilidad de que su fuente sea renovable o no renovable. Por lo cual se debe incluir en el diseño un subsistema o circuito de alimentación que permitirá poner en marcha al sistema de propulsión y garantizar su funcionamiento, ver Tabla 2.6.

**Tabla 2.6 Principio de funcionamiento de los motores.**

Motor	Fuente/Suministro de Energía	Principio de Funcionamiento
Combustión Interna	Combustibles Fósiles: Diésel / Gasolina Combustibles Orgánicos: Biodiesel / Etanol / Metanol	Convierten la energía térmica de los combustibles en energía mecánica, a través la combustión de los combustibles mediante ciclos termodinámicos.
Eléctrico	Electricidad generada por grupos electrógenos, fuentes electroquímicas, fuente solar.	Transforman la energía eléctrica en energía mecánica, mediante campos magnéticos que inducen el movimiento rotativo del eje del rotor.
Híbrido	Las mismas fuentes utilizadas en los motores de combustión interna y eléctricos.	Combina el uso de motores de combustión interna y motores eléctricos en diferentes niveles de hibridación permitiendo mejoras significativas.

Un aspecto muy importante de cuantificar correctamente es la energía requerida para dimensionar el almacenamiento y mantener abastecida la embarcación. La

autonomía es el dato de diseño que nos permite calcular cuanta energía se necesita para el cumplimiento de la operación de la nave, ver Tabla 2.2.

**Tabla 2.7 Eficiencia energética de los motores.**

Motor	Tipo	Eficiencia (Aprovechamiento Energético)	Fuente o referencia
Combustión Interna	De ciclo Otto	30% a 36%	(Boretti, 2012)
	De ciclo diésel	40% a 47%	
Eléctrico	Imanes Permanentes	90% a 98%	(Symington et al., 2016)
Híbrido (Depende del nivel de hibridación de la máquina)	Serie	Incremento típico del 4% a 6%.	(Heppeler et al., 2014)
	Paralelo	Incremento típico del 8% a 12%	(Paykani & Shervani-Tabar, 2011)

Para cuantificar la cantidad de energía que debe ser almacenada, se debe considerar el porcentaje de aprovechamiento del combustible, mostrado en la Tabla 2.7. Luego, se calcula la cantidad de combustible que será transformado en energía mecánica. La diferencia más importante entre los motores de combustión y los eléctricos, es que la eficiencia energética es mucho más alta en el segundo caso debido a que gran cantidad de la energía se disipa durante la combustión en forma de calor.

### **2.3.1.1 Dimensionamiento y selección del motor principal**

Siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 1.5.4, se estimó la potencia instalada requerida IHP para que el modelo A alcance la velocidad de diseño. La potencia nominal del motor no debe ser menor que el valor de la IHP calculada ni mucho mayor para evitar su sobredimensionamiento (Molland et al., 2011).

Se identificaron los componentes principales del sistema propulsor, así como las limitantes técnicas y logísticas para implementar las alternativas de propulsión en Galápagos. Posteriormente, se buscaron motores en el mercado nacional e internacional considerando las IHP requeridas como se presenta más adelante en la Tabla 3.6, donde marcas con presencia dentro del país fueron preferidas por la

garantía de un servicio técnico y repuestos al alcance de cualquier armador de una lancha interislas. Finalmente, se escogieron los componentes principales de cada sistema propulsor que mejor cumplieran con los requerimientos de diseño (demanda de potencia) y las limitaciones mencionadas en la sección 1.5.3.

### **2.3.1.2 Fuente de suministro de energía**

En esta sección se presenta el cálculo seguido para dimensionar de forma preliminar la fuente de suministro energético respectivo para cada tipo de motor, identificado en la Figura 2.7, que compondrán las diferentes alternativas de sistemas de propulsión, considerando la autonomía requerida durante la operación de la nave. En esta primera aproximación se dimensionaron los componentes principales por lo que no son tomadas en cuenta los sistemas de control y las pérdidas dentro de los circuitos.

#### **2.3.1.2.1 Combustible fósil**

Los combustibles fósiles son la fuente de energía de los sistemas de propulsión convencionales. La cantidad de combustible equivalente requerido fue calculada utilizando la ecuación 2.3, que considera el potencial calórico de los combustibles estimado a partir de la cantidad de energía contenida por galón y el aprovechamiento de combustibles para cada tipo de motor.

$$CE = \frac{EPR}{UE \times AC} \quad (2.3)$$

Donde:

CE: combustible equivalente en galones.

EPR: energía propulsiva requerida en MJ, ver Tabla 2.5.

UE: cantidad de energía contenida por galón en MJ/gal.

AC: porcentaje de aprovechamiento energético en el motor, ver Tabla 2.7.

#### **2.3.1.2.2 Baterías.**

El sistema de propulsión alimentado por baterías funciona de forma totalmente eléctrica, pero depende de la conexión a puerto en el gestor del sistema para recargar energía y seguir operando. Los tiempos de recarga están en función de los

dispositivos utilizados. Los principales componentes de este sistema son: Motor principal, transmisión, propulsor, y banco de baterías, ver Figura 2.8.

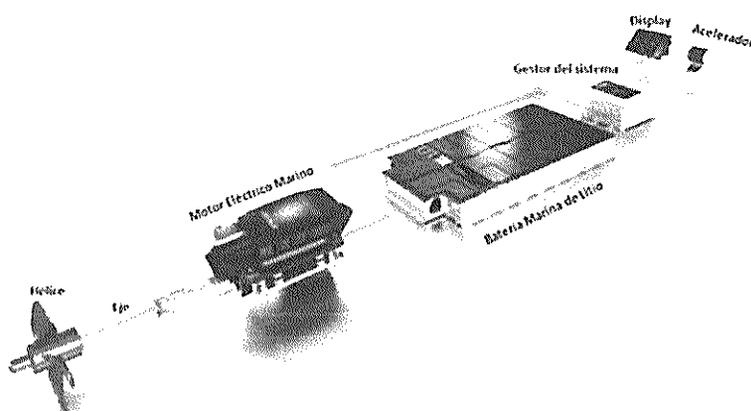


Figura 2.8 Esquema de sistema de propulsión con banco de baterías (TORQEEDO, 2020).

La capacidad mínima del banco de baterías CBB es calculada, a partir de EPR estimado en la sección 2.2, utilizando la ecuación 2.4 (Rivadeneira, 2017). Luego, se determina la cantidad de baterías requeridas NTB utilizando la ecuación 2.5 (Rivadeneira, 2017), en base a las características de la unidad seleccionada considerando su disponibilidad en el mercado local.

$$CBB = \frac{EPR \times A}{D \times V} \quad (2.4)$$

Donde:

CBB: capacidad mínima del banco de baterías en Amper-hora.

EPR: energía propulsiva requerida en kWh, ver Tabla 2.5.

A: días de autonomía.

D: profundidad (porcentaje) de descarga.

V: tensión del sistema en voltios.

$$NTB = \frac{VNBB \times CBB}{VNB \times CB} \quad (2.5)$$

Donde:

NTB: cantidad de baterías requeridas.

VNBB: tensión nominal del banco de baterías en Voltios.

CBB: capacidad mínima del banco de baterías en Amper-hora.

VNB: tensión nominal de la batería en Voltios.

CB: capacidad nominal de la batería en Amper-hora.

En algunos casos el fabricante indica la capacidad energética de almacenamiento CEB, con lo cual se facilita el cálculo del número de baterías, aplicando la ecuación 2.6.

$$NB = \frac{EPR}{CEB} \quad (2.6)$$

Donde:

NB: número de baterías requeridas.

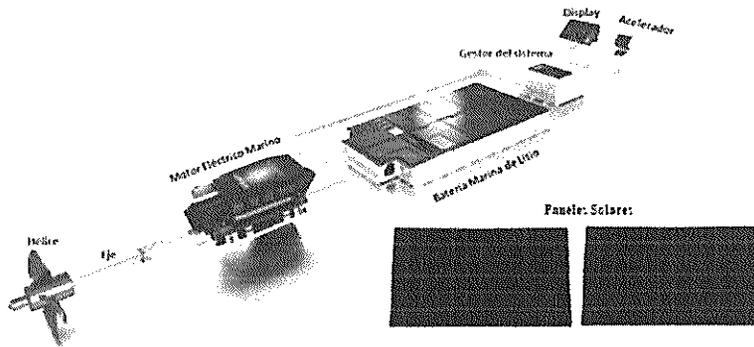
EPR: energía propulsiva requerida en kWh, ver Tabla 2.5.

CEB: capacidad energética de la batería en kWh.

Para la selección, Symington et al (Symington et al., 2016) considera como las más eficaces para la industria naval a las baterías de Ion-litio y sus variantes. De igual manera se consideraron este tipo de baterías en los cálculos posteriores debido principalmente al balance entre energía, potencia específicas, y su costo comercial. El tiempo de carga de las baterías conectadas a puerto dependerá del tipo de cargador que se vaya a utilizar y del amperaje configurado.

#### 2.3.1.2.3 Energía solar.

El sistema de propulsión alimentado por energía solar funciona de forma similar al explicado en la sección anterior, con la diferencia que no depende de la conexión a puerto. En principio, el banco de baterías a bordo de la embarcación es recargado por un conjunto de paneles solares, lo cual aumenta su autonomía e independencia. Sin embargo, los tiempos de recarga están en función de los dispositivos utilizados y la cantidad de horas útiles de sol que disponga la zona. Los principales componentes son motor, transmisión, propulsor, banco de baterías, y paneles solares, ver Figura 2.9.



**Figura 2.9 Esquema de sistema de propulsión con paneles solares (TORQEEDO, 2020).**

El número de paneles requeridos NPS para la generación eléctrica con la capacidad de abastecer los requerimientos del suministro energético se determina mediante la ecuación 2.7 (Delgado Plaza, 2019).

$$NPS = \frac{S}{A_{panel}} \quad (2.7)$$

Donde:

NPS: Número de paneles solares requeridos.

S: Área de panel requerida, en m<sup>2</sup>.

Apanel: Área de panel solar seleccionado, en m<sup>2</sup>.

El área requerida "S" es determinada mediante la ecuación 2.7.1.

$$S = 1.1 \times \frac{P}{\eta} \quad (2.7.1)$$

Donde:

P: Coeficiente dimensional de potencia del peor mes, en m<sup>2</sup>.

η: Eficiencia del panel solar seleccionado (modulo).

El coeficiente dimensional "P" está definido por la ecuación 2.7.2.

$$P = \frac{EPR}{G_t} \quad (2.7.2)$$

Donde:

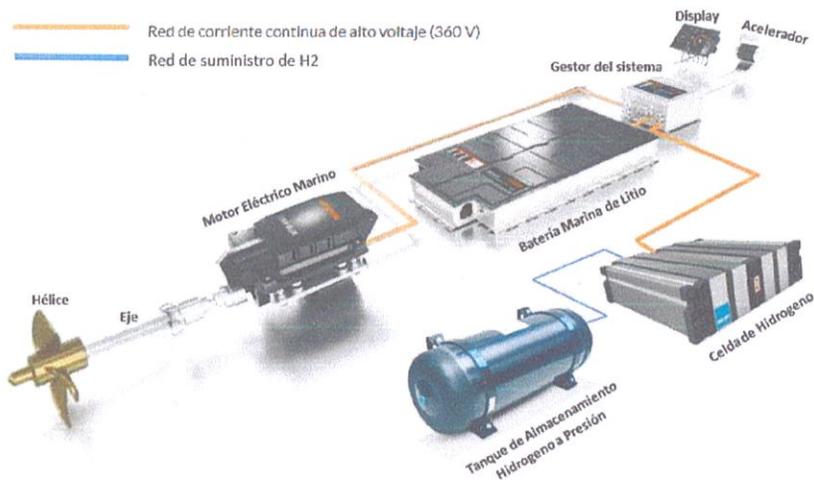
EPR: Energía propulsiva requerida, en kWh.

G<sub>t</sub>: Irradiación diaria de la zona en el peor mes, en kWh/m<sup>2</sup>.

Para la selección, Blakers indica que a pesar de existir materiales para paneles fotovoltaicos más eficientes, los paneles de silicio en la actualidad son los más indicados para la aplicación naval, debido al balance entre el costo de fabricación y la eficiencia de generación (Blakers et al., 2013). Estos paneles son construidos por cristales semiconductores de silicio en forma de celdas, la eficiencia define el aprovechamiento de los fotones capturados por el panel y esto depende de su modo de construcción. La más alta eficiencia de generación eléctrica registrada en este tipo de paneles es del 27.6% (Blakers et al., 2013). El fabricante indica la potencia de cada panel y este valor no se ve afectado por su eficiencia.

#### 2.3.1.2.4 Celdas de hidrógeno: H2 Fuel Cell.

El sistema de propulsión alimentado por celdas de hidrógeno (H2 Fuel Cell) es similar a los dos sistemas descritos anteriormente donde el motor principal es eléctrico. Se diferencia de estos en la forma en que se genera la energía a bordo. Los principales componentes son motor principal, transmisión, propulsor, H2 Fuel Cell, tanques de almacenamiento de H2, ver Figura 2.10.



**Figura 2.10 Componentes del sistema de propulsión con H2 Fuel Cell (TORQEEDO, 2020).**

El número de celdas de combustible de hidrógeno requerido para la fuente de suministro es calculado usando la ecuación 2.9 (Pratt & Klebanoff, 2016).

$$NFC = \frac{PER}{FCC} \quad (2.9)$$

Donde:

NFC: número de celdas de combustible requeridas.

PER: potencia eléctrica requerida para la fuente de suministro en kW.

FCC: capacidad energética de la celda de combustible en kW.

Luego, se determina la cantidad de hidrogeno requerido para satisfacer la demanda energética de la EPR según el perfil de operación. Con el valor de la densidad del hidrógeno ( $\rho = 0.0899 \text{ kg/Nm}^3$ ), se calcula el volumen correspondiente a la masa de hidrógeno requerida calculada por la ecuación 2.10 (Pratt & Klebanoff, 2016).

$$M_{H_2} = \frac{EPR}{Ef \times VCH_2} \quad (2.10)$$

Donde:

MH2: Masa de hidrogeno requerido en kg

EPR: Energía propulsiva requerida en MJ, ver Tabla 2.5.

Ef: Eficiencia energética de la celda.

VCH2: Poder calorífico del hidrogeno en MJ/kg.

Debido a la rápida respuesta y baja temperatura de operación se afirma que las celdas de membrana de intercambio protónico presentan cualidades para diversas aplicaciones comerciales (Rincón Castrillo et al., 2019), y L. van Biert en su estudio determina que las "PEM Fuel Cell" son las más aptas para aplicaciones navales, debido a su eficiencia (Ef) que va entre 40% - 60%, y sus altas densidades gravimétrica y volumétrica de energía (van Biert et al., 2016).

En el Apéndice B se detalla el valor de eficiencia acorde la celda seleccionada para el sistema de propulsión dimensionado de forma preliminar en este estudio.

Las dificultades para el almacenamiento de hidrogeno son originadas por las características fisicoquímicas del elemento, su baja densidad demanda grandes volúmenes por esta razón en la actualidad se utilizan 3 métodos principales:

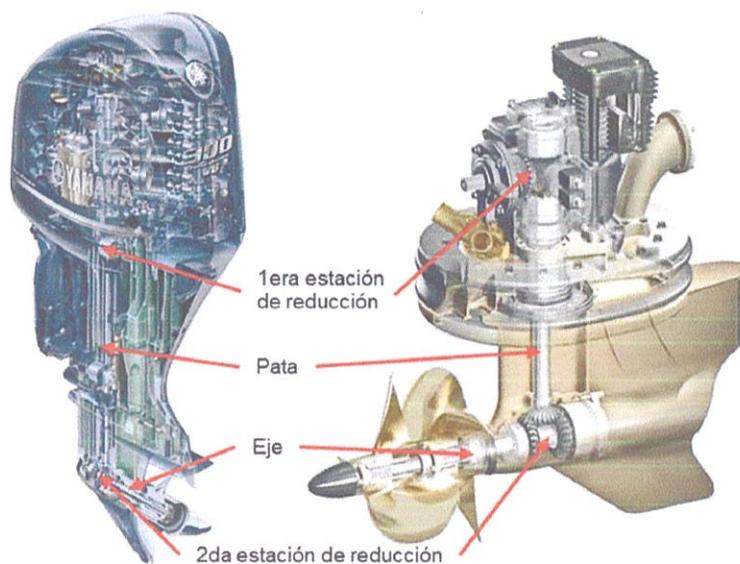
- Almacenamiento a alta presión.

- Almacenamiento líquido a temperaturas criogénicas.
- Almacenamiento sólido en forma de hidruros metálicos.

En la implementación de medios de transporte terrestre que funcionan con celdas de hidrogeno, el método habitual de almacenamiento es comprimir el hidrogeno en bombonas de alta presión debido a que no requieren de un equipamiento especializado para licuefacción y regasificación. Para el transporte marítimo el método de almacenamiento es el mismo, pero la diferencia está en el requerimiento de un mayor volumen de hidrogeno para alcanzar la autonomía.

### 2.3.2 Transmisión

La transmisión es el conjunto de componentes del sistema de propulsión que se encarga de llevar el movimiento rotativo desde el freno del motor principal hasta el propulsor, típicamente está compuesto por el reductor y la línea de eje; en ocasiones incluye tomas de fuerza y caja de cambios.



**Figura 2.11 Ejemplos de transmisión Z-drive y POD (YAMAHA, 2020)(VOLVO PENTA, 2020).**

La caja reductora o reductor, es el mecanismo que transmite el movimiento rotativo llevando las revoluciones en el freno del motor hasta un régimen óptimo para

aprovechar la eficiencia del propulsor. La línea de eje está compuesta por uno o más ejes acoplados que transmiten el movimiento rotativo desde el acople flexible a la salida del reductor hasta el propulsor, independientemente de la potencia el modelo del motor define la relación de reducción.

El rendimiento mecánico para motores con transmisión directa típicamente se encuentra alrededor del 98%, y para motores con transmisión a través de una caja reductora se encuentra alrededor del 95% (Molland et al., 2011). En el caso de los motores fuera de borda la transmisión no es directa, poseen un mecanismo interno de reducción en una o dos etapas según el modelo del motor.

El dimensionamiento de la transmisión va encaminado a alcanzar el régimen óptimo de trabajo en la línea de propulsión. Sin embargo, en este trabajo se realiza un dimensionamiento preliminar por lo que no se profundizó en este aspecto. Típicamente para lanchas planeadoras menores de 30 toneladas la selección de componentes se restringe a las opciones de Drives ofertados por el fabricante según la operación que desempeñaría la lancha. Pero en el caso de los motores fuera de borda la transmisión viene dentro del mismo ensamble, ver Figura 2.11.

### **2.3.3 Mecanismos de propulsión marina / propulsores marinos**

Los propulsores marinos son los componentes del sistema de propulsión que interactúan con el medio circundante a la embarcación convirtiendo el movimiento rotativo, que recibe de la transmisión, en empuje para movilizar a la embarcación. Los propulsores típicos en lanchas rápidas son:

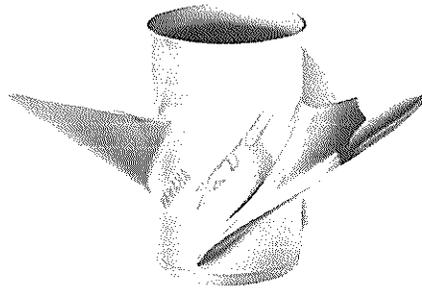
- Hélice
- Water-Jet

#### **2.3.3.1 Hélice**

Las hélices empujan la masa de agua que rodea sus palas, en sentido axial y radial, recibiendo una reacción de empuje sobre ellas, transformando su rotación en propulsión de todo el buque. La eficiencia con la que la hélice transforma la energía rotacional provista por el eje depende de su geometría. Teóricamente, cuanto más

grande sea la hélice, más eficiente será su funcionamiento en el sistema propulsor. Pero su tamaño se ve limitado al espacio disponible, y se busca obtener la máxima eficiencia posible, donde el propulsor opere en un régimen de trabajo idóneo.

La geometría de la hélice propulsora que mejor se ajusta a las embarcaciones planeadoras interislas de Galápagos es las hélices de sección segmentada de cara plana, mostrada en la Figura 2.12, porque operan en el régimen cavitante típico de embarcaciones rápidas. Este tipo de hélices se caracteriza por ser simples de fabricar, fáciles de reparar, y de buena operación en aguas abiertas, por esta razón se usan ampliamente en estas embarcaciones (Radojicic, 1988).



**Figura 2.12 Hélice de sección segmentada de cara plana, KCA Series (YAMAHA, 2020).**

El rendimiento de las hélices se determinada en base a los resultados publicados en series sistemáticas de pruebas experimentales (Molland et al., 2011). El rendimiento propulsivo en aguas abiertas está definido por la ecuación 2.11.

$$\eta_o = \frac{J \times k_t}{2\pi k_q} \quad (2.11)$$

Donde:

Kt: Coeficiente de empuje

Kq: Coeficiente de torque

J: Coeficiente de avance, definido por la ecuación 2.12.

$$J = \frac{V_a}{n \times D} \quad (2.12)$$

Siendo:

$V_a$ : Velocidad de avance de la hélice en m/s (igual a la velocidad de navegación reducida por el efecto del coeficiente de estela).

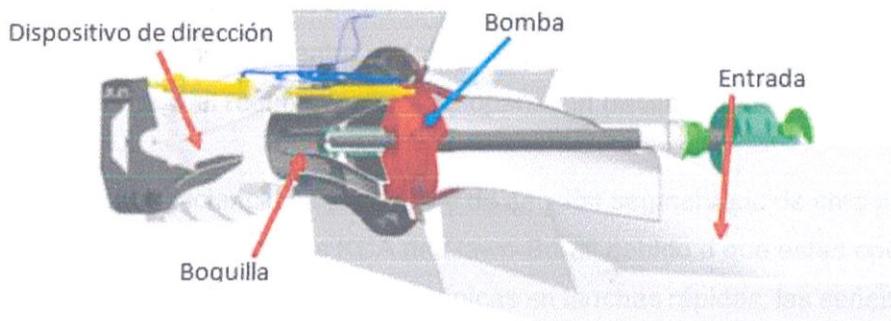
$n$ : Velocidad de rotación de la hélice rad/s.

$D$ : Diámetro de la hélice en m.

Las curvas de  $K_t$  y  $K_q$ , y el cálculo de eficiencia de estas hélices fue realizado mediante la implementación de las series sistemáticas KCA de Gawn-Burrill que describen su comportamiento hidrodinámico, utilizando el modelo matemático de Radojic (Radojic, 1988), ver Apéndice A.

### 2.3.3.2 Water-Jet.

Los propulsores Water-Jet son equipos que generan empuje por medio de la impulsión de un chorro de agua direccionado. El principio de funcionamiento se deriva directamente de la teoría de las hélices, por medio de una bomba se acelera el flujo de masa de agua que ingresa por la entrada, incrementando la presión de salida por la boquilla generando una fuerza de empuje (Bulten, 2006).



**Figura 2.13** Partes principales de un WaterJet (Bulten, 2006).

Este sistema propulsor posee un alto rendimiento a velocidades mayores a 30 nudos, reduciendo el requerimiento de potencia instalada del motor. Sin embargo, su eficiencia es reducida para velocidades menores sin importar su capacidad de carga y rango de potencia (Arcand, 1966). Uno de los métodos empíricos utilizados para estimar esta eficiencia es mostrada en la ecuación 2.13 (David W., 1980).

$$\eta_D = \eta_H \times \eta_{pump} \frac{2\mu(1-\mu)}{(1+\phi) - \mu^2(1-\varepsilon)} \quad (2.13)$$

Donde:

$\mu$ : Relación de velocidad del chorro de entrada y salida, definido por:

$$\mu = \frac{v_{in}}{v_{out}} \quad (2.14)$$

$\phi$ : Coeficiente de pérdida de la boquilla

$\varepsilon$ : Coeficiente de pérdida de entrada

$\eta_H$ : Rendimiento del casco

$\eta_{pump}$ : Rendimiento de la bomba

Estos coeficientes son determinados por la geometría y datos de operación del equipo Water-Jet.

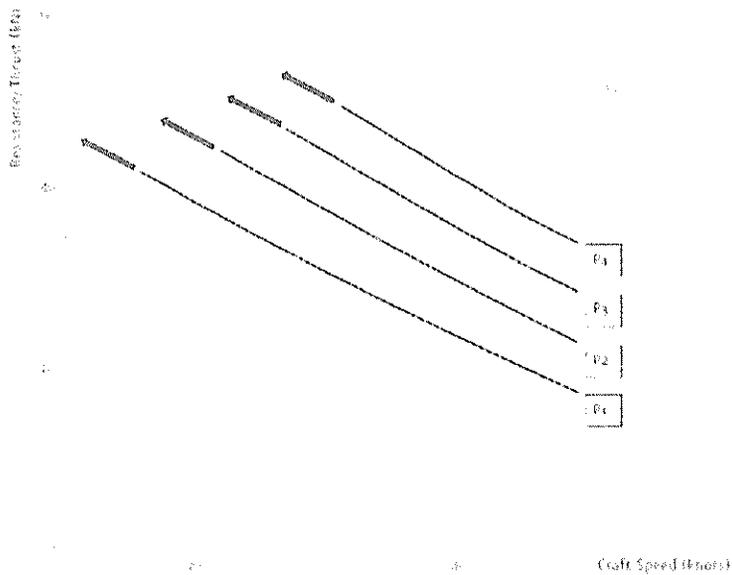
### 2.3.3.3 *Parámetros de selección del propulsor*

Debido al número de variables que intervienen en los fenómenos hidrodinámicos, normalmente se recurre a procesos iterativos fundamentados en modelos matemáticos para la predicción de las características hidrodinámicas y el rendimiento propulsivo de las hélices. Para seleccionar el propulsor siempre se busca alcanzar la máxima eficiencia dentro del sistema propulsor, iterando hasta determinar/encontrar el régimen óptimo de operación (Molland et al., 2011).

Para determinar la eficiencia de las hélices de sección segmentada de cara plana se utilizaron las series sistemáticas KCA de Gawn-Burrill debido a que estas operan en régimen cavitante (Radojic, 1988) y son típicas en lanchas rápidas; las series fueron implementadas con el modelo matemático de Radojic (Radojic, 1988).

Tomando como base las hélices utilizadas en el Modelo A el Apéndice A se detalla el cálculo del rendimiento propulsivo utilizando las series sistemáticas KCA, para aguas abiertas y bajo los efectos de cavitación para varias razones de área desarrollada.

En el caso de los sistemas Water-Jet, el análisis de eficiencia es un poco complejo de realizar, además las casas comerciales no proveen toda la información requerida para el cálculo y sugieren contratarlos para realizar los cálculos necesarios. Por esta razón, la selección de un Water-Jet se hace a través de la comparación entre varios sistemas (HOLEDECK, 2017).



**Figura 2.14 Empuje requerido a una velocidad determinada (HOLEDECK, 2017).**

La Figura 2.14 ilustra el proceso de selección sugerido por el fabricante UltraJet para todo tipo de embarcación, donde P1, P2, P3, P4 son las curvas de empuje para diferentes potencias de Water-Jet y R1 es la curva de resistencia del casco (HOLEDECK, 2017). En esta figura se aprecia que para una velocidad "V", en comparación con las otras curvas P2 nos da el empuje suficiente para vencer la resistencia al avance, evitando sub-dimensionar o sobredimensionar el sistema.

La referencia no incluye detalles de la embarcación y no es comparable con nuestro caso debido a que solo es un ejemplo práctico que nos sirve para entender el proceso. En el Apéndice A se menciona la razón por la que esta opción es descartada.

## CAPÍTULO 3

Este capítulo presenta el desarrollo del análisis realizado en la aplicación de la metodología, y la justificación técnica de la verificación de viabilidad del sistema de propulsión seleccionado partiendo de las opciones identificadas.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La Tabla 3.1 muestra los motores típicos para cada alternativa identificada en la sección 2.3.1 considerando su disponibilidad dentro del mercado ecuatoriano y el sector naval local. El motor de combustión de 4 tiempos a gasolina corresponde a los fuera de borda actualmente utilizados en las interislas, considerados para este análisis de viabilidad como sistema propulsor de referencia.

**Tabla 3.1 Tipos de sistemas de propulsión identificadas para lanchas menores de 30 toneladas.**

Opción	Motor	Tipo	Suministro
A	Combustión	4 tiempos	Gasolina
B	Combustión	4 tiempos	Diésel
C	Eléctrico	Imanes Permanentes	Batería
D	Eléctrico	Imanes Permanentes	Solar
E	Eléctrico	Imanes Permanentes	Hidrógeno
F	Híbrido	Serie	Gasolina
G	Híbrido	Serie	Diésel
H	Híbrido	Paralelo	Gasolina
I	Híbrido	Paralelo	Diésel

Por información obtenida mediante conversación directa con representantes de ventas de las marcas Cummins (Ejecutivo de ventas: Milton Palacios) y Volvo en Ecuador (Ejecutivo de ventas: Max Borja), los motores marinos que usan gasolina

están limitados a la opción fuera de borda. Esto es debido a que los armadores nacionales prefieren motores estacionarios que utilizan diésel para propulsión y generación eléctrica debido al ahorro que obtienen al usar este tipo de combustible. Además, los motores marinos estacionarios a gasolina no son populares dentro del mercado ecuatoriano, reduciendo su stock ofrecido por los proveedores locales. Una de las razones de su baja popularidad es que su eficiencia energética es inferior en comparación con los motores diésel.

Posteriormente, se procedió a reducir el número de opciones a partir de las mostradas en la Tabla 3.1. Por ejemplo, para sostener como base de comparación se consideró únicamente la opción de motores fuera de borda para el sistema A, descartándose los motores marinos estacionarios a gasolina. De igual manera, debido a su baja popularidad en el mercado ecuatoriano las opciones F & H fueron descartadas. Por esta razón las opciones consideradas en este análisis de viabilidad son las presentadas en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Opciones consideradas en el análisis de viabilidad**

Opción/Alternativa	Motor	Tipo	Suministro
Sistema Base	Combustión	4T	Gasolina
Opción 1	Combustión	4T	Diésel
Opción 2	Eléctrico	Imanes Permanentes	Batería
Opción 3	Eléctrico	Imanes Permanentes	Solar
Opción 4	Eléctrico	Imanes Permanentes	Hidrógeno
Opción 5	Híbrido	Serie	Diésel
Opción 6	Híbrido	Paralelo	Diésel

El criterio más importante de selección de los sistemas de propulsión considera la existencia de un proveedor dentro del Ecuador para facilitar la adquisición y logística de repuestos, soporte técnico, y actualizaciones, sin descartarse la posibilidad de importación directa. Esto se debe a que todos los componentes del sistema de propulsión serán importados y trasladados a Galápagos desde el continente.

### 3.1 Selección de los motores principales

La selección del motor principal para cada opción fue realizada considerando los resultados de la potencia requerida IHP, ver Figura 3.1. La curva de IHP fue determinada en función de la velocidad de navegación siguiendo el proceso de dimensionamiento descrito en la sección 1.5.4, y utilizando la curva de resistencia de la Figura 2.4 y los rendimientos detallados en la sección 2.2.

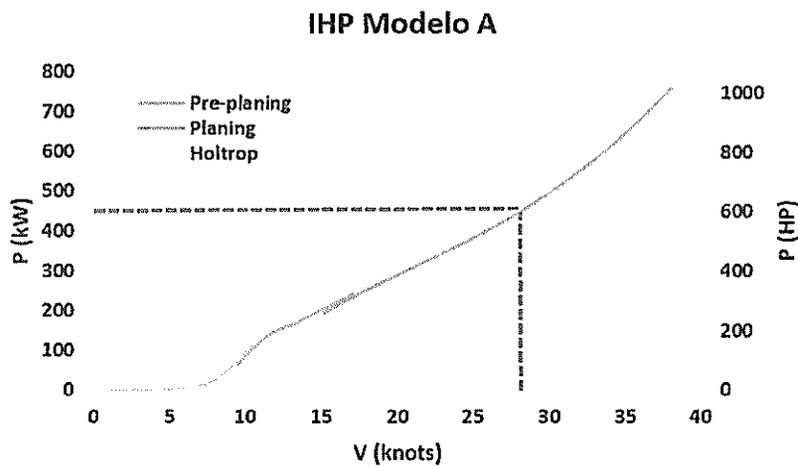


Figura 3.1 Curva de IHP para dimensionamiento de alternativas de propulsión

La potencia instalada requerida en función de la velocidad para el Modelo A es mostrada en la Figura 3.1. El cálculo considera el paso de la interislas en los regímenes de desplazamiento, pre-planeo, y planeo considerando que navega en aguas calmadas e incluye un factor de seguridad, ver Tabla 2.4.

Este factor  $F_s$  aseguraría que el motor opere en un régimen inferior al 90% de su capacidad máxima (10% de incremento), y pueda cubrir el incremento a la resistencia por incrustaciones (10% de incremento), y el incremento por olas (12% de incremento), específicamente para el estado de mar 4 presente en Galápagos. Finalmente, se aproxima el margen de potencia en servicio a un valor de incremento del 32%.

Es posible concluir que la potencia requerida para que el Modelo A alcance la velocidad de diseño de 28 nudos es de aproximadamente 457 kW (613 HP). Esta potencia es comparada con la potencia instalada de 633.8 kW (850 HP), descrita en la

Tabla 1.5, y las velocidades reportadas en las pruebas de mar efectuadas recientemente (Isaac et al., 2020).

La Tabla 3.3 resume la selección preliminar de motores principales para cada opción considerando su disponibilidad en el mercado local. En los sistemas que utilizan motores de combustión interna, la opción del sistema base conservó la composición de triple fuera de borda como actualmente están instalados en las interislas considerando lo mencionado en la Sección 1.5.2.1.

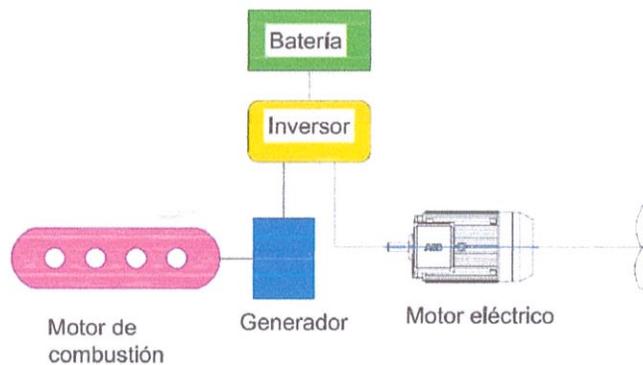
Para la opción 1, fueron preferidos los equipos diésel fuera de borda por sobre los motores estacionarios a diésel, para no realizar modificaciones estructurales y cambios mayores en la distribución de la lancha.

**Tabla 3.3 Motores principales seleccionados para cada opción de sistema de propulsión.**

Opción	# Screws	Motor				Modelo	Potencia instalada (HP)	Peso (Kg)
		Combustión	Out-board 4T	Gasolina	Suzuki *			
Base	Triple	Combustión	Out-board 4T	Gasolina	Suzuki *	DF300AP	900	897
1	Triple	Combustión	Out-board 4T	Diésel	OXE	OXE 300	900	1,185
2	Single	Eléctrico	Imanes Permanentes	Batería	TEMA	LPMR- 500.6.10AW	670.51	12,428
3	Single	Eléctrico	Imanes Permanentes	Solar	TEMA	LPMR- 500.6.10AW	670.51	32,520
4	Single	Eléctrico	Imanes Permanentes	Hidrógeno	TEMA	LPMR- 500.6.10AW	670.51	3,709
5	Single	Híbrido	Serie	Diésel	TEMA	LPMR- 500.6.10AW	670.51	4,956
6	Twin	Híbrido	Paralelo	Diésel	Volvo Penta	D6-380	721.47	1,520

\* Motores Susuki Fuera de borda 4T típicamente utilizados en interislas.

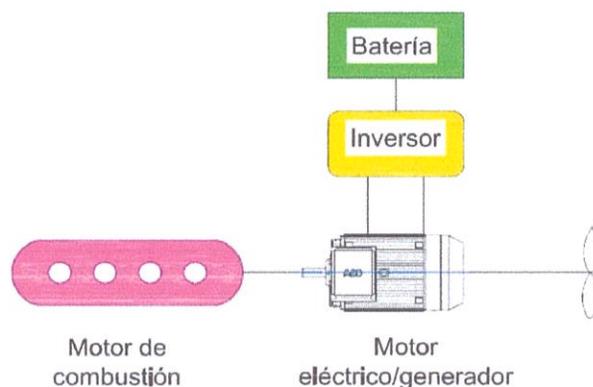
Las opciones 2, 3 y 4 corresponden a los sistemas de propulsión eléctricos, el Apéndice B detalla el proceso de dimensionamiento y selección de equipos. Inicialmente, para estas opciones se consideró un motor estacionario de la marca TEMA modelo LPMR-500.6.10AW con 500kW de potencia, pero fue descartado debido al elevado requerimiento de energía de suministro (600kW) que exigía gran cantidad de equipos de generación y almacenamiento, tal como se detalla en el Apéndice B, excediendo el volumen disponible para la fuente de alimentación. Esto demuestra que estas opciones serían inviables para las condiciones de diseño requeridas.



**Figura 3.2 Esquema sistema propulsivo híbrido en serie** (Matijasevic et al., 2013).

La Figura 3.2 muestra que el sistema híbrido en serie, opción 5, se caracteriza por tener a un motor eléctrico como motor principal que es alimentado por un grupo electrógeno (motor de combustión y generador).

Para esta opción, se consideró el mismo motor eléctrico estacionario de marca TEMA descrito para las opciones 2 a 4 y al grupo electrógeno Volvo Marine Genset D16-MG modelo HCM534F-1 con 508 kWe de potencia para suministro eléctrico, el proceso de selección es detallado en el Anexo B. Sin embargo, esta combinación no es viable considerando que el peso total de ambos equipos es de aproximadamente 5 toneladas, eliminando completamente la capacidad de transportar pasajeros.



**Figura 3.3 Esquema sistema propulsivo híbrido en paralelo** (Matijasević et al., 2013).

La Figura 3.3 muestra que un sistema híbrido en paralelo, opción 6, se caracteriza por que el motor eléctrico y el de combustión interna se encuentran acoplados mecánicamente, donde los motores pueden funcionar en conjunto o independientemente sumando el par-motor.

Finalmente, para esta opción fue seleccionado un motor estacionario Volvo Penta Marine modelo D6-380 en su versión híbrida, que corresponde a un sistema híbrido en paralelo. Este modelo fue lanzado al mercado en 2020 y es la única opción comercial, con representante de marca en el país, y dentro del rango de potencia requerido (500 kW).

### 3.2 Resumen de sistemas de propulsión

La Tabla 3.4 resume algunas de las características principales de las alternativas de sistemas de propulsión consideradas en esta sección.

El detalle de dimensiones y pesos incluyen motor principal, transmisión y propulsor. La selección del propulsor se presenta en el Apéndice A. En esta tabla, no se especifican las dimensiones para las opciones 2, 3, 4, y 5 debido a que, al incluir los equipos de generación y almacenamiento eléctrico se excede la capacidad de carga disponible, ver Anexo B, por lo que se consideraron como opciones inviables para las lanchas interislas.

**Tabla 3.4 Especificaciones técnicas preliminares.**

Opción	Screw	Dimensiones por unidad			W (kg)	RPM Max	Potencia Max (kW)	V Max (nudos)
		L (m)	B (m)	D (m)				
Base	Triple	0,93	0,56	1,89	897	5,500	671,13	36
1	Triple	1,15	0,7	2,09	1,185	4,400	671,13	36
2	Single	---	---	---	12,428	2,500	500	28
3	Single	---	---	---	32,520	2,500	500	28
4	Single	---	---	---	3,709	2,500	500	28
5	Single	---	---	---	4,956	2,500	500	28
6	Twin	1,37	0,85	0,85	1,520	3,500	538	32

**Tabla 3.5 Resumen de componentes principales**

Opción	Motor Principal	Fuente Energética	Transmisión	Propulsor
Base	3 Fuera de borda Suzuki a gasolina	1 Tanque de combustible	Z-Drive	Hélice
1	3 Fuera de borda OXE a diésel	1 Tanque de combustible	Z-Drive	Hélice
2	1 Motor eléctrico TEMA	41 Baterías Ion-litio	Eje sin reducción	Hélice
3	1 Motor eléctrico TEMA	41 Baterías Ion-litio 675 Paneles solares	Eje sin reducción	Hélice
4	1 Motor eléctrico TEMA	12 Celdas de Hidrógeno 42 Tanques de hidrógeno	Eje sin reducción	Hélice
5	1 Motor eléctrico TEMA	1 Generador eléctrico	Eje sin reducción	Hélice
6	2 Motor híbrido Volvo Penta	1 Tanque de combustible 2 Baterías Ion-litio	Stem Drive	Hélice

Debido a que los sistemas de propulsión marina compuestos por un motor principal de tipo eléctrico fueron identificados inviables, se evaluó el uso de motores Torqueado modelo DB 100i 2400 como alternativa para las opciones 2, 3, 4 y 5. Sin embargo, se encontró que esto implicaría navegar a una menor velocidad, reduciendo significativamente la fuente de suministro eléctrico requerida a bordo.

La selección de equipos se realizó priorizando marcas y proveedores con representantes dentro del país tal como se detalla en la Tabla 3.6.

**Tabla 3.6 Proveedores más cercanos de los motores seleccionados y sugeridos.**

Opción	Marca	Ciudad	Distribuidor Autorizado
Base	Suzuki	Guayaquil	Comandato
1	OXE	Guayaquil	Motores del Pacifico
2	Torqueedo	Cuenca	Comercial Salvador Pacheco Mora S.A.
3		Cuenca	
4		Cuenca	
5		Cuenca	
6	Volvo Penta	Guayaquil	Ecuair S.A.

Posteriormente, se identificaron las potenciales restricciones en cuanto a la información comercial y técnica requerida, asesoramiento, servicio técnico, y de ser necesario logística para la adquisición de equipos y repuestos. Las descripciones dadas por el fabricante fueron utilizadas como criterio para determinar si el mantenimiento y operación era fácil o si se requería de personal especializado (capacitado mediante cursos). Pero de ser el caso normalmente los tiempos de importación por vía marítima demoran un mes desde Asia y Europa, y 15 días aproximadamente desde cualquier punto de América.

**Tabla 3.7 Facilidades de adquisición, operación y mantenimiento.**

Opción	Dificultad de Adquisición	Dificultad de Mantenimiento Básico	Dificultad de Operación	Costo Aproximado
Base	Fácil	Especializado	Fácil	\$ 84.000,00
1	Fácil	Especializado	Fácil	\$ 138.000,00
2	Fácil	Fácil	Fácil	\$ 720.000,00
3	Fácil	Fácil	Fácil	\$ 880.740,00
4	Fácil	Especializado	Fácil	\$ 187.000,00
5	Fácil	Especializado	Fácil	\$ 94.000,00
6	Fácil	Especializado	Fácil	\$ 370.400,94

### 3.3 Reducción de emisiones de CO2

Las emisiones de CO2 para cada una de las opciones consideradas fueron calculadas a partir de la cantidad de combustible equivalente que se consumiría para abastecer la energía propulsiva requerida por cada sistema de propulsión considerado, ver Tabla 3.8. Este volumen o masa del combustible equivalente "CE" se calculó utilizando la ecuación 3.1, donde se considera el poder calorífico (unidad de energía) del combustible utilizado por cada opción:

$$CE = \frac{EPR}{UE \times AC} \quad (3.1)$$

Donde:

CE: combustible equivalente en gal.

EPR: energía propulsiva requerida en MJ, ver Tabla 2.5.

UE: poder calorífico en MJ/gal.

AC: aprovechamiento del combustible (eficiencia energética).

La guía práctica para el cálculo de emisiones establece la conversión por unidad de energía correspondiente al combustible equivalente usado en cada fuente (CE en gal) para determinar las emisiones de CO2 "CO2E", tal como se define en la ecuación 3.2 (Generalitat de Catalunya Comisión Interdepartamental del Climático Cambio, 2011).

$$CO2E = CE \times 10,5613 \left[ \frac{kg \ CO2}{gal} \right] \quad (3.2)$$

La Tabla 3.8 resume las emisiones estimadas para un día de trabajo con cada opción de sistema de propulsión, y detalla la reducción esperada en comparación con el sistema fuera de borda actualmente utilizado en las interislas.

Las opciones de motores eléctricos alimentados por baterías, energía solar, e hidrogeno se consideran como cero emisiones, debido a que durante su funcionamiento no emiten CO2 al ambiente.

**Tabla 3.8 Emisiones equivalentes por EPR de Modelo A.**

Opción	Eficiencia energética	Unidad de energía	Combustible Equivalente	Emisiones CO2	Reducción Emisiones	
Base	36%	120,28 MJ/gal	134,68 gal	1422,38 kg	---	---
1	42%	136,62 MJ/gal	101,63 gal	1073,33 kg	349,05 kg	25%
2	95%	---	---	---	1422,38 kg	100%
3	95%	---	---	---	1422,38 kg	100%
4	95%	119,96 MJ/kg	51,17 kg 568 m3 150361 gal	---	1422,38 kg	100%
5	46,3%	136,62 MJ/gal	92,19 gal	973,65 kg	448,73 kg	11%
6	52%	136,62 MJ/gal	82,08 gal	866,92 kg	555,46 kg	32%

Para el caso del hidrogeno, el valor del poder calorífico esta dado en energía sobre unidades de masa por lo que se aplicó la ecuación 2.10, y las emisiones generadas por su consumo es únicamente agua.

Sin embargo, cabe mencionar que existen diversos métodos para la producción Hidrogeno que si generan emisiones de GEI durante sus procesos. Los métodos de producción mediante electrolisis con energía limpia (Electricidad de fuentes renovables) no generan emisión alguna de GEI, dada la existencia de campos de generación eléctrica eólicos y solares en Galápagos, se podría analizar, en un estudio posterior, la implementación de generadores de hidrógeno, para lograr un ciclo de producción y uso de hidrogeno con huella de carbono cero.

### 3.4 Verificación Técnica de Viabilidad

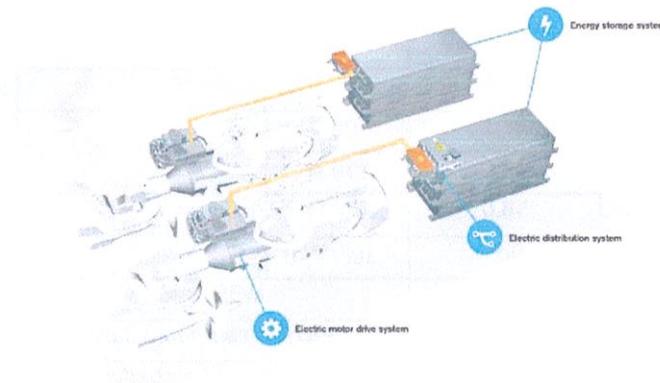
Finalmente se construyó la matriz de decisión descrita en la Tabla 3.9 en donde cada factor mencionado fue definido como una ventaja o en su defecto desventaja.

En comparación con el sistema base, el exceso de peso de las opciones detalladas en la Tabla 3.4 definirá si la capacidad de carga podría verse reducida. Una opción de sistema de propulsión con peso excesivo significaría una desventaja en la influencia de la capacidad de carga.

**Tabla 3.9 Matriz de validación técnica del sistema de propulsión.**

	Características Principales		V Max (nudos)	Influencia Sobre Capacidad De Carga	Restricciones				Reducción De Emisiones CO2	Puntuación
	Dimensiones	Eficiencia Energética			Comercial	Mantenimiento	Operación	Costos		
✓ Ventajas X Desventajas										
Sistema Base	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	6
Opción 1	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	6
Opción 2	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓	5
Opción 3	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓	5
Opción 4	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✓	4
Opción 5	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	5
Opción 6	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	7

Finalmente, se asignó una puntuación de 0 para las desventajas y de 1 para las ventajas para escoger el sistema de propulsión. La opción 6 que corresponde al sistema con motor principal híbrido en paralelo, ver Figura 3.4, aparece como el más viable para su implementación por presentar mejores características en dimensiones, eficiencia energética, restricciones relativas a la provisión de los equipos/repuestos, cumplimiento de los requerimientos de diseño, y reducción de las emisiones de CO2.



**Figura 3.4 Esquema del sistema de propulsión Volvo Penta Híbrido (VOLVO PENTA, 2020).**

### 3.5 Sistema propulsor propuesto para lanchas rápidas con bajas emisiones

El sistema propulsor seleccionado es complementado con un tablero y un Joystick para el control de la interisla, ver Figura 3.5. Además, las características del sistema de propulsión híbrido en paralelo se detallan en la Tabla 3.10.

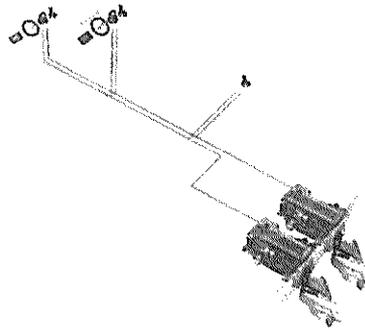


Figura 3.5 Control del sistema de propulsión (VOLVO PENTA, 2020).

Tabla 3.10 Sistema de propulsión seleccionado.

Screw		Twin
Potencia Max (kW)		538
Velocidad Max (nudos)		32
Motor		Híbrido
		Paralelo
		Diésel
		Volvo Penta
Modelo		D6-380
Dimensiones Por Motor	L (m)	1,36
	B (m)	0,84
	D (m)	0,87
	W (kg)	760
Max RPM		3500
Distribuidor más Cercano		Ecuatre S.A.
Dificultad de Mantenimiento		Especializado
Dificultad de Operación		Fácil
Costo Aproximado		\$ 370.400,94

Para la operación del sistema, el capitán o timonel podrá seleccionar de entre las siguientes opciones de funcionamiento:

- Operación con el motor de combustión.
- Operación con el motor eléctrico.
- Operación dual de los motores eléctrico y combustión.

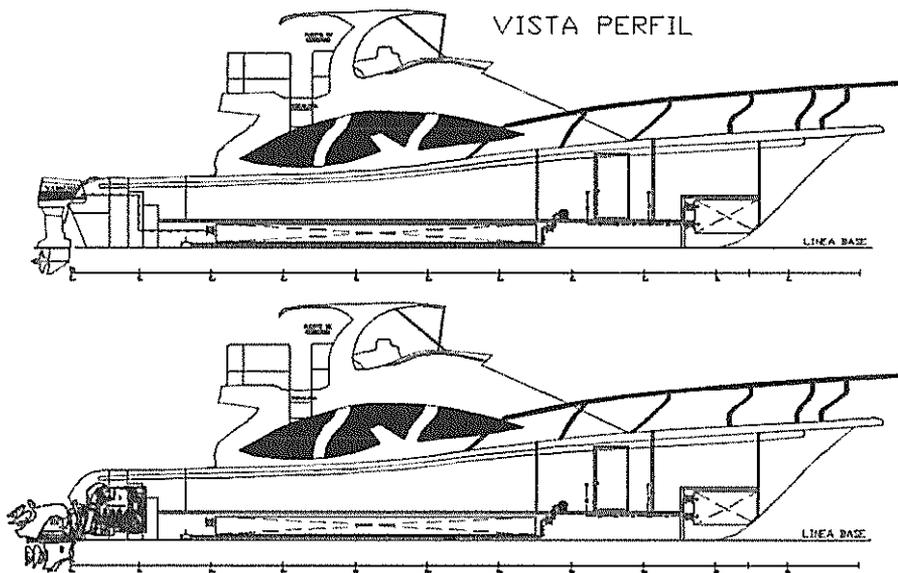
Estas opciones no tienen implicaciones operativas, ya será decisión del capitán o timonel seleccionarlas en la navegación acorde su pericia. Además, estos modos de operación son específicos del motor, por lo que las eficiencias utilizadas en el dimensionamiento y selección de los componentes del sistema son las mismas.

Debido que es un sistema nuevo en el mercado no se tiene información precisa respecto del mantenimiento y costos operativos. En el Apéndice C se enlistan los contactos utilizados para obtener información del proveedor y los encargados de marketing del sistema.

### **3.5.1 Cambios ocasionados en actuales lanchas interislas**

Con respecto a la distribución de pesos se tiene que actualmente, las embarcaciones interislas típicamente utilizan un conjunto de tres motores fuera de borda acoplados al espejo, con un peso total de 870 kg, mientras que los motores híbridos seleccionados tienen un peso total de 1520 kg, ver Figura 3.6. Esta diferencia de pesos modifica los siguientes parámetros:

- El asiento estático de la interislas con el sistema fuera de borda actualmente instalado es de 3° hacia proa con carga completa, velocidad cero, y con calado medio de 0.51 metros (Isaac et al., 2020. pag 10), se consultó a uno de los autores el sistema de referencia utilizado. Además, para esta misma condición de carga la embarcación tiene 8.79 toneladas desplazamiento, un KML de 22.03 metros, y el brazo de asiento es de 4.41 metros debido a que el LCB se encuentra ubicado a 1.09 metros hacia popa de la sección media. Por lo que haciendo un análisis de momentos el asiento estático de la interislas con el sistema híbrido paralelo propuesto sería de 2.15° hacia proa debido al incremento de peso en popa.



**Figura 3.6 Vista de perfil de la instalación del nuevo sistema vs el actual.**

- El peso del triple fuera de borda es de 897kg y el peso de doble motor híbrido paralelo es de 1520kg, por tanto, el incremento de peso en la embarcación es de 623 kg.
- Debido al aumento de peso la capacidad de pasajeros se ve levemente afectada disminuyendo 4 personas, debido a que parte del peso se compensa con el combustible que se va a ahorrar.
- En caso de mantener la misma capacidad de pasajeros el calado incrementaría levemente influyendo en la resistencia, pero la velocidad no se reduce debido a la reserva de potencia prevista en el dimensionamiento y selección del motor.
- Debido a que el cambio recomendado es encaminado hacia el uso de motores estacionarios, las embarcaciones actuales no cuentan con la distribución estructural adecuada, por lo que se requeriría de una reestructuración de la embarcación modificando totalmente la configuración actual en popa.
- La Figura 3.7 contrasta la distribución de espacios actual versus la necesaria en caso de establecer el cambio de sistema de propulsión, observándose que

la distribución de espacios no sería afectada pues los motores híbridos aprovechan el espacio en el que se acomodan los fuera de borda (Bañera).

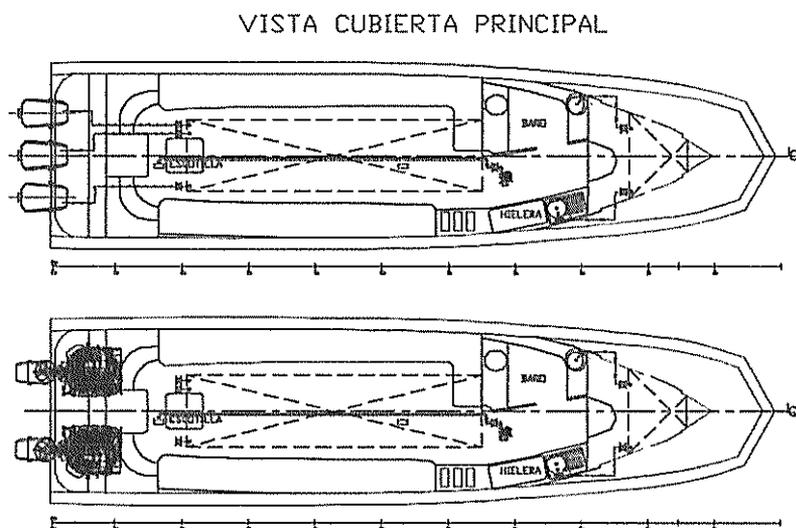


Figura 3.7 Vista superior de la instalación del nuevo sistema vs el actual.

### 3.6 Comparación de costos

En base a la información recabada de algunos de los armadores de las lanchas interislas (Lanchas Navegador, Neptuno I y II, Wolf, y Gema). Fueron establecidos los costos operativos de la embarcación utilizando el sistema fuera de borda convencional, ver Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Costos operativos típicos en las interislas.

Cambio de aceite motor	\$ 125,00
Cambio de aceite transmisión	\$ 75,00
Cambio de filtros	\$ 120,00
Cambio de empaques	\$ 90,00
Puesta a punto la refrigeración	\$ 225,00
Cambio de bujías	\$ 150,00
Cambio de ánodos de zinc	\$ 600,00
Cambio de Correa de tiempo	\$ 225,00
Overhaul del motor	\$ 5.000,00

Cada marca posee y provee a sus clientes de información para preservar sus motores, Torralvo recomienda la frecuencia mínima de mantenimiento para motores fuera de borda 4 tiempos, tal como se describe en la Tabla 3.12 (Torralvo Jiménez, 2011).

**Tabla 3.12 Frecuencia de mantenimiento para fuera de borda** (Torralvo Jiménez, 2011).

Horas	Tareas de Mantenimiento
100 horas	Cambio de aceite motor
	Cambio de aceite transmisión
	Cambio de filtros
	Cambio de empaques
200 horas	100 horas
300 horas	100 horas + Puesta a punto la refrigeración
400 horas	100 horas
500 horas	100 horas + Cambio de bujías
600 horas	300 horas
700 horas	100 horas
800 horas	100 horas + Cambio de ánodos de zinc
900 horas	300 horas
1000 horas	500 horas + Cambio de Correa de tiempo

El fuerte ritmo de trabajo de los motores fuera de borda en las interislas exige a los armadores cumplir con las recomendaciones de mantenimiento de la Tabla 3.12, de lo dialogado con los armadores se conoce que cumplen con estas recomendaciones ya que son similares a las dadas por la casa comercial.

Además, durante estos conversatorios se conoció también que las interislas operan todos los días excepto cuando no hay pasajeros (No existen datos, ni estadísticas para determinar el número de días sin operar), y que los motores solo tienen una vida útil de 4 años aproximadamente (9.000 horas a 10.000 horas).

Con respecto a los costos operativos y considerando una embarcación interisla con 3 motores, que labora 30 días al mes con un tiempo de operación diaria de 6.5 horas (funcionamiento continuo, ver Tabla 2.2), se requeriría de un elevado presupuesto

para mantenimiento y operación tal como se muestra en la Tabla 3.13 para periodos de uno, cuatro y diez años (vida útil típica de motores intra borda).

**Tabla 3.13 Costos operativos de un sistema fuera de borda en una interislas.**

	Costos	1 años (2340 horas)	4 años (9360 horas)	10 años (23400 horas)
Costo de Compra	\$ 84.000,00	\$ 84.000,00	\$ 168.000,00	\$ 252.000,00
Costo combustible día	\$ 350,17	\$ 126.061,20	\$ 504.244,80	\$ 1.260.612,00
Mantenimiento 100 horas	\$ 410,00	\$ 1.230,00	\$ 4.100,00	\$ 9.840,00
Mantenimiento 200 horas	\$ 410,00	\$ 1.230,00	\$ 4.100,00	\$ 9.840,00
Mantenimiento 300 horas	\$ 635,00	\$ 1.905,00	\$ 6.350,00	\$ 15.240,00
Mantenimiento 400 horas	\$ 410,00	\$ 820,00	\$ 3.690,00	\$ 9.840,00
Mantenimiento 500 horas	\$ 560,00	\$ 1.120,00	\$ 5.040,00	\$ 12.880,00
Mantenimiento 600 horas	\$ 635,00	\$ 1.270,00	\$ 5.715,00	\$ 14.605,00
Mantenimiento 700 horas	\$ 410,00	\$ 820,00	\$ 3.690,00	\$ 9.430,00
Mantenimiento 800 horas	\$ 1.010,00	\$ 2.020,00	\$ 9.090,00	\$ 23.230,00
Mantenimiento 900 horas	\$ 635,00	\$ 1.270,00	\$ 5.715,00	\$ 14.605,00
Mantenimiento 1000 horas	\$ 785,00	\$ 1.570,00	\$ 7.065,00	\$ 18.055,00
Overhaul 4000 horas	\$ 15.000,00		\$ 30.000,00	\$ 75.000,00

**Tabla 3.14 Comparación de costos operativos aproximados.**

	Fuera de Borda	Híbrido Paralelo
Costo de Compra	\$ 84.000,00	\$ 370.400,94
Vida Útil	4 años	10 años
Costo combustible al día	\$ 350,17	\$ 160,05
Costo combustible mes (30 días)	\$ 10.505,10	\$ 4.801,68
Costo combustible 1 año	\$ 126.061,20	\$ 57.620,16
Costo combustible 4 años	\$ 504.244,80	\$ 230.480,64
Costo combustible 10 años	\$ 1.260.612,00	\$ 576.201,60

En su contraparte la poca información obtenida del fabricante y del proveedor de los motores híbridos dada tal como se menciona en la sección 3.5, nos limita a recurrir a recomendaciones de mantenimiento y operación como los dados por la FAO (FAO, 2005). Para determinar los costos de mantenimiento se asume un presupuesto del 10% del valor de reposición a nuevo del motor (FAO, 2005). Revisando esta

suposición en los costos conocidos de mantenimiento de los motores fuera de borda, se verificó que el presupuesto respecto del valor de reposición a nuevo es del 16%, valor diferente a lo esperado según la recomendación dada por de la FAO. Por tanto, no se puede tener certeza de los costos de mantenimiento reales del sistema híbrido en paralelo sugerido.

Haciendo un análisis por la vida útil estimada, según el Perito valuador de Bancos y Seguros el Ing. Hugo Rodas para un motor estacionario es de 10 años aproximadamente, pero varía dependiendo del ritmo de trabajo, el mantenimiento dado, y los overhaul realizados; por lo que considerando que si en 10 años compramos un solo conjunto de motores híbridos a un costo aproximado de \$370.400,94, en el mismo periodo se comprarían tres conjuntos de motores fuera de borda a un costo aproximado de \$252.000. Un conjunto al primer año, el segundo al finalizar el cuarto año, y el tercer conjunto al terminar el octavo año.

En lo que respecta a combustibles, la implementación de un sistema híbrido supondría el cambio de gasolina a diésel. Los costos de los combustibles en Galápagos son diferentes debido a subsidios adicionales del gobierno central y varían de acuerdo el precio del petróleo, considerando los últimos costos reportados por los Armadores de \$2.60 el galón de Gasolina turística y \$1.95 el galón de Diésel, debido al cambio de combustible se tendría un ahorro aproximado de \$0.65 por galón.

De la Tabla 3.8, por la eficiencia energética del nuevo sistema, el consumo de combustible se reduce un 39%; lo que significa que en un día de operación en lugar de gastar aproximadamente 134,68 galones de gasolina a un costo de \$350, se utilizarían cerca de 82,08 galones de diésel por un costo diario de \$160. Analizando dentro de un periodo de cuatro años el ahorro debido al cambio de combustible y la reducción de consumo, supondría una ventaja de \$273.674,16 aproximadamente, a favor del sistema híbrido, ver Tabla 3.14.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La dependencia a los combustibles fósiles para las actividades humanas en las Islas Galápagos presenta la necesidad de establecer alternativas que reduzcan el consumo de combustibles y las emisiones generadas dentro de una reserva natural. En el presente Proyecto, Frente a esta necesidad se buscaron alternativas para el transporte de pasajeros entre puertos poblados, dado que en esta actividad operan diariamente más de 30 lanchas produciendo aproximadamente 16 mil toneladas de CO<sub>2</sub> al año. Para lograr una reducción significativa a la contaminación por los hidrocarburos y los gases de efecto invernadero, se analizó la posibilidad de reemplazar el sistema de propulsión en estas embarcaciones. Los resultados de este trabajo permiten establecer alternativas factibles de sistemas de propulsión, marcando un gran paso hacia la reducción de emisiones en lanchas rápidas y mediana autonomía, pues la flota interislas es el responsable de aproximadamente el 9% del consumo total de combustibles fósiles dentro de las islas encantadas.

Como deficiencia en el proyecto se puede reconocer la falta de información económica respecto del sistema híbrido en paralelo. Este sistema fue identificado como un sistema viable para la implementación desde el punto de vista técnico; sin embargo, con lo recabado se puede mencionar que no se recomienda su implementación a corto y mediano plazo dentro de Galápagos, debido a que primero se debería verificar los resultados obtenidos en la operación de estos sistemas recientemente implementados en Ferrys para los Fiordos Noruegos.

### Conclusiones

A las condiciones diseño especificadas para una lancha de transporte interislas a plena carga con velocidad crucero de 28 nudos, 6.5 horas de ruta, y 105 millas náuticas de navegación, se determinó que el requerimiento de energía es de 1619,8 kWh. Como referencia este valor sería el equivalente a la generación

eléctrica de 3 paneles solares de 0.4kW para la Heliofanía registrada en Galápagos durante un año.

En lanchas menores de 30 toneladas se identificaron alternativas de sistemas de propulsión, dentro de los cuales el motor principal es el componente responsable de transformar la energía y durante el proceso producir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, para reducir las emisiones se debe aumentar la eficiencia energética modificando o reemplazando los motores, logrando mejor aprovechamiento y menor consumo de combustible.

Pese a la reducción a cero de las emisiones en los sistemas de propulsión eléctricos su voluminosa fuente de alimentación a bordo excede del espacio disponible en la lancha. Sin embargo, el sistema híbrido paralelo destaca por sus características, buena eficiencia energética, y el potencial de reducir un 32% las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, el sistema de propulsión con motor híbrido en paralelo cumple con la viabilidad técnica garantizando autonomía sin incrementar el tiempo de navegación, reduciendo consumo y emisiones de CO<sub>2</sub>.

Por la falta de madurez tecnológica en el sector naval, no se dispone de información respecto de la operación y mantenimiento de un sistema híbrido en paralelo para embarcaciones menores de 30 toneladas. La innovación de empresas como Volvo Penta desde el 2019 permite incursionar en estas alternativas para la propulsión con baja huella de carbono. Pese a la escasa información, se logró determinar desde el punto de vista económico, que estos motores son adquisitivamente onerosos en comparación con la propulsión actualmente usada en las interislas. Además, tienen una vida útil 3 a 4 veces mayor, y presentan un importante ahorro del presupuesto de operación diario aproximadamente del 50%, debido a la migración de gasolina a combustible diésel y la mejora en eficiencia energética que reduce su consumo.

## Recomendaciones y trabajo futuro

- Realizar una propuesta para la Subsecretaría de Puertos y Transporte Marítimo y Fluvial, sugiriendo un método estandarizado para el registro de la información de los buques, evitando errores y datos redundantes.
- Tomar en cuenta que para la propulsión marina solo los motores síncronos, sin escobillas, y de imanes permanentes son los indicados y más eficientes; así evitaremos extraviarnos en la diversidad de los tipos de motores eléctricos y sus aplicaciones.
- Considerar la alternativa del uso de sistemas de propulsión eléctrica marina, para requerimientos de operación con de velocidad, tiempo de ruta, y autonomía adecuados.
- Considerar el diseño de una embarcación que incluya un sistema de propulsión estacionario híbrido en paralelo desde su concepción.
- Analizar la factibilidad de implementar generadores de hidrógeno verde, dada la existencia de campos de generación eléctrica eólicos y solares en Galápagos.
- Analizar la influencia del estado de mar de Galápagos en el comportamiento hidrodinámico de un sistema Water-Jet para determinar las afectaciones a los mecanismos y componentes del sistema.
- Analizar los resultados obtenidos por la operación de los Ferrys que operan en los fiordos noruegos, primeros en implementar el sistema híbrido en paralelo de la marca Volvo Penta.

# BIBLIOGRAFÍA

- ALDEA. (2017). *KaraSolar*. <https://karasolar.com/our-motivations>
- Almeter, J. M. (1993). Resistance prediction of planing hulls: state of the art. *Marine Technology and SNAME News*, 30(4), 297–307.
- Arcand, L. (1966). *Waterjet Propulsion for Small Craft* (PWA FR-1813). <https://docplayer.net/28952293-Waterjet-propulsion-for-small-craft.html>
- Arribas, L., & Amador, J. (2017). *Estudio del potencial de las embarcaciones solares en la Amazonía*.
- Asociacion Española de Hidrogeno. (2020). *Hidrógeno*. [http://www.aeh2.org/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=41&lang=es](http://www.aeh2.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=41&lang=es)
- Ballard. (2019). *Ballard*. <https://www.ballard.com/>
- Blakers, A., Zin, N., McIntosh, K. R., & Fong, K. (2013). High efficiency silicon solar cells. *Energy Procedia*, 33(December), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.033>
- Blount, D. L., & Bartee, R. J. (1997). Design of propulsion systems for high-speed craft. *Marine Technology and SNAME News*, 34(4), 276–292.
- Boretti, A. A. (2012). Energy recovery in passenger cars. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 134(2). <https://doi.org/10.1115/1.4005699>
- BP. (2020). *Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets . and authoritative publications in the field of energy The Statistical Review world of World Energy and data on world energy markets from is The Review has been providing.* 66. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>
- Bueno Juan Pablo, V. M. (2017). *DETERMINACION DEL SISTEMA DE PRORPULSION DE UN PESQUERO* (Facultad de Ingeniería Mecánica (ed.)). UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA. <https://es.calameo.com/read/005162427cf19b09a17ca>
- Bulten, N. (2006). Numerical analysis of a waterjet propulsion system. In *Dissertation Abstracts International*. <http://alexandria.tue.nl/extra2/200612081.pdf>

- Claramunt, I. F., & Granados, J. J. (2018). *Estudio métodos de predicción de resistencia al avance*. 8–9.
- Plan de Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial del Régimen Especial de Galápagos, Pub. L. No. ISBN-978-9942-22-059-2, 1 (2016).
- David W., T. (1980). *ASPECTS OF PERFORMANCE EVALUATION OF WATERJET PROPULSION SYSTEMS AND A CRITICAL REVIEW OF THE STATE-OF-THE-ART*. May.
- Delgado Plaza, E. A. (2019). *Notas de Clase de Energía Solar Fotovoltaica*.
- Dirección Regional ARCH-Galápagos. (2020). *Consumo de combustibles fósiles en Galápagos*. <https://www.controlhidrocarburos.gob.ec/>
- FAO. (2005). *FORMULACIÓN Y EMPLEO DE PERFILES DE PROYECTO* (Dirección del Centro de Inversiones Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (ed.)). <http://www.fao.org/3/a0322s/a0322s00.htm#Contents>
- Fernández, I. A., Gómez, M. R., Gómez, J. R., & Insua, Á. B. (2017). Review of propulsion systems on LNG carriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67(January), 1395–1411. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.095>
- Resolución 0082-R, 16 (2018).
- Frauscher Shipyard. (2019). *Frauscher*. <https://www.frauscherboats.com/?lang=en>
- Generalitat de Catalunya Comisión Interdepartamental del Climático Cambio. (2011). *GUÍA PRÁCTICA PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)*.
- Guaipatin, C., & Schwartz, L. (2014). *Ecuador - Análisis del Sistema Nacional de Innovación*. 1–190.
- Heppeler, G., Sonntag, M., & Sawodny, O. (2014). Fuel efficiency analysis for simultaneous optimization of the velocity trajectory and the energy management in hybrid electric vehicles. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 19, 6612–6617. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-za-1003.00286>
- HOLEDECK. (2017). *Designer's Guide*. 5–21. <https://holedeck.com/descargas/>
- Holtrop, J., & Mennen, G. G. . (1982). A N APPROXIMATE POWER PREDICTION METHOD. *International Shipbuilding Progress*, 29.
- Hu, Q., Zhou, W., & Diao, F. (2019). Interpretation of Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. In *Ship Building of China* (Vol. 60, Issue 1).

- INOCAR. (2005). Derrotero De La Costa Continental E Insular Del Ecuador. *Armada Del Ecuador Instituto Oceanografico*, 4, 56. [http://www.inocar.mil.ec/boletin/ALN/Derrotero\\_2005.pdf](http://www.inocar.mil.ec/boletin/ALN/Derrotero_2005.pdf)
- IPCC. (2014). Climate Change 2014 Part A: Global and Sectoral Aspects. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. papers2://publication/uuid/B8BF5043-C873-4AFD-97F9-A630782E590D
- Isaac, J., Marchán, M., Katiuska, E., & Cevallos, V. (2020). *Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar " PRUEBAS DE MAR DE LANCHAS INTERISLAS DE GALÁPAGOS " Informe Técnico Preparado por: Enero 2020.*
- Kumar, D., & Zare, F. (2019). A Comprehensive Review of Maritime Microgrids: System Architectures, Energy Efficiency, Power Quality, and Regulations. *IEEE Access*, 7, 67249–67277. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2917082>
- Madsen, R., & Mccauley, I. (2017). *R / V ZERO-V. November.*
- Martínez, I. (2011). *Nuevo sistema de propulsión naval.* <https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/12273/DeLaLlanaMartinez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Matijasevic, I., Ingeniería, F., & Politecnica, U. (2013). *Diseño y construcción de una embarcación de practicaje propulsada mediante un sistema híbrido.*
- Meteonorm. (2019). *Radiacion Solar.* <https://meteonorm.com/en/>
- 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>
- Moya, M., & Arroyo, D. (2016). *catamarán " Génesis Solar " en el estrecho de Itabaca ( Islas Galápagos ).*
- NOAA Research. (2020). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide.* <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/graph.html>
- ONU. (2019). Informe de los objetivos del desarrollo sostenible. *Informe de Los Objetivos Del Desarrollo Sostenible 2019*, 64. [https://ods.org.mx/docs/doctos/SDG\\_Report2019\\_es.pdf](https://ods.org.mx/docs/doctos/SDG_Report2019_es.pdf)

- Paykani, A., & Shervani-Tabar, M. T. (2011). A comparative study of hybrid electric vehicle fuel consumption over diverse driving cycles. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 1(5), 052005. <https://doi.org/10.1063/2.1105205>
- Pratt, J. W., & Klebanoff, L. E. (2016). *Feasibility of the SF-BREEZE : a Zero-Emission , Hydrogen Fuel Cell , High-Speed Passenger Ferry*. September.
- Decreto Ejecutivo 270, 1 (2007).
- Radojic, D. (1988). Mathematical Model of Segmental Section Propeller Series for Open-Water and Cavitating Conditions Applicable in CAD. *Propellers '88 Symposium, October*.
- Rincón Castrillo, E. D., García Pabón, J. J., & Bermúdez Santaella, J. R. (2019). Estado Del Arte De Las Celdas De Combustible. *Revista Colombiana De Tecnologías De Avanzada (Rcta)*, 1(33). <https://doi.org/10.24054/16927257.v33.n33.2019.3320>
- Rivadeneira, H. (2017). *Curso: cálculo de banco de baterías para un sistema fotovoltaico*. Www.Bits.Com.Ec. <https://www.youtube.com/watch?v=CMBfd0mtkIM>
- Sandia National Laboratories. (2019). *Sandia National Laboratories*. <https://www.sandia.gov/index.html>
- Savitsky, D. (1964). *SavitskyPlaningHulls1964 .pdf*.
- Savitsky, D., & Mercier, J. A. (1667). Resistance of Transom-stern Craft in the Pre-planning Regime. In *Stevens Institute of Technology*.
- Skjong, E., Rødskar, E., Molinas, M., Johansen, T. A., & Cunningham, J. (2015). The Marine Vessel's Electrical Power System: From its Birth to Present Day. *Proceedings of the IEEE*, 103(12), 2410–2424. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2496722>
- Soel Yachts. (2019). *Soel Yachts Shipyard*. <http://soelyachts.com/>
- Subsecretaría de Puertos y Transporte Marítimo y Fluvial. (2020). *Catastro de embarcaciones registradas en las capitanías de Galápagos*. <https://www.obraspublicas.gob.ec/puertos-y-transporte-maritimo-y-fluvial/>
- Symington, W. P., Belle, A., Nguyen, H. D., & Binns, J. R. (2016). Emerging technologies in marine electric propulsion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 230(1), 187–198. <https://doi.org/10.1177/1475090214558470>
- TEMA Marine. (2019). *TEMA Marine*. <http://www.tema.hr/marine/>
- TORQEEDO. (2020). *TORQEEDO ELECTRIC MARINE MOTORS*.

<https://www.torqueedo.com/en>

Torralvo Jiménez, M. A. (2011). *PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PARA MOTORES FUERA DE BORDA YAMAHA CUATRO TIEMPOS DE PROPÓSITO COMERCIAL*. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR.

van Biert, L., Godjevac, M., Visser, K., & Aravind, P. V. (2016). A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources*, 327(X), 345–364. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.007>

VOLVO PENTA. (2020). *VOLVO PENTA MARINE*. <https://www.volvopenta.com/marine/>

WWF. (2014). *Galapagos a la vanguardia*. <https://www.wwf.org.ec/?211390/Solaris-la-lancha-con-energia-solar>

YAMAHA. (2020). *YAMAHA MARINE*. <https://yamahaoutboards.com/en-us/>

# APÉNDICES

## APÉNDICE A

### Selección del propulsor

Los requerimientos para el diseño del sistema propulsor cero emisiones descritos por el perfil operacional de la Tabla 2.2, establecen que la embarcación navegará en una zona con "Estado de mar 4", a una velocidad de 28 nudos durante 2 horas por viaje.

Asumiendo que por el buen rendimiento de los propulsores Water-Jet se desea utilizarlos en las Islas Galápagos, pero según la escala de Douglas en esta zona las olas variarían entre 1.25 a 2.5 metros de altura, por lo que haciendo un análisis simple podríamos suponer que en un momento determinado en la succión del sistema no habría ingreso de agua provocando pérdidas de eficiencia y si el fenómeno es frecuente posiblemente se producirían averías. Sin embargo, en futuros trabajos se podría realizar un análisis hidrodinámico profundizando más al detalle en este fenómeno para determinar las afectaciones reales al sistema.

Debido a los requerimientos de diseño y el oleaje correspondiente al estado de mar en Galápagos, el propulsor tipo hélice es el apropiado para el sistema de propulsión. El cálculo de eficiencia de las hélices de sección segmentada de cara plana usadas en lanchas rápidas, fue realizado mediante la implementación las series sistemáticas KCA de Gawn-Burrill, utilizando el modelo matemático de Radojicic (Radojicic, 1988). Las hélices de la Tabla 4.1 y Tabla 4.2 son de similares características a las registradas durante las pruebas de mar realizadas en las embarcaciones Modelo A y Modelo M detalladas en la Tabla 1.4 y la Tabla 1.5 respectivamente (Isaac et al., 2020).

**Tabla 4.1 Hélices de serie KCA de características similares a las de Modelo A.**

Propeller	BAR	P/D	Sigma					
			6,3	2	1,5	1	0,75	0,5
312	0,5	1,2	6,3	2	1,5	1	0,75	0,5
412	0,65	1,2	6,3	2	1,5	1	0,75	0,5
112	0,8	1,2	6,3	2	1,5	1	0,75	0,5
512	0,95	1,2	6,3	2	1,5	1	0,75	0,5
212	1,1	1,2	6,3	2	1,5	1	0,75	0,5

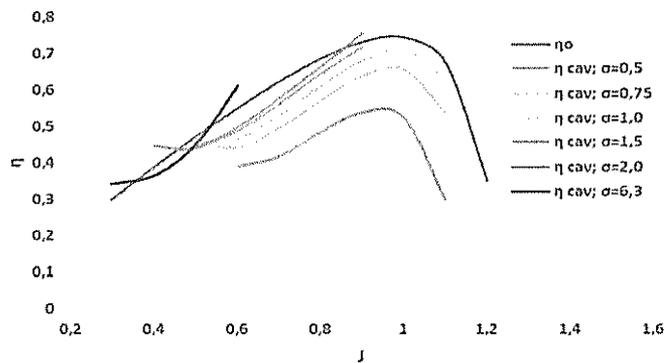
**Tabla 4.2 Hélices de serie KCA de características similares a las de Modelo M.**

Propeller	BAR	P/D	Sigma					
			6,3	2	1,5	1	0,75	0,5
310	0,5	1	6,3	2	1,5	1	0,75	0,5
410	0,65	1	6,3	2	1,5	1	0,75	0,5
110	0,8	1	6,3	2	1,5	1	0,75	0,5
510	0,95	1	6,3	2	1,5	1	0,75	0,5
210	1,1	1	6,3	2	1,5	1	0,75	0,5

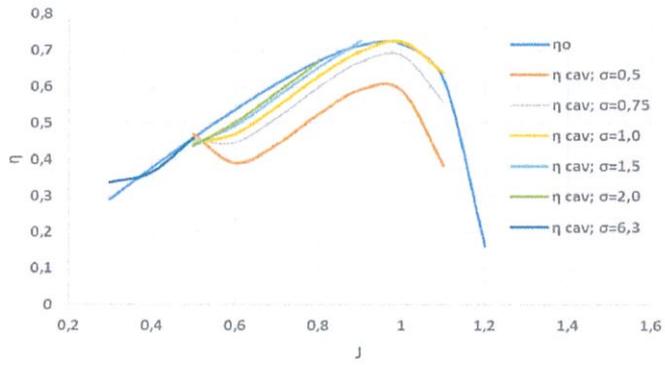
Para determinar el rendimiento propulsivo utilizado en el cálculo de dimensionamiento de la Tabla 2.4, se utilizó la información de la Figura 4.2 la cual pertenece a la hélice 412 de la serie KCA de similar geometría que las utilizadas en el modelo A.

Debido a que en el desarrollo del análisis de este estudio se realiza un dimensionamiento preliminar de los sistemas, se mantuvo la misma geometría para la selección del propulsor.

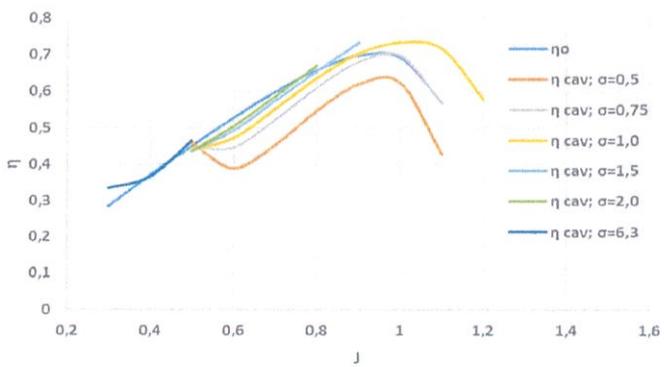
En caso de llevarse a cabo la ejecución del proyecto, se tendría que verificar el comportamiento de la hélice en conjunto con el sistema, tal como se recomienda en el espiral de diseño.



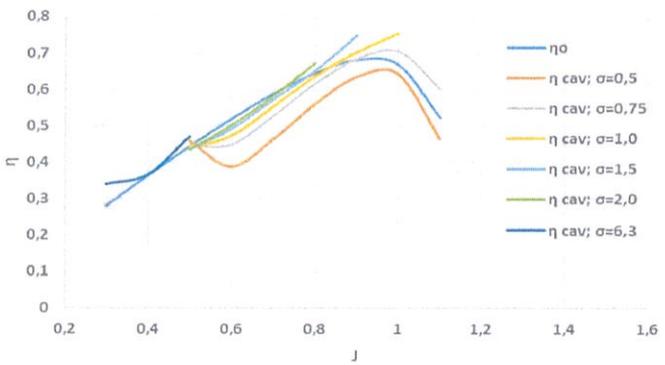
**Figura 4.1 Eficiencia de Hélice P/D = 1.2, 0.5 BAR.**



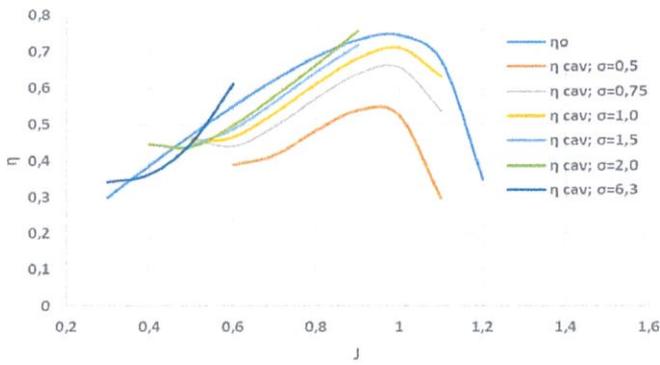
**Figura 4.2 Eficiencia de Hélice P/D = 1.2, 0.65 BAR.**



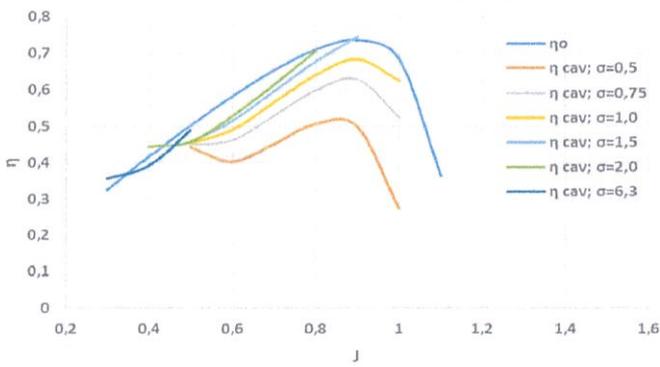
**Figura 4.3 Eficiencia de Hélice P/D = 1.2, 0.8 BAR.**



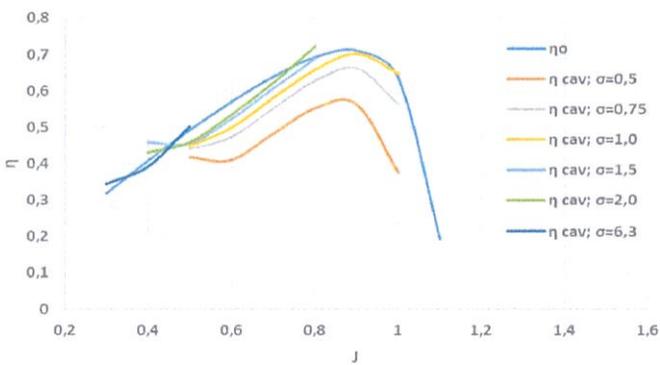
**Figura 4.4 Eficiencia de Hélice P/D = 1.2, 1 BAR.**



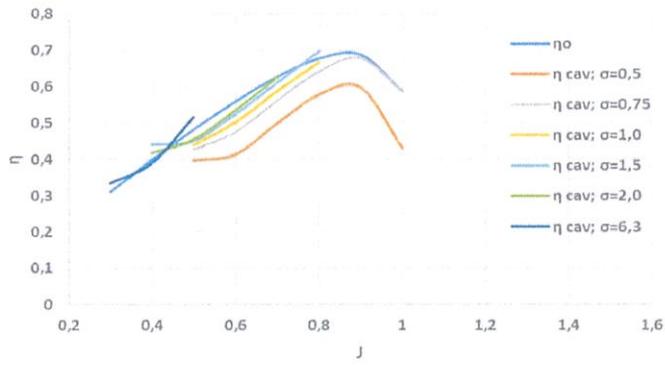
**Figura 4.5 Eficiencia de Hélice P/D = 1.2, 1.1 BAR.**



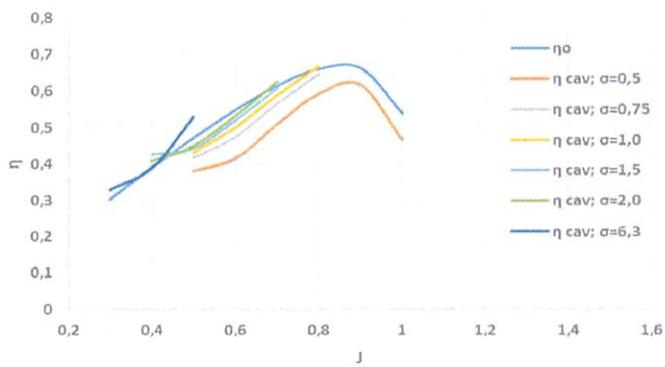
**Figura 4.6 Eficiencia de Hélice P/D = 1, 0.5 BAR.**



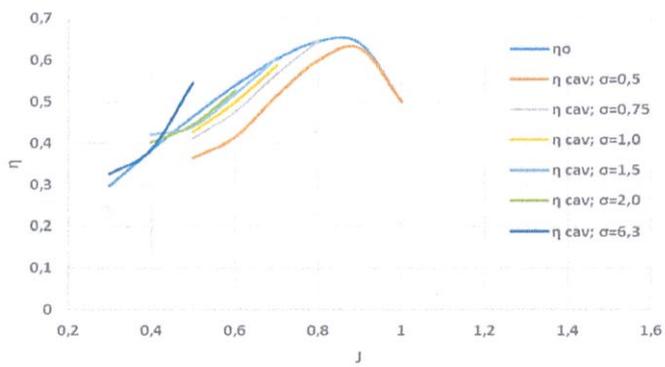
**Figura 4.7 Eficiencia de Hélice P/D = 1, 0.65 BAR.**



**Figura 4.8 Eficiencia de Hélice  $P/D = 1, 0.8 \text{ BAR}$ .**



**Figura 4.9 Eficiencia de Hélice  $P/D = 1, 1 \text{ BAR}$ .**



**Figura 4.10 Eficiencia de Hélice  $P/D = 1, 1.1 \text{ BAR}$ .**

## APÉNDICE B

### Dimensionamiento y selección de equipos para sistemas de propulsión eléctricos

En el ámbito naval existe poca bibliografía que detalle el dimensionamiento de sistemas de propulsión eléctrica. En este apéndice se detalla paso a paso una compilación de procesos identificados, para la selección del motor principal y sus componentes en función del IHP requerido (Molland et al., 2011) (Matijasevic et al., 2013) (Moya & Arroyo, 2016) (Pratt & Klebanoff, 2016) (ALDEA, 2017) (Madsen & Mccauley, 2017).

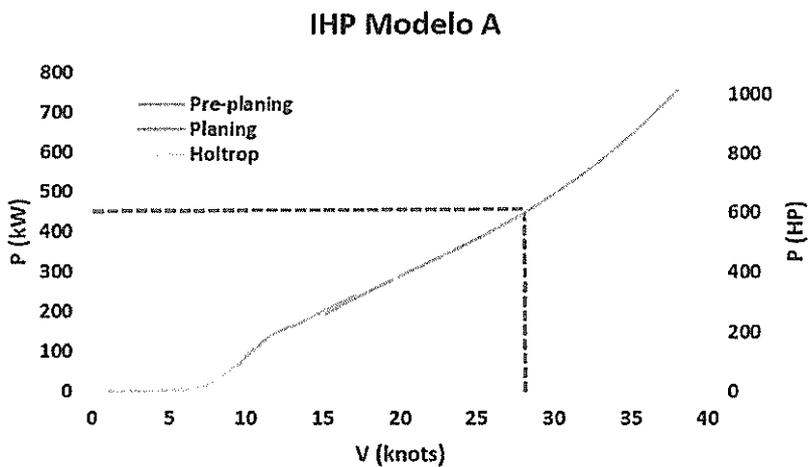


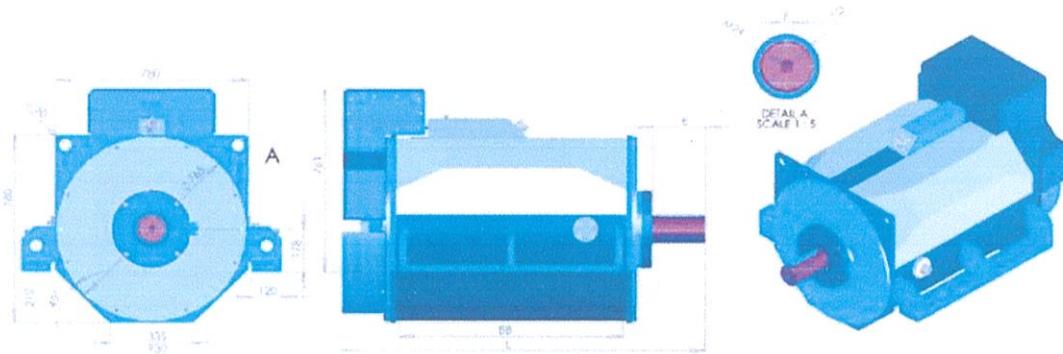
Figura 4.11 IHP requerido por el Modelo A.

Partiendo de los valores de IHP como parámetros de selección del motor principal, en la Figura 4.11 se identificó que para alcanzar los 28 nudos del requerimiento de diseño la potencia instalada requerida es de 457,5 kW (613.5 HP). A esta potencia la demanda de energía EPR, necesaria para completar una ruta completa es 1619.8 kWh (5831.48 MJ).

#### Selección de moto principal

Para el valor de la potencia instalada requerida se encontraron varias opciones de motores con imanes permanentes provistos por diferentes fabricantes, de los que fue

seleccionado el motor TEMA modelo LPMR-500.6.10AW de 500kW de potencia, con un peso de 1030 kg y dimensiones 1.2 x 1.0 x 0.9 en metros, ver Figura 4.12.



**Figura 4.12 Motor eléctrico estacionario seleccionado marca TEMA (TEMA Marine, 2019).**

### Selección de baterías

Durante el dimensionamiento del banco de baterías se utilizó la ecuación 2.4 para determinar la capacidad mínima de carga, tomando en cuenta la tensión a la que el motor Tema opera, el cálculo se resume en la Tabla 4.3

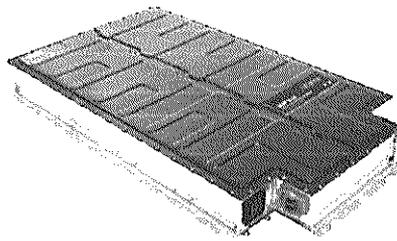
**Tabla 4.3 Calculo de capacidad mínima del banco de baterías.**

EPR	1619.8 kWh
A	1 día
D	80%
V	360 V
CBB	5627,8 Ah

El fabricante Torqueado dispone de una batería de litio desarrollada en conjunto con la marca automotriz BMW para usos en medios marinos, ver Figura 4.13. Este equipo se caracteriza por ser de alta densidad energética, por lo cual fue seleccionado como componente de los sistemas de propulsión eléctrica. La Tabla 4.4 resume sus principales características.

**Tabla 4.4 Características batería ion-litio seleccionada.**

Batería	Torqueedo modelo i3
Tensión nominal	360 V
Potencia max. Continua	55kW
Capacidad	40 kWh
Peso	278 kg
Dimensiones	1666 x 964 x 174 mm



**Figura 4.13 Batería Torqueedo modelo i3 seleccionada (TORQEEDO, 2020).**

Dado que Torqueedo entrega directamente la capacidad energética, el número de baterías requeridas se determina mediante la ecuación 2.6, evitándose la estimación del número de baterías en función de la capacidad mínima de carga.

**Tabla 4.5 Cantidad de baterías requeridas.**

EPR	1619,8 kWh
CEB	40 kWh
NB	41

#### Selección de paneles solares

En el caso de los sistemas de propulsión con energía solar se implementa la generación eléctrica a bordo, a través de paneles fotovoltaicos, solamente para recargar el banco de baterías, y darle autonomía a la embarcación. La cantidad de paneles requeridos fue determinada con la ecuación 2.7, en función de la irradiación solar de la zona (Meteonorm, 2019), y la capacidad de generación de los paneles seleccionados.

En la Tabla 4.6 se detallan los datos del panel monocristalino de alto rendimiento seleccionado y que fueron utilizados en el cálculo que se resume en la Tabla 4.7.

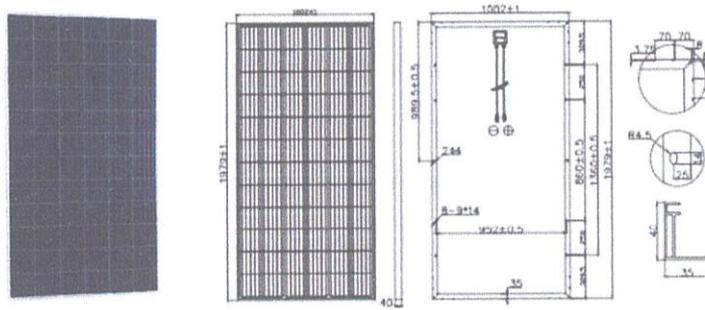
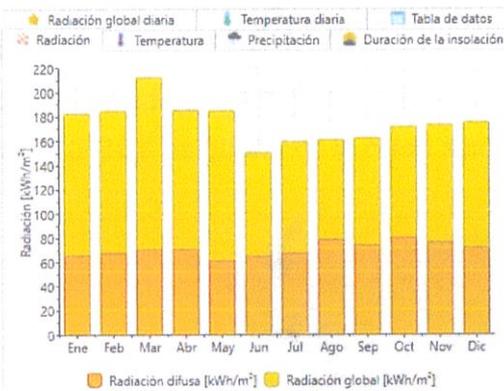


Figura 4.14 Panel solar seleccionado.

Tabla 4.6 Características panel solar seleccionado

Panel	ESPSC 400M
Potencia	400 W
Voltaje Max.	41.7 V
Corriente Max.	9.6 A
Eficiencia del modulo	20.17 %
Peso	22.5 kg
Dimensiones	1979 x 1002 mm

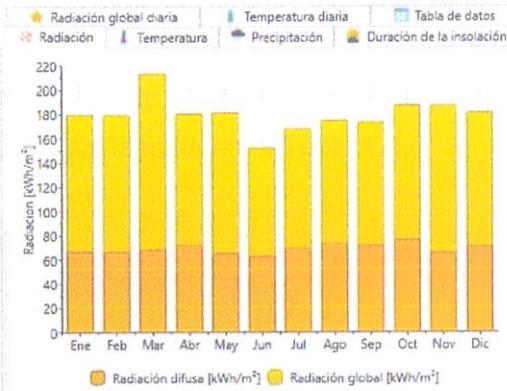
San Cristobal



Datos de resultado

Incertidumbre de valores anuales: Gh = 4%, Bn = 7%, Ta = 0.3 °C  
 Tendencia de gh / década: - Variabilidad de gh / año: -999.0%  
 Sitios de radiación interpolados: Datos de satélite (Parte de los datos de satélite: 100%)

Santa Cruz



Datos de resultado

Incertidumbre de valores anuales: Gh = 6%, Bn = 11%, Ta = 2.4 °C  
 Tendencia de gh / década: - Variabilidad de gh / año: -999.0%  
 Sitios de radiación interpolados: Datos de satélite (Parte de los datos de satélite: 100%)

Figura 4.15 Irradiación solar mensual total en Galápagos (Meteonorm, 2019).

El peor mes es el mes de junio en el cual existe una irradiación mensual total de 150 kWh/m<sup>2</sup>, con lo cual en promedio tenemos aproximadamente 5 kWh/m<sup>2</sup> al día.

**Tabla 4.7** Calculo de cantidad de paneles requeridos

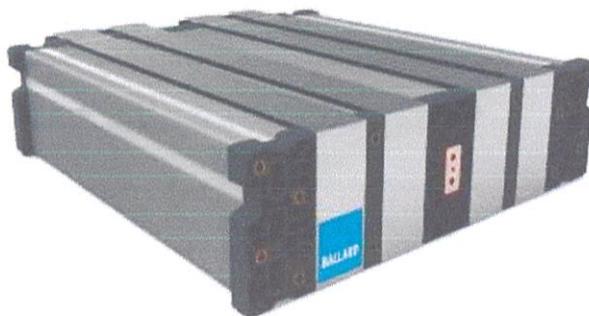
EPR	1619.8 kWh
Gt	5 kWh/m <sup>2</sup>
P	323.96 m <sup>2</sup>
n	20.17 %
S	1766.76 m <sup>2</sup>
Apanel	1.98 m <sup>2</sup>
NPS	893

#### Selección de H2 Fuel Cell

En estos sistemas de propulsión se implementa a bordo generación eléctrica mediante celdas de combustible de hidrogeno para el suministro eléctrico. Debido a que el motor eléctrico será alimentado de forma directa, la Potencia Eléctrica Requerida (PER) en la fuente es la potencia eléctrica requerida por el motor más un 20% (valor asumido) por perdidas en los circuitos de control.

La cantidad de celdas requeridas se determinó con la ecuación 2.9, el cálculo se muestra en la

Tabla 4.9 donde se utilizó el valor de la capacidad de generación eléctrica "Potencia nominal (FCC)" de 50 kW de la celda seleccionada descrita en la Tabla 4.8.



**Figura 4.16** Celda H2 Fuel Cell seleccionada (Ballard, 2019).

**Tabla 4.8 Características celda de hidrogeno seleccionada.**

Celda de combustible	BALLARD FCgen® –LCS
Potencia nominal	50 kW
Corriente	360 A
Voltaje nominal	139 V
Peso	28 kg
Dimensiones	498 x 425 x 133 mm
Fuel	Hidrogeno
Eficiencia	53.3%
Temperatura de arranque °C	-25

**Tabla 4.9 Calculo de cantidad de celdas de hidrogeno requeridas.**

PER	600 kW
FCC	50 kW
NFC	12

Se descartó el almacenamiento de hidrogeno en estado sólido, y líquido a temperaturas criogénicas para no requerir de equipos especializados. Por esta razón se identificó el almacenamiento de hidrogeno en condición gaseosa a presión como mejor opción para las lanchas interislas, considerando que este tipo de almacenamiento es el actualmente utilizado en vehículos terrestres impulsados por tecnología de hidrogeno. En los proyectos marinos SF-Brezza y Zero-V se almacena el hidrógeno en estado líquido.



**Figura 4.17 Tanque seleccionado para almacenamiento de hidrogeno a presión.**

**Tabla 4.10 Características tanque seleccionado.**

Tanque	HOLTHAUSEN
Material	Material compuesto
Presión de trabajo	700 Bar
Longitud	116 cm
Diámetro	32.8 cm
Peso vacío	53.6 kg
Capacidad	52 lt 24.45 Nm <sup>3</sup>

En el dimensionamiento del almacenaje de hidrogeno, se calculó la masa requerida usando la ecuación 2.10 para determinar el volumen a almacenar tal como se resume en la Tabla 4.11.

**Tabla 4.11 Calculo de masa del hidrogeno requerido** (Asociacion Española de Hidrogeno, 2020).

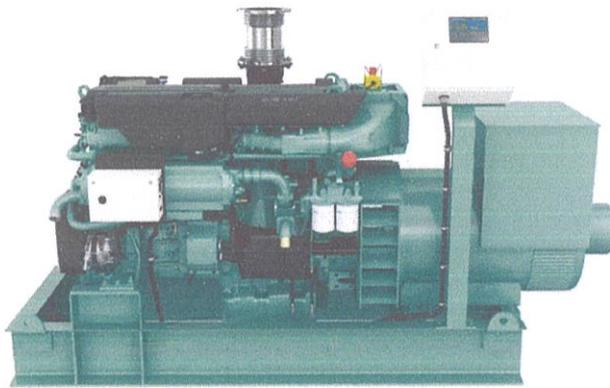
EPR	5831.48 MJ
VCH <sub>2</sub>	119.96 MJ/kg
E <sub>f</sub>	53.3%
MH <sub>2</sub>	91.2 kg
Volumen H <sub>2</sub>	1014.46 Nm <sup>3</sup>

Por las características del descritas en la Tabla 4.10 se conoce que 1 tanque de 52lts a 700bar contiene 24.45Nm<sup>3</sup> (metros cúbicos en condiciones normales) a 0°C. Si a condiciones normales el hidrogeno tiene una densidad de 0.0899 kg/Nm<sup>3</sup>, los 91.2kg requeridos equivaldrían 1014.46Nm<sup>3</sup> en estado gaseoso. Por lo tanto, se necesitarían aproximadamente 42 tanques para almacenar el volumen de hidrogeno que abastecería el requerimiento de energía.

#### Selección de grupo electrógeno

En los sistemas de propulsión hibrida en serie el motor principal es alimentado por un generador eléctrico a combustión. Convencionalmente para la selección del grupo electrógeno se utilizan los valores de energía eléctrica entregados en la fuente de alimentación, para lo cual se debe hacer un análisis eléctrico más detallado para dimensionar los circuitos y estimar las perdidas por cada uno de los equipos de control.

En este análisis de viabilidad se realizó un dimensionamiento preliminar de los sistemas, por lo que fue asumido que la potencia de generación eléctrica del grupo electrógeno es aproximadamente 10% mayor que la requerida por el motor principal, por lo que fue seleccionado el grupo electrógeno Volvo Marine Genset D16-MG, ver Figura 4.18; las características se resumen en la Tabla 4.12.



**Figura 4.18 Grupo electrógeno seleccionado (VOLVO PENTA, 2020).**

**Tabla 4.12 Características grupo electrógeno.**

Grupo electrógeno	Volvo marine genset
Modelo	HCM534F-1
RPM	1800
Potencia	635 kVA
Potencia	508 kWe
Dimensiones	3165 x 1177 x 1842 mm
Peso	3926 kg

#### Resumen de sistemas de propulsión eléctricos

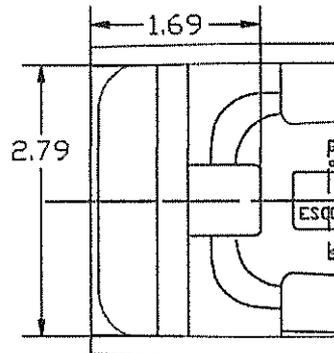
El requerimiento de componentes de cada una de las opciones de sistemas de propulsión eléctrica e híbrida en serie, dimensionados para las condiciones descritas en el requerimiento de diseño, se resumen en detalle en la Tabla 4.13.

**Tabla 4.13 Resumen de componentes de los sistemas eléctricos.**

	Motor Principal	Baterías	Paneles Solares	H2 Fuel Cell	Tanques	Generadores
Opción 2	1	41				
Opción 3	1	41	893			
Opción 4	1			12	42	
Opción 5	1					1

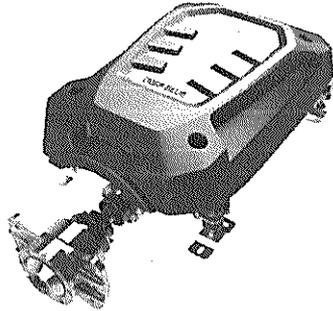
En la Tabla 4.13 se observó que la fuente de suministro de cada opción estaría compuesta por muchos componentes debido a la demanda energética, haciendo que los sistemas sean voluminosos y por simple inspección se podría concluir que no existe el espacio disponible dentro de la embarcación, ver Figura 4.19.

VISTA CUBIERTA PRINCIPAL



**Figura 4.19 Espacio disponible para sistema de propulsión.**

Sin embargo, se identificó como una alternativa para el motor principal el equipo Torqueado 100i 2400, la relación de tamaño-potencia y las facilidades que presta la presencia de un representante de la marca en el Ecuador permite que este equipo sea ideal para las opciones de sistema de propulsión eléctrica. La Tabla 4.14 resume sus características.



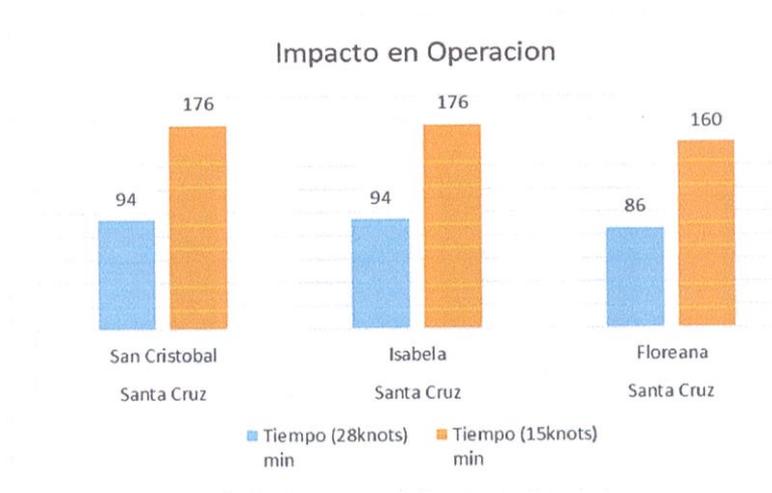
**Figura 4.20 Motor sugerido como alternativa (TORQUEEDO, 2020).**

**Tabla 4.14 Motor eléctrico sugerido.**

Motor	Torqueedo DB 100i-2400
RPM	2700
Potencia	100 kW
Torque	437 Nm
Voltaje	360 V
Eficiencia	91%
Peso	195 kg

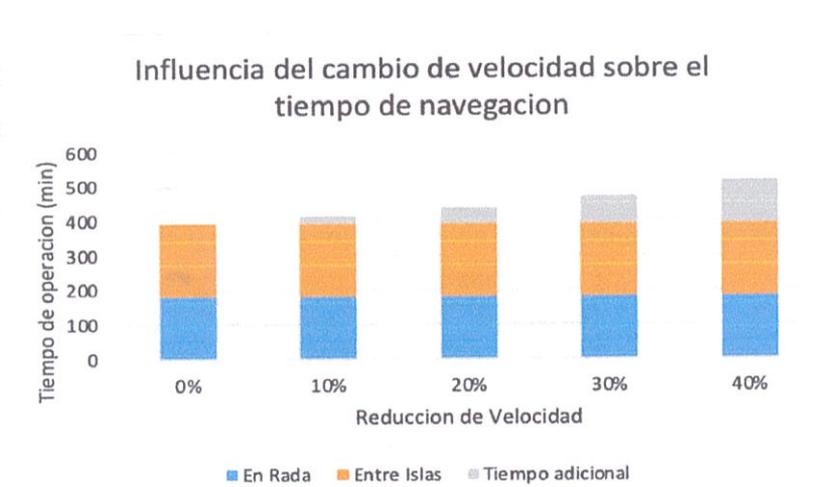
En el caso de utilizar motores Toqueedo en los sistemas híbridos en serie, la misma marca también dispone de un grupo electrógeno diésel, el cual es sugerido debido a que la marca posee un software de control automático de que también puede ser implementado dentro del sistema.

Pero surge el inconveniente de que aun con dos motores la potencia es menor que la requerida, lo cual limita al sistema en una velocidad máxima de 15 nudos, diferente a los 28 nudos del requerimiento de diseño. La Figura 4.21 presenta el posible impacto en tiempos para condiciones óptimas de navegación entre los puertos descritos en la Tabla 2.1 debido a la reducción de velocidad de 28 nudos a 15 nudos.

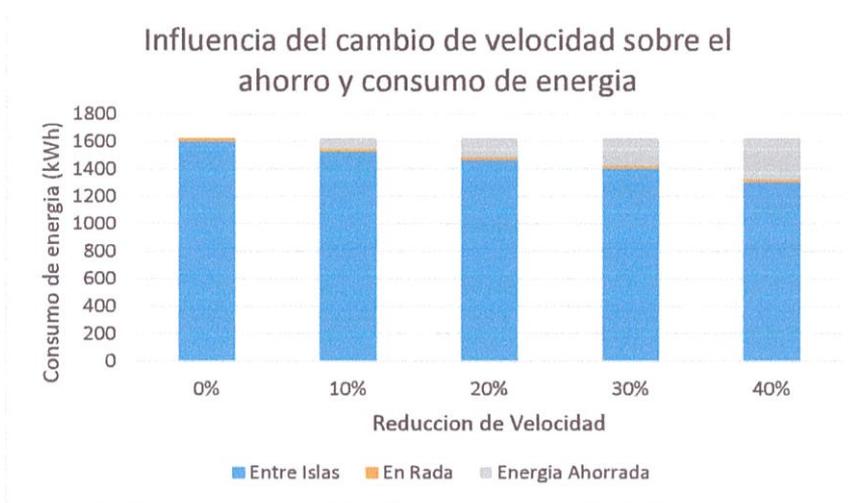


**Figura 4.21 Impacto de reducción de velocidad.**

La reducción de velocidad aumentaría el tiempo de navegación como se aprecia en la Figura 4.20 para condiciones óptimas y en la Figura 4.21 para condiciones normales. Sin embargo, la reducción de velocidad permite reducir la demanda de energía abriendo la posibilidad de ahorrar combustible y evitar emisiones, ver Figura 4.22. Al reducir porcentualmente la velocidad se tiene una mejor apreciación de la pendiente de reducción del consumo de energía, la reducción del 0% implica que la velocidad es la del requerimiento de diseño (28 nudos).



**Figura 4.22 Impacto de la reduccion de velocidad sobre el tiempo de navegacion.**



**Figura 4.23 Ahorro de energía debido a la reduccion de velocidad.**

#### Costos aproximados

Los sistemas descritos en la Tabla 4.13 no cumplen con los requerimientos de diseño, quedando fuera de parámetros aceptables debido a la cantidad de componentes y el espacio requerido. Sin embargo, debido a que durante la selección de equipos fue compilada información respecto de los equipos seleccionados, como por ejemplo los costos unitarios aproximados por cada componente, que fueron determinados investigando en páginas de mercadeo de productos marinos.

La Tabla 4.15 resume los costos aproximados de estos sistemas como una simple referencia del presupuesto requerido.

**Tabla 4.15 Costos aproximados de los sistemas eléctricos.**

	Costo por sistema
Opción 2	\$ 720.000,00
Opción 3	\$ 880.740,00
Opción 4	\$ 187.000,00
Opción 5	\$ 94.000,00

## APÉNDICE C

### Datos de contactados

**Tabla 4.16 Proveedores locales e internacionales contactados**

Proveedor	País Ciudad	Distribuidor Autorizado	Contacto	Teléfono Correo electrónico
Suzuki	Guayaquil	Comandato	Juan Pincay	099 175 0207
Yamaha	Guayaquil	Juan Eljuri	No dan información sobre motores fuera de borda	
OXE	Guayaquil	Motores del Pacifico	Carlo Pérez	carlo.perezalberti@oxemarine.com
Torqueedo	Cuenca	Comercial Salvador Pacheco Mora S.A.	Bolívar Muñoz	07 284 2388
Volvo Penta	Guayaquil	Ecuair S.A.	Max Borja	max.borja@ecuair.com
	Bélgica	Volvo Penta	Atención al cliente	+32 9 255 69 47
	España	Volvo Penta	Atención al cliente	vpe@volvo.com
	Reino Unido	Volvo Penta	Jennifer Humphrey	jennifer.humphrey@volvo.com
	Suecia	Volvo Suecia	Viero Jacob	jacob.viero@volvo.com
krautler	Guayaquil	Krautler Ecuador	Rafael Espinosa	098 887 5109
TEMA	USA	Argo Resources Ltd.	Jose Arias	jarias@argoresources.com
CUMMINS	Guayaquil	INDUSUR S.A.	Milton Palacios	099 931 4607
Bellmarine	Brasil	Electric Marine	Agente de Ventas	+551 1982414925

**Tabla 4.17 Armadores de lanchas interislas contactados**

Armador	Lancha	Contacto
Margoth Pilatuña	Navegador	05 252 1367
Juana Cantos	Gema	098 598 2743
Diego Cuichan	Neptuno I Neptuno II	093 935 0742
Cristian Gonzales	Wolf	096 888 5041