

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**



**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UN  
VELERO ELÉCTRICO DE CARGA CON CAPACIDAD  
REGENERATIVA, EN INVERSIONES MARÍTIMAS CEIBA S.A.**

**Informe de práctica de especialidad para optar por el título de  
Ingeniería en Mantenimiento Industrial, con el grado académico  
de Licenciatura**

**Cristhian Jose Vega Matamoros**

Cartago, 2020



## Información del estudiante, del proyecto y de la empresa

---

### Información del estudiante

Nombre	Cristhian Jose Vega Matamoros
Cédula	115340295
Carné ITCR	201200353
Dirección de residencia	Barrio Los Vega, 200 metros norte y 50 oeste de la escuela Los Vega, Cajón, Pérez Zeledón, San José, Costa Rica.
Teléfono celular	(506) 85743354
Correo electrónico	jocvm31@gmail.com

### Información del proyecto

Nombre del proyecto	“Estudio de factibilidad en la implementación de un velero eléctrico de carga con capacidad regenerativa, en Inversiones Marítimas Ceiba S.A.”
Profesor asesor	Ing. Sebastián Mata Ortega
Horario de trabajo del estudiante	De lunes a viernes, de 6:30 a. m. a 4:30 p. m.

### Información de la empresa

Nombre	Inversiones Marítimas CEIBA S.A.
Dirección	200 metros oeste del Supermercado La Familia, Punta Morales, Puntarenas, Costa Rica.
Teléfono	(506) 26619222
Actividad principal	Construcción de embarcación

## **Dedicatoria**

---

A mis padres, Leonel y Cecilia, quienes siempre se han preocupado por inculcar valores, y me han impulsado a seguir adelante; son mi motor e inspiración.

A mis hermanos, Sara, Ana, Leonor y Danny; por su gran apoyo en todo momento.

## **Agradecimientos**

---

A mis padres y hermanos, que siempre han estado pendientes de mi proceso de aprendizaje.

A mis profesores, que se han preocupado por fortalecer mi formación académica con su conocimiento.

A todas las demás personas que de una u otra forma han hecho aportes en mi carrera profesional.

## Resumen

---

La falta de alternativas energéticas en el transporte marítimo ha ocasionado que los combustibles pesados de petróleo sean los reyes de los mares en estos momentos. Los grandes cargueros se basan en la hipótesis de que a mayor capacidad de carga menor será el factor de emisión por unidad transportada; aunque, en magnitud, un carguero que consume cientos de toneladas de combustible pesado y, por ende, emite a la atmósfera un par de cientos más de CO<sub>2</sub>, a simple vista, no pareciera estar aportando ningún beneficio al ambiente.

Mediante este trabajo se realizó el análisis de una alternativa de transporte marítimo más amigable con el ambiente, el uso de la tradicional vela y la incorporación de sistemas auxiliares eléctricos. El análisis incluyó tres ejes principales: desde el punto de vista financiero, se constató que potencialmente podría generar mayores dividendos que si se incorporara un sistema auxiliar de diésel; desde el punto de vista técnico, se obtuvieron resultados teóricos esperanzadores para un sistema capaz de regenerar la energía eléctrica que después consumiría el barco; y desde el punto de vista ambiental, se confirmó que a lo largo de la vida útil, las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la fabricación y operación de la embarcación son menores a las que se tendrían en la misma embarcación con un motor auxiliar de diésel. Además, se sentaron las bases para la implementación de un sistema que sea capaz de obtener datos a fin de probar, de manera concreta, las idealizaciones teóricas obtenidas.

### Palabras clave

Sistema regenerativo, motor auxiliar eléctrico, transporte marítimo bajo en emisiones, navegación a vela.

## **Abstract**

---

The lack of energy alternatives in shipping has caused heavy oil fuels to be the kings of the seas nowadays. Large vessels are based on the hypothesis that a higher load capacity will mean less emissions per unit transported, although in magnitude, a vessel that consumes hundreds of tons of heavy fuel and therefore emits a couple of hundreds more CO<sub>2</sub>, in a simple glance does not seem to be giving any benefit to the environment.

Through this work, the analysis of a more environmentally friendly alternative of maritime transport, the use of traditional sailing and the incorporation of auxiliary electrical systems was carried out. The analysis included three main axes, from a financial point of view, it was found that it could potentially generate higher dividends than that of an incorporated diesel auxiliary system. From the technical point of view, promising theoretical results were obtained for a system capable of regenerating the electrical energy that would later be consumed by the ship, and from the environmental point of view, it was obtained that throughout the lifetime of use, CO<sub>2</sub> emissions associated with manufacturing and operating of the boat are less than what would be had in the same boat with an auxiliary diesel engine. In addition, the foundations were laid for the implementation of a system that can obtain data that can concretely prove the theoretical idealizations that have been obtained.

### **Keywords**

Regenerative system, electric auxiliary motor, low emission maritime transport, sailing.

# Tabla de contenido

Información del estudiante, del proyecto y de la empresa .....	II
Dedicatoria .....	III
Agradecimientos.....	IV
Resumen.....	V
Abstract .....	VI
1 Capítulo I. Introducción .....	1
1.1    Introducción .....	1
1.2    Reseña de la empresa.....	2
1.3    Instalaciones.....	2
1.4    Misión .....	4
1.5    Visión .....	4
2    Capítulo II. Planteamiento del problema .....	5
2.1    Planteamiento del problema .....	5
2.2    Justificación del proyecto.....	6
2.3    Objetivos del proyecto.....	9
2.3.1    Objetivo general .....	9
2.3.2    Objetivos específicos.....	9
2.4    Metodología .....	10
2.5    Alcances .....	11
2.6    Limitaciones .....	12
3    Capítulo III. Marco teórico .....	13
3.1    Marco contextual .....	13
3.2    Marco conceptual.....	16
4    Capítulo IV. Análisis del modelo de barco propuesto .....	21
4.1    Situación actual .....	21
4.2    Modelo operacional de barcos similares .....	22
5    Capítulo V. Factibilidad financiera .....	23
5.1    Inversión inicial.....	24
5.1.1    Inversión inicial con motor eléctrico.....	24
5.1.2    Inversión inicial con motor diésel .....	24
5.2    Costos de operación .....	28
5.2.1    Costos de operación con propulsión eléctrica .....	29



5.2.2	Costos de operación con propulsión diésel.....	29
5.3	Costos de mantenimiento.....	34
5.3.1	Mantenimiento sistema de propulsión diésel.....	36
5.3.2	Mantenimiento sistema de propulsión eléctrico.....	40
5.4	Costos de viaje.....	43
5.5	Resumen de inversión y costos .....	44
5.6	Indicadores financieros del proyecto .....	45
6	Capítulo VI. Factibilidad técnica.....	49
6.1	Generalidades .....	49
6.2	Cálculo teórico.....	54
6.3	Análisis CFD mediante el programa SolidWorks .....	55
6.4	Energía solar.....	60
6.5	Usabilidad de la energía.....	61
7	Capítulo VII. Factibilidad ambiental .....	62
7.1	Fase preparatoria .....	65
7.2	Fase operativa .....	67
7.2.1	Operación del barco con sistema auxiliar eléctrico .....	68
7.2.2	Operación de barco con sistema auxiliar diésel .....	70
7.3	Fase de clausura .....	71
7.4	Disposición .....	74
8	Capítulo VIII. Captura de datos futuros.....	77
8.1	Generalidades .....	77
8.2	Equipos necesarios.....	77
8.3	Funcionamiento.....	81
8.4	Inversión en equipos para captura de datos.....	82
9	Capítulo IX. Conclusiones.....	83
10	Capítulo X. Recomendaciones.....	84
11	Bibliografía.....	85
12	Anexos .....	90
12.1	Anexo primero. Simbología utilizada.....	90
12.2	Anexo segundo. Código del programa Arduino. ....	91
12.3	Anexo tercero. Precios de equipos.....	93
12.4	Anexo cuarto. Mantenimiento motor diésel.....	95

12.5 Anexo quinto. Mantenimiento motor eléctrico.....	97
---	----

## Índice de tablas

Tabla 1. Metodología.....	10
Tabla 2. Inversión inicial del proyecto.....	24
Tabla 3. Costo de equipos para propulsión diésel.....	27
Tabla 4. Inversión inicial de un velero con combustible fósil.....	28
Tabla 5. Gastos de un velero eléctrico.....	29
Tabla 6. Clasificación por tipo de barco.....	30
Tabla 7. Fórmula de consumo según tipo de barco y arqueo bruto.....	30
Tabla 8. Consumo de un velero con combustible fósil.....	31
Tabla 9. Estimación de consumo anual de combustible para un velero con motor auxiliar diésel..	31
Tabla 10. Estimación de costos anuales de combustible para un velero de carga con motor auxiliar diésel.....	33
Tabla 11. Costos por operación.....	33
Tabla 12. Labores de mantenimiento con motor auxiliar diésel.....	37
Tabla 13. Costo de repuestos.....	39
Tabla 14. Costos por mantenimiento.....	39
Tabla 15. Labores de mantenimiento con sistema auxiliar eléctrico.....	41
Tabla 16. Costo por mantenimiento con sistema auxiliar eléctrico.....	43
Tabla 17. Resumen de inversión y costos por año.....	44
Tabla 18. Flujos de efectivo para la inversión con sistema de propulsión auxiliar eléctrico.....	46
Tabla 19. Indicadores financieros para el proyecto con motor auxiliar eléctrico.....	46
Tabla 20. Flujos de efectivo para la inversión con sistema de propulsión auxiliar diésel.....	47
Tabla 21. Indicadores financieros para el proyecto con motor auxiliar diésel.....	47
Tabla 22. Estimación de torque y potencia.....	54
Tabla 23. Potencia teórica que se puede convertir a eléctrica con una hélice de 1.8 metros de diámetro.....	55
Tabla 24. Primer ingreso de datos al programa.....	56
Tabla 25. Determinación de velocidad angular.....	57
Tabla 26. Parámetros obtenidos para diferentes velocidades de avance.....	59
Tabla 27. Estimación de emisiones de CO <sub>2</sub> en fase operativa.....	71
Tabla 28. Costos de sistema de adquisición de datos.....	82
Tabla 29. Simbología.....	90

# Índice de figuras

Figura 1. Vista aérea de instalaciones.....	3
Figura 2. Diseño embarcación CEIBA.....	4
Figura 3. Planteamiento del problema.....	6
Figura 4. Esquema de hélice de paso variable.....	19
Figura 5. Diseño CEIBA.....	21
Figura 6. Embarcación Ópal.....	22
Figura 7. Costos de una batería de 840 kWh según vida útil.....	42
Figura 8. Comparación de inversión inicial.....	44
Figura 9. Comparación de gastos por operación y mantenimiento.....	45
Figura 10. Eficiencia en función de la relación paso-diámetro de hélice.....	52
Figura 11. Eficiencia en función del deslizamiento de la hélice.....	53
Figura 12. Vista frontal de hélice diseñada.....	56
Figura 13. Vista del resultado de una simulación CFD.....	58
Figura 14. Potencia que se puede regenerar respecto de la velocidad de avance.....	60
Figura 15. Potencia consumida respecto a la velocidad de avance.....	61
Figura 16. Ciclo de vida de un equipo.....	62
Figura 17. Impacto en cada fase del ciclo de vida útil de un vehículo.....	63
Figura 18. Impacto en cada fase del ciclo de vida útil de un vehículo.....	64
Figura 19. Relación de variación de impacto en ciclo de vida de un vehículo.....	65
Figura 20. Impacto en la producción de diferentes tipos de vehículo eléctrico.....	67
Figura 21. Cadena de impacto de los vehículos.....	68
Figura 22. Emisiones de CO2 en fase operativa.....	71
Figura 23. Degradación de una batería con el paso de los años.....	72
Figura 24. Impacto de diferentes tipos de vehículos.....	73
Figura 25. Comparación de peso por emisiones de CO2.....	74
Figura 26. Placa Arduino UNO.....	78
Figura 27. Módulo GPS.....	78
Figura 28. Sensor de corriente.....	79
Figura 29. Sensor de voltaje.....	79
Figura 30. Fuente de voltaje de 5 V DC.....	80
Figura 31. Módulo memoria SD.....	80
Figura 32. Caja hermética.....	81
Figura 33. Motor CAT C18.....	96

# 1 Capítulo I. Introducción

---

## 1.1 Introducción

Costa Rica, como nación modelo dentro de las discusiones sobre cambio climático, y que ha basado su discurso en alcanzar la carbono neutralidad en los próximos años, tiene por delante grandes retos; dado que cerca del 92% de su extensión está constituida por mares, y es precisamente en las aguas en donde se lleva a cabo una de las actividades más contaminantes: el mercado de los envíos.

El estudio sobre nuevas alternativas de envíos con baja emisión de gases de efecto invernadero puede ser la línea de partida de un movimiento que busca alinearse con los planes de descarbonización de una manera integral, y de este modo promover el uso de energías limpias para mover las mercancías del futuro.

Una nueva alternativa de transporte no solo debe probar ser baja en emisiones, también debe probar ser rentable dentro de sus posibilidades y nicho de mercado. Debido a ello, en la presente investigación se incluyó, además del análisis ambiental y técnico para la embarcación de velas y motores eléctricos, el análisis desde el punto de vista económico, con el propósito de observar la rentabilidad que podría tener la embarcación a futuro.

Dentro de los ejes de análisis se obtuvieron resultados esperanzadores para la alternativa baja en emisiones presentada, incluso más que los obtenidos por medio de una comparación con el montaje de un sistema auxiliar con motores diésel. Por esta razón, la meta ahora es tratar de demostrar que una vez que el barco está en el agua, efectivamente la teoría concuerda con la realidad.

## 1.2 Reseña de la empresa

SAILCARGO INC. es una empresa emergente en el sector de transporte de carga sostenible, enfocada en desarrollar un modelo de negocio no solo ambiental, sino también innovador y asertivo.

La empresa escoge Costa Rica como puerto de origen por las siguientes razones: su objetivo de neutralidad en carbono, por ser una nación para los negocios, y por su ubicación estratégica; de este modo, se funda la empresa Inversiones Marítimas CEIBA S.A.

SAILCARGO INC. tiene como objetivo “dejar una marca positiva en el mundo del transporte al ser una opción efectiva y sostenible” (SAILCARGO, 2019). Asimismo, “demostrar que una empresa de transporte neutral de carbono no solo puede ser financieramente competitiva, sino que puede inspirar el cambio y la educación” (SAILCARGO, 2019).

La empresa está creando su primer proyecto de embarcación, llamado Ceiba, en un astillero ecológico ubicado en Punta Morales, en la costa pacífica costarricense. La expectativa es ofrecer algo único tanto para exportadores como para importadores, dando, de esta manera, la oportunidad de cerrar el ciclo en los productos orgánicos y sostenibles (SAILCARGO, 2019).

## 1.3 Instalaciones

Localizado estratégicamente a solo quince minutos de la ruta Interamericana, en Punta Morales, se encuentra el Astillero Verde, casa del Proyecto CEIBA, comprendido por un terreno de 1,4 hectáreas, en donde, de manera rústica, se puede encontrar todo lo necesario para desarrollar labores de forma artesanal, además, se encuentran sus oficinas, un taller de metales y talleres con un sin número de equipos para trabajar las densas maderas, desde el tronco en bruto hasta las más elaboradas y precisas piezas a fin de lograr que toda la estructura encaje a la perfección. También, alberga un hangar de construcción naval de 45 metros de largo, y el piso de *lofting* tradicional más grande del mundo.



Figura 1. Vista aérea de instalaciones.

Fuente: SAILCARGO, 2019.



Figura 2. Diseño embarcación CEIBA.

Fuente: SAILCARGO, 2019.

#### 1.4 Misión

“Facilitar el desarrollo de una red internacional de sistemas de transportes neutros en carbono, enfocados principalmente en la industria del transporte marítimo” (SAILCARGO, 2019).

#### 1.5 Visión

“Un futuro donde las demandas de una cadena de suministro global están dictadas por un consumismo consciente y responsable, a través de una red de servicios de entrega carbono neutral” (SAILCARGO, 2019).

## 2 Capítulo II. Planteamiento del problema

---

### 2.1 Planteamiento del problema

SAILCARGO INC. fue registrada como empresa a inicios del año 2016 bajo la consigna de transporte de carga libre de emisiones contaminantes. Con un concepto inicial basado en propulsión a vela para CEIBA –su barco insignia–, lo siguiente era definir el sistema auxiliar. De manera general, para este tipo de diseños lo más simple es pensar en propulsión asistida con motores diésel, como ocurre en otros países alrededor del mundo; sin embargo, ese modelo atenta contra la esencia misma de la empresa, por los altos índices de emisiones que presentan este tipo de motores. Se define la propulsión eléctrica como medio para asistir la navegación; y como principal fuente de producción de energía eléctrica se desean utilizar energía solar y las mismas propelas junto con los motores, como conjunto generador cuando hay suficiente viento para navegar a velocidades superiores a 3 m/s.

A mediados del año 2020, y con la estructura del costillar del casco casi concluida, aún se desconoce cuáles son los beneficios y los perjuicios de la propulsión eléctrica para el barco de carga; tampoco se tiene claro si económicamente resulta más atractivo; y, ambientalmente, se desconoce sobre parámetros que cuantifiquen el beneficio al prescindir del combustible fósil. El cambio de tecnología a propulsión eléctrica es un tema que ha generado incertidumbre a través de los años en industrias como la del automóvil; y al pensar en un barco que debe navegar miles de kilómetros, el temor aumenta y genera pensamientos escépticos en los inversionistas que se acercan al proyecto.

A partir de lo anterior, se propone realizar una comparativa a lo largo del ciclo de vida útil del sistema de propulsión, analizando los pros y los contras de utilizar un sistema de propulsión diésel y uno eléctrico, con el objetivo de identificar cuál resulta más factible.



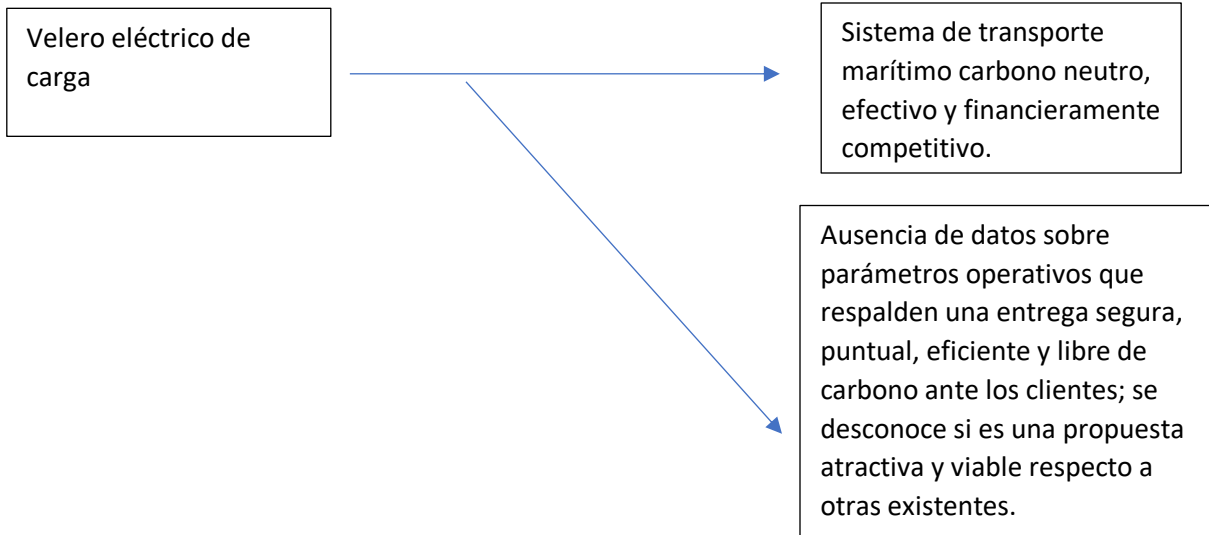


Figura 3. Planteamiento del problema.

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Word.

## 2.2 Justificación del proyecto

Aunque los motores de combustión interna modernos presentan bajas emisiones de compuestos químicos nocivos para la atmósfera, no se eliminarán del todo ni emisiones ni ruidos. En navegación, los gases de escape, el ruido y las vibraciones asociadas tienen un impacto adverso no solo en el ambiente, sino en la tripulación misma, especialmente en viajes largos; en consecuencia, el tipo de unidad utilizada tiene un impacto directo en la salud de los usuarios (Lapko, 2016).

El transporte marítimo es una necesidad absoluta, y todos los servicios actuales están basados en combustibles fósiles que se convierten cada vez más en inasequibles e insostenibles. Los problemas de transporte en la región del Pacífico afectan a economías pequeñas y vulnerables, dispersas entre algunas de las rutas más largas del mundo y más difíciles de mantener por milla marina; los combustibles fósiles representan una porción significativa de los costos operativos de envío. Las alternativas al transporte marítimo que utiliza combustibles fósiles han sido totalmente ignoradas en los debates regionales, e invisibilizadas en el espacio de la política y de donaciones en todos los niveles, a pesar de los esfuerzos por hacer la

transición al uso de nuevas fuentes para un transporte marítimo sostenible (Newell, Nuttall, Prasad y Veitayaki, 2017).

Pero, ¿cuál sería el interés de explorar un mercado eléctrico para la navegación?, ¿será acaso que solo responde a una nueva moda de electrificar todo?, o, ¿realmente es una necesidad que se está postergando?

El Protocolo de Kyoto, en el Artículo 2, Inciso 1, menciona que cada una de las partes acuerda cumplir los compromisos de limitación y reducción; fomento a la eficiencia energética en sectores pertinentes a la economía nacional; constante investigación, promoción, desarrollo y aumento del uso de formas nuevas y renovables de energía; así como la reducción progresiva o eliminación gradual en todos los sectores emisores de gases de efecto invernadero. En el Inciso 2, se señala que las partes procurarán limitar o reducir las emisiones de gases de efecto invernadero no controladas, según lo establecido en el protocolo de Montreal, generadas por los combustibles de transporte aéreo y marítimo internacional (ONU, 1998). Sin embargo, aunque de los países que firmaron este protocolo solo nueve no alcanzaron las reducciones propuestas, lo cierto es que a veinte años del acuerdo hay muy poco que celebrar, pues las emisiones de gases de efecto invernadero acumuladas han aumentado en más de 50%; en este sentido, podría decirse que no se ha solucionado nada, aunque en la teoría se cumplió el acuerdo (Duarte, 2018).

Los envíos marítimos son una fuente creciente de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI); se estima que en el 2009 estos envíos representaron el 3,3% del total de emisiones globales, y se proyecta que aumenten en un 150-250% para el 2050; las emisiones de óxido nitroso (NOx) y óxido de azufre (SOx) son desproporcionadamente altas, resultando entre 10% a 15% y de 4% a 9%, respectivamente, en emisiones globales. La regulación internacional de este sector se ha quedado atrás respecto de otros sectores importantes; el control de las emisiones de los barcos fue dejado por fuera de acuerdos internacionales, como el Kyoto y otros similares (Newell, Nuttall, Prasad y Veitayaki, 2017).

Un solo buque produce tanto azufre como cincuenta millones de automóviles. Según estimaciones del Banco Mundial, el tráfico marítimo emite más CO<sub>2</sub> que los automóviles en la UE, pues alrededor del 13% de las emisiones del sector transporte en esa región corresponde a transporte marítimo, mientras que los automóviles representan alrededor del 12% (Euronews, 2019). Ante esto, la Organización Marítima Internacional ha ejecutado una serie de acciones a fin de reducir las emisiones del transporte marítimo, entre estas acciones se han establecido requisitos de carácter obligatorio para los fabricantes de buques, ya que estos deben probar ser más eficientes energéticamente; para ello, se estableció el índice de eficiencia energética de proyecto (EEDI), en el cual se dicta que para los diferentes tipos de buques el factor de reducción EEDI debe estar entre 30% para los buques de menor capacidad, y 50% para los de mayor capacidad (OMI, 2019). Sin embargo, en una industria que se proyecta en constante crecimiento, podría suceder lo mismo señalado por Duarte; y al final se cumpla el acuerdo, pero los logros sean pocos.

El Acuerdo de París ha marcado un paso importante del cual Costa Rica es parte. En el reciente Plan Nacional de Descarbonización se remarca que el país sí se comprometió consistentemente con los objetivos de este acuerdo. El mismo presidente de la República (administración 2018-2022) mencionó que en materia de descarbonización, el país debe ser un laboratorio de pruebas para el mundo (MINAE, 2019). En dicho plan, se pueden observar algunas de las metas fijadas, entre las que se encuentran: el transporte eléctrico de pasajeros, la búsqueda de la renovación de la flota de carga, o el uso de combustibles alternativos; mas no se menciona nada sobre el transporte de carga marítimo. Costa Rica no solo se compone de la Gran Área Metropolitana, tampoco de solo su territorio, el 92% del país es mar (UCR, 2019).

Pero ¿será acaso que los altos niveles de contaminación suceden solo en barcos de gran escala por su magnitud?, o ¿sucede también en pequeños botes?

Según Torquedo –un fabricante de motores eléctricos fueraborda–: “un fueraborda de cuatro tiempos de 5 CV funcionando a toda máquina genera durante una hora la

misma cantidad de emisiones de NOx e hidrocarburos que 38,5 automóviles nuevos que circulen a 95 km/h durante el mismo periodo de tiempo” (Torquedo, 2018).

El motivo de realizar este estudio en el proyecto CEIBA, el cual puede llegar a convertirse en el primer barco de carga libre del uso de combustibles fósiles en Latinoamérica, responde a la necesidad de brindar datos que se proyecten para ser una fuente de inspiración; y, de este modo, en el futuro no solo sea uno, sino muchos como este surcando los océanos de América Latina, que una vez más se ha quedado rezagada en un camino que las naciones europeas ya comenzaron a recorrer. Asimismo, desde la perspectiva del proyecto, se desea demostrar al mundo que el mercado de los envíos de larga distancia sí se puede descarbonizar.

## 2.3 Objetivos del proyecto

### 2.3.1 Objetivo general

Evaluar, por medio del análisis del ciclo de vida útil, la factibilidad en la implementación del sistema de propulsión eléctrico en el velero de carga CEIBA.

### 2.3.2 Objetivos específicos

Determinar, por medio de una comparativa con un barco de carga a base de combustible fósil, la factibilidad en el uso de un velero eléctrico de carga mediante el análisis del indicador VAN.

Obtener datos teóricos por medio de *software* de diseño sobre el comportamiento de una hélice de paso variable en generación de potencia para diferentes condiciones de operación en la embarcación en estudio.

Obtener parámetros de impacto ambiental en toneladas de CO<sub>2</sub> emitido al ambiente por medio del análisis del ciclo de vida útil del velero eléctrico de carga respecto de la vida útil de otra embarcación que opere con combustible fósil, así como la correcta disposición final.

Diseñar un sistema capaz de obtener y presentar datos sobre parámetros de funcionamiento del conjunto motor-hélice-batería en relación con la velocidad de avance.

## 2.4 Metodología

Tabla 1. Metodología.

Objetivo	Actividad	Resultado esperado
Determinar, por medio de una comparativa con un barco de carga a base de combustible fósil, la factibilidad en el uso de un velero eléctrico de carga mediante el análisis del indicador VAN.	Recopilación de datos teóricos de la empresa y de la literatura.	Obtener parámetros base para el análisis.
	Cálculo de inversión inicial, costos operativos y mantenimiento.	Observar y cuantificar el comportamiento de los parámetros.
	Análisis VAN.	Comparar las alternativas para determinar la que económicamente presenta mejores proyecciones.
Obtener datos teóricos por medio de <i>software</i> de diseño sobre el comportamiento de una hélice de paso variable en generación de potencia para diferentes condiciones de operación en la embarcación en estudio.	Recopilación de datos teóricos por medio de la literatura y de los parámetros propuestos por la empresa.	Obtener parámetros base para el análisis.
	Análisis teórico de la hélice regenerativa.	Obtener parámetros teóricos que muestren la posibilidad de regenerar energía con la hélice.
	Modelado en <i>software</i> de diseño y obtención de parámetros.	Comprobar la teoría por medio de <i>software</i> de análisis utilizando un modelo simplificado de hélice.
Obtener parámetros de impacto ambiental en toneladas de CO <sub>2</sub> emitido al ambiente por medio del análisis del ciclo de vida útil del velero eléctrico de carga respecto de la vida útil de otra embarcación que opere con combustible fósil, así como la correcta disposición final.	Revisión de literatura pertinente.	Obtener factores teóricos, índices de emisiones e indicadores por medio de literatura.
	Analizar la fase preparativa de las opciones propuestas.	Obtener parámetros de emisión de CO <sub>2</sub> en la fase de preparación de ambas alternativas.
	Revisión de literatura sobre consumos teóricos de combustible para obtener parámetros de CO <sub>2</sub> por medio de factores de emisión.	Obtener los estimados teóricos de consumo y las emisiones de CO <sub>2</sub> por medio de factores.
Diseñar un sistema capaz de obtener y presentar datos sobre parámetros de funcionamiento del conjunto motor-hélice-batería en relación con la velocidad de avance.	Analizar variables base por medir.	Determinar las necesidades del equipo por utilizar.
	Búsqueda de equipos por utilizar.	Determinar los equipos que se adecuen a las necesidades.
	Integrar parámetros en un sistema de bajo costo, aplicable y replicable.	Obtener un conjunto funcional.

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel.

En primera instancia, es necesario definir qué se desea comparar; pues el contrastar una embarcación de un tipo con otra de características diferentes no es un método que arroje datos interesantes, ya que aspectos como tamaño, uso, materiales de fabricación y demás aspectos comparables introducen ruido a la comparativa; para

evitar esto, se puede definir un escenario en donde para una misma embarcación se requiera determinar la alternativa más conveniente en el sistema de propulsión, pues como lo dice EEA (2018), las principales diferencias se dan en el tren de propulsión; en cuanto al cuerpo y demás sistemas no tienen por qué existir muchas diferencias en el uso de una tecnología u otra, por lo que no valdría la pena realizar una amplia comparación sobre equipos si no iguales, muy similares.

El comparar un velero eléctrico de carga de 45 m de eslora con un buque de carga no tiene sentido técnico, los buques de carga suelen ser de mucho mayor envergadura, los consumos energéticos son mucho mayores, las rutas y las velocidades de navegación no son las mismas, y todo esto, al final, puede provocar que se obtengan conclusiones alejadas de la realidad. Lo que sí suena más lógico hacer para el barco en estudio –CEIBA– es plantear dos casos; el primero, con los motores auxiliares de combustión interna, y el segundo, que es el planteado por la empresa SAILCARGO, usando motores auxiliares eléctricos con capacidad regenerativa. Proceder del modo anterior asegura que para un mismo puerto de destino, tanto las rutas como las velocidades de navegación sean iguales, asimismo, el transporte de productos; esto con el fin de eliminar aspectos externos diferenciadores y proporcionar una comparativa directa entre sistemas de propulsión.

## 2.5 Alcances

El proyecto de investigación busca determinar si en este momento es viable pensar en dar inicio a un desplazamiento del uso de combustibles fósiles como única fuente energética para mover el comercio marítimo, a fin de incursionar en nuevas formas de mover mercancías de manera amigable con el ambiente.

El estudio sobre la factibilidad de este tipo de movilidad por mar podría dar como resultado un punto base para incursionar en la descarbonización del comercio marítimo que tanto preocupa; también, impulsar nuevos proyectos país en aras de alcanzar la carbono neutralidad que se ha propuesto, así como para la búsqueda

de la eliminación del uso del combustible contaminante propuesta desde la Organización Marítima Internacional.

## 2.6 Limitaciones

La embarcación en estudio se encuentra en etapa de construcción, por lo que todos los parámetros requeridos para elaborar este proyecto deben partir de bases teóricas y estudios realizados en embarcaciones similares.

Muchos de los equipos que serán parte del barco y que son necesarios para realizar proyecciones aún no se han seleccionado, por lo cual, de nuevo, es necesario partir de la teoría y de lo que ofrecen algunos fabricantes.

La cantidad de embarcaciones eléctricas en el mundo es muy reducida, y la información técnica que se tiene de ellas es muy poca, por lo que se poseen recursos teóricos limitados para comparar resultados.

## 3 Capítulo III. Marco teórico

---

### 3.1 Marco contextual

Hay muchos motores eléctricos instalados en embarcaciones; dependiendo de las necesidades, pueden actuar como principal (yates y lanchas de motor) o como auxiliar (yates de vela). Una ventaja importante de los motores eléctricos es que el sistema de accionamiento puede ser instalado en cualquier parte del casco, lo cual permite su máxima utilización; toda la estructura puede ser cerrada en un recinto mudo, por lo que no es necesario una separación especial para el motor. La escogencia de la forma de instalación del motor dependerá del tipo de barco, del tamaño, de la forma del casco y las proporciones de este (largo, ancho), así como de las aguas en donde se utilizará la embarcación (Lapko, 2016).

En embarcaciones con motores de baja potencia, el motor eléctrico resulta una alternativa atractiva a los motores de combustión interna, aunque junto con las baterías crean un conjunto mucho más pesado. En embarcaciones que requieren una alta potencia, el motor eléctrico deja de ser atractivo, pues el peso de las baterías y los altos costos resultan desproporcionadamente mayores que los motores tradicionales. El motor eléctrico es atractivo en estos casos cuando se trabaja bajo argumentos ambientales, es decir, sin emisiones de gases contaminantes en la atmósfera y sin contaminación acústica (Lapko, 2016).

La integración de nuevas tecnologías, como es el caso de los sistemas de almacenamiento de energía (ESSs) y la propulsión eléctrica, gana terreno en los últimos años y se encamina a reducir las emisiones en la industria marítima (Al-Falahi, S, Jayasinghea y Enshaei, 2018).

Caso E-ferry: este proyecto fue cofundado por la Unión Europea y una decena de socios con una visión de neutralidad en emisiones de carbono, y consistió en el desarrollo del ferry Ellen, que hasta el 2019 es el ferry con la mayor batería en el mundo, posee 60 metros de eslora (longitud) y 13 metros de manga (ancho), una velocidad máxima de 15,5 nudos (28 km/h), 56 toneladas de baterías y cuatro motores eléctricos. Ellen es un ferry totalmente eléctrico, cubre una distancia de 22



millas náuticas, que son siete veces más que la capacidad de cualquier barco existente de este tipo (Euronews, 2019).

En solo un año Ellen contribuirá a reducir las emisiones de 2 000 toneladas de CO<sub>2</sub>, 42 toneladas de NO<sub>x</sub>, 2,5 toneladas de partículas en suspensión y 1,4 toneladas de SO<sub>2</sub>. Este fue solo el inicio, pues la compañía ya tiene veinticinco pedidos de barcos eléctricos, incluso algunos más grandes que Ellen. “Concentrarse en el sector marítimo es la vía más rápida para hacer frente a las emisiones de CO<sub>2</sub> en Europa. El proyecto E-ferry proporcionará datos de operación cruciales, datos de seguridad, ayudará a establecer estándares, no sólo para Europa sino para el mundo” (Euronews, 2019).

Caso X Shore: es una *start-up* sueca con el pensamiento de que el mundo de las cero emisiones no solo es patrimonio del automóvil, pues los barcos también comienzan a incorporar mecánicas eléctricas, aunque aún tienen pendiente por mejorar potencia, velocidad máxima y autonomía. En comparación con los barcos de combustión tradicional, los eléctricos ofrecen varias ventajas, entre las que destacan: un sistema de propulsión silencioso, sin olores de combustible, el mantenimiento es mínimo y el coste por kilómetro es bastante menor. La compañía afirma que el coste de navegar un barco electrificado es diez veces menor en relación con uno de propulsión térmica, dado que para recorrer 100 millas marinas uno convencional gasta 60 litros de combustible (unos 120 euros), mientras que para recargar un modelo Eelex –que posee un rango de autonomía de 100 millas– el coste es de 12 euros; además, están equipados con baterías capaces de soportar una vida útil de hasta 5 000 cargas (Motorpasion, s.f).

Para obtener un diagnóstico más preciso sobre el impacto ambiental en la industria de los envíos, al igual que en otras industrias, el análisis de vida útil adquiere un papel importante. Trabajos literarios anteriores señalan que la comparación entre dos casos de estudio es un método utilizado para obtener un punto de referencia al momento de determinar el sistema de propulsión óptimo, tanto desde el aspecto económico como del ambiental. Dentro del análisis de ciclo de vida, el mantenimiento que se dé a la embarcación es fundamental, puesto que además de

la corrosión en el casco, un mal mantenimiento puede aumentar la resistencia por fricción, y, por ende, incrementar el consumo de combustible, por lo tanto, la suciedad en la propela puede ocasionar pérdidas considerables en la eficiencia. El ciclo de vida de una embarcación comprende cuatro fases: construcción, operación, mantenimiento y desguace; un adecuado mantenimiento puede reducir considerablemente los costos por envío (Wang, Oguz, Jeong y Zhou, 2018).

Respecto del uso o selección de la hélice para la aplicación, “Las instalaciones de hélices de paso variable tienen aplicación en buques de perfiles operativos muy distintos gracias a su versatilidad, puesto que permiten una combinación óptima del rendimiento del motor principal y del propulsor en condiciones de operación muy variadas” (García Posada, 2002).

El uso de hélices de paso variable brinda a la embarcación gran maniobrabilidad para realizar atraque y desatraque, además presentan la posibilidad de instalación de un generador de cola, permitiendo que el motor gire a una velocidad constante; rotando las palas de la hélice se puede obtener cualquier paso, desde todo avante hasta todo atrás, sin necesidad de invertir el sentido de giro del propulsor (García Posada, 2002).

El mercado de los envíos juega un rol importante en el consumo petrolero global, la última crisis de combustibles arrojó diseños interesantes en cuanto a energía eólica, uso de rotores y avances en el diseño de velas, captura solar y asistencia eléctrica de potencia y propulsión, así como del uso de biocombustibles (Bhardwaja, Bhattacharya, Tang y Howell, 2019).

En lo referente al comercio mundial, los envíos manejan más del 80% de la cuota por volumen; a medida que el comercio marítimo crece, la industria del transporte marítimo se encuentra a la vanguardia en varios cambios, incluidas las nuevas tecnologías. En los últimos veinte años, los barcos se han equipado con tecnologías avanzadas de posicionamiento global y mecanismos anticolidión; del lado ingenieril, los barcos son mucho más automatizados y ofrecen mayor control del motor desde la plataforma de navegación. En cuanto a operación de carga, hay más automatización para el monitoreo remoto, pues se han encontrado avances en las

comunicaciones entre el barco y la central administrativa en tierra, utilizando tecnología satelital (Bhardwaja, Bhattacharya, Tang y Howell, 2019).

La adopción de tecnología a bordo no solo sirve para mejorar la eficiencia y la productividad, sino también está destinada a la seguridad y prevención de la contaminación. Algún fallo humano o tecnológico puede causar serios daños a la propiedad, o daños ambientales, e incluso, pérdida de vidas, por lo que la seguridad depende estrechamente de las operaciones exitosas a bordo (Bhardwaja, Bhattacharya, Tang y Howell, 2019).

Investigaciones afirman que el uso inadecuado de tecnologías disponibles es un factor contribuyente a accidentes. En industrias como la aviación y la industria médica, el uso de la tecnología ha ayudado a prácticas más seguras; eliminando en gran medida errores humanos. A pesar de los potenciales beneficios, la introducción de tecnología rara vez se lleva a cabo sin que se presenten problemas, por tanto, se deben examinar los procesos de inserción (Bhardwaja, Bhattacharya, Tang y Howell, 2019).

Algunas de las condiciones mínimas de seguridad en embarcaciones son: Asistente Automático de Trazado Radar (ARPA), Sistema de Posicionamiento Global (GPS), Sistema Mundial de Socorro y Seguridad Marítima (SMSSM), Sistema de Identificación Automática (AIS), Sistema Electrónico de Gráficas y presentación en pantalla (ECDIS), Espacio de Maquinaria Desatendida (UMS) y Separador de Agua Oleosa (OWS) (Bhardwaja, Bhattacharya, Tang y Howell, 2019).

### 3.2 Marco conceptual

Navegación a vela: “es una actividad sencilla en sus formas, pero complicada en la concepción de sus funciones” (Gueorguiev Iordanov y Millet i Biosca, 2014).

A través de la historia, la navegación a vela se convirtió en una herramienta necesaria para conquistar mares y territorios; asimismo, desempeñó un papel importante al modificar la historia del mapa mundial. Se puede definir como una forma de navegación autónoma gracias al aprovechamiento de la energía del viento.

El origen de la vela se remonta al periodo entre el 3200 y el 2700 a.C. Las primeras embarcaciones presentaban una vela cuadrada hecha de corteza de papiro montada en un mástil central capaz de orientar la embarcación hasta unos 90 grados en la dirección del viento. La mayor revolución técnica de la navegación con vela fue la aparición de la vela triangular de origen árabe polinesio, la cual permitía, por primera vez, navegar en sentido contrario al viento. Desde ese momento, tomó fuerza sobre los remos, hasta que incursionó el barco de vapor, que permitía mayores velocidades. Hoy, los barcos a vela son viables para algunos tipos de pesca y usos recreativos, abandonando por completo su rol en el intercambio comercial entre naciones. Aun así, la navegación a vela ha experimentado un crecimiento tecnológico increíble, donde las embarcaciones pueden incluso llegar a doblar la velocidad del viento según sean los perfiles aerodinámicos e hidrodinámicos, que permiten mayor aprovechamiento de la energía del viento (Gueorguiev Iordanov y Millet i Biosca, 2014).

**Estabilidad en navegación:** La estabilidad del barco es un área de vital importancia desde el momento del diseño hasta la operación, se ve influenciada por muchos factores, desde ambientales, de carga, e incluso reacciones de emergencia. Muchos de los accidentes con buques pesqueros están relacionados con la estabilidad, la cual se refiere a la horizontalidad que pueda mantener el barco respecto del oleaje y del comportamiento de la carga (Manderbacka, 2019).

**Ciclo de vida de un producto:** Según el Centro de conocimiento de la industria marítima, la vida útil de un barco se compone de tres etapas bien marcadas: la etapa de encargo, que es cuando se diseña y construye el barco; la etapa de operación y; por último, la etapa de reciclaje (Centro de conocimiento de la industria marítima, 2013). El análisis del ciclo de vida útil de un producto es una de las metodologías más adecuadas para evaluar la calidad ambiental del producto (Aranda y Zabalza, 2010).

**Indicadores financieros:** De manera general, existen dos tipos de método para la evaluación del proyecto de inversión: aquellos que incorporan el valor del dinero en el tiempo, y los que no consideran el valor del dinero en el tiempo. En el primer caso

mencionado podemos encontrar métodos como valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR); y en el segundo de los casos, el método del periodo de recuperación o el método de la tasa de rendimiento contable. El hecho de contemplar el valor del dinero en el tiempo no se debe entender como que el dinero pierde valor, solo resulta más beneficioso tener el dinero en el presente que dentro de un año o tiempo determinado (Canales, 2015).

El método más ampliamente utilizado es el VAN: “consiste en determinar la equivalencia en el tiempo cero de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con el desembolso inicial” (Canales, 2015). En otras palabras, permite determinar si se acepta o descarta el proyecto.

Según Canales, la fórmula con la que se calcula el VAN sería:

$$VAN = I_o + \sum_{t=1}^n \frac{FC}{(1+i)^n}$$

$I_o$ : inversión inicial.

FC: Flujo de caja anual.

$i$ : tasa de corte o rendimiento.

$t$ : número de periodos de vida útil del proyecto.

El flujo de caja está compuesto por el cálculo entre ingresos, gastos, utilidad antes de depreciación, depreciación, utilidad antes de impuesto, impuesto y utilidad neta (Canales, 2015). Es decir, para el cálculo de este apartado se requerirá calcular la inversión inicial de los proyectos por comparar, los flujos de caja anuales (ingresos, gastos, depreciación e impuestos), la tasa de rendimiento esperada y el número de periodos por analizar. Además de esto, en el apartado de gastos se deben incluir los costos de operación, costos de mantenimiento y costes de viaje.

Tonelaje en las embarcaciones: Según la OMI, existen diferentes maneras de dimensionar una embarcación, entre las cuales, generalmente, se menciona la

capacidad de carga. Antes se utilizaban los términos toneladas brutas de registro (GRT), por sus siglas en inglés, y toneladas netas de registro (NRT). En 1982 se llegó al acuerdo de emplear los términos tonelaje bruto (GT), también llamado arqueado bruto, y tonelaje neto (NT). El GT es una función del volumen moldeado de todos los espacios cerrados del barco, mientras que el NT es una función igual de todos los espacios cerrados del barco, pero que son destinados para carga. Ambos son empleados para el cálculo de tarifas portuarias (IMO, s.f.).

Propulsores de paso variable: frecuentemente denominados de palas orientables, son similares a las hélices convencionales, pero en el núcleo poseen inserto un mecanismo mecánico que permite girar las palas, logrando así modificar el paso de la hélice con el motor en marcha, para optimizar, de esta forma, el rendimiento del propulsor. La selección de un tipo de hélice para aplicaciones particulares requiere considerar un gran número de factores, como rendimiento máximo, reducción de ruidos, facilidad de maniobra, costes de instalación, posibilidad de instalación de un generador de cola, entre otros. En la selección se debe considerar el perfil operacional del buque en cuestión (García Posada, 2002).

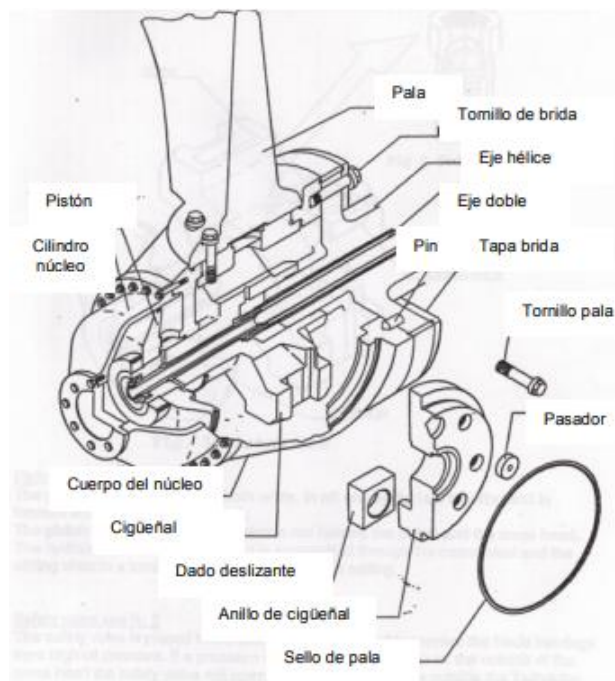


Figura 4. Esquema de hélice de paso variable.

## Diseños de turbinas

Turbina FTMC es una turbina de corrientes marinas, consiste en un amarre tipo TLP (Tensión Leg Platform) y un flotador robusto que se dispone como tobera; así, se logra que el concepto sea viable. El uso de las corrientes oceánicas como medio para generar energía es una tecnología relativamente joven en comparación con otros campos de energía alternativa. Estas turbinas aprovechan velocidades de corrientes entre 1 y 2 m/s. En la turbina FTMC se utiliza una tobera como sistema de flotabilidad para dar estabilidad, pero además de esto, porque obstruye el paso y acelera la corriente de agua que pasa por las palas, lo que también permite reducir el tamaño de estas, y las protege durante la operación. El prototipo demostrador ha sido probado en el CEHIPAR (INTA,) en el año 2018, con un buen comportamiento; y fue diseñado para un par de 600 Nm y 5 kW de potencia generada (profesionaleshoy.es, 2018).

*Software* para captura de datos; Los sistemas para la captura de datos varían según los presupuestos que se destinen para la aplicación; desde grandes y robustos controladores hasta microcontroladores capaces de resolver la necesidad. Arduino es una herramienta que, aunque poco robusta, es perfecta para la recogida, la comprobación, el pre-procesado y el transporte hacia una central de almacenamiento. La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir un fenómeno eléctrico o físico, un sistema DAQ consiste en sensores, *hardware* de medidas DAQ y un PC donde almacenar datos; un sistema DAQ básico sería un Arduino que recoge datos, los procesa y guarda en una tarjeta SD o un PC conectado (Wordpress.com, 2017).

## 4 Capítulo IV. Análisis del modelo de barco propuesto

### 4.1 Situación actual

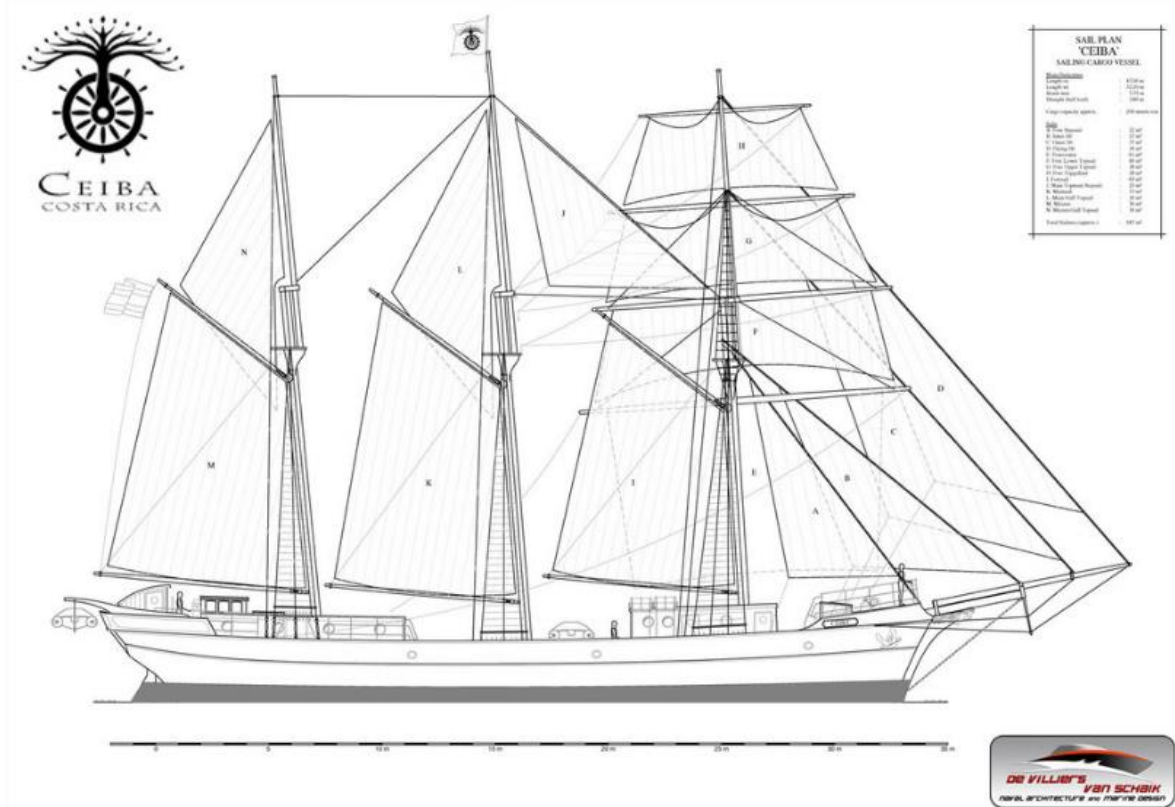


Figura 5. Diseño CEIBA.

Fuente: SAILCARGO, 2019.

Propulsión mecánica auxiliar por medio de dos motores 100% eléctricos de 150 kW de fuerza, alimentados con baterías de iones de litio, combinadas con baterías solares, paneles y turbinas eólicas para hacer que toda la energía auxiliar sea 100% renovable; y dos hélices de paso variable, que convertirán la energía cinética en eléctrica almacenada, para alimentar las funciones del barco. Con la alta capacidad de torque entregada por un motor eléctrico, CEIBA requerirá cerca de la mitad de potencia que la requerida con motores de otros diseños. El diseño del motor está a cargo de Sigma Plus Associates, con sede en Suiza (SAILCARGO, 2019).



Pensando en un envío eficiente y sostenible, los tres mástiles proporcionarán suficiente área de navegación para una propulsión incluso con vientos muy suaves, a la vez de proporcionar flexibilidad y maniobrabilidad para cambios de navegación en mal tiempo. El área de navegación más baja, hacia cubierta, ofrece una mayor estabilidad a la embarcación, lo cual aumenta su seguridad. En cuanto a practicidad en carga y descarga, los tres mástiles funcionan como grúa (SAILCARGO, 2019).

#### 4.2 Modelo operacional de barcos similares

Ópal es una embarcación de 24 m de eslora construida en 1951, perteneciente a la firma NORTH SAILING. Con un casco completamente de madera, en tiempos recientes fue equipado con un novedoso sistema llamado RPHP o Regenerative Plug-In Hybrid Propulsion system, bajo el proyecto RENSEA II. El barco es propulsado por un motor eléctrico de 150 kW que toma la energía de una batería cuya carga se realiza en tierra por medio de conexión a puerto. Cuando las reservas de energía de la batería se agotan, el velero está equipado con un motor diésel que acciona un generador eléctrico, el cual vuelve a proporcionar potencia eléctrica (NorthSailing, 2019). Lo interesante del sistema RPHP instalado en Ópal es que por medio de la hélice de paso variable de 1,8 m de diámetro puede regenerar energía cuando se mueve empujado por el viento.



Figura 6. Embarcación Ópal.

Fuente: NorthSailing, 2019.

## **5 Capítulo V. Factibilidad financiera**

---

“Todo proyecto productivo podrá evaluarse considerando su propia recuperabilidad y su rentabilidad” (Canales, 2015). “El procedimiento general sigue centrándose en la recopilación, creación y sistematización de información que permita identificar ideas de negocio y medir cuantitativamente los costos y beneficios de un eventual emprendimiento comercial” (Sapag, 2007).

Para este caso de análisis, se estarán comparando dos proyectos, idealizando vidas iguales por medio del indicador VAN. Según Canales (2015), este indicador muestra los beneficios generados por el proyecto a lo largo de su vida útil, pero para la evaluación de una embarcación con una vida útil mayor a los treinta años, no resulta conveniente realizar el análisis para todo ese periodo. Por simplicidad, se realizará el análisis a los periodos en los cuales se cuente con datos de proyecciones de flujos de caja por parte de la empresa, lo cual corresponde a seis años, por lo que para ambas alternativas de proyecto se determinarán los costos operativos y de mantenimiento para ese periodo.

## 5.1 Inversión inicial

### 5.1.1 Inversión inicial con motor eléctrico

Cálculo de inversión inicial. Según datos de la empresa SAILCARGO INC., el costo del sistema de propulsión incluye diseño, honorarios, materiales, motores eléctricos, propelas, cables e interfaz hombre máquina.

Tabla 2. Inversión inicial del proyecto.

<b>Herramientas</b>	\$	<b>59 500,00</b>
<b>Diseño del barco</b>	\$	30 000,00
<b>Inspección</b>	\$	10 000,00
<b>Seguro</b>	\$	80 000,00
<b>Materiales de construcción naval</b>	\$	715 500,00
<b>Paneles solares</b>	\$	25 000,00
<b>Sistema de propulsión Eléctrica</b>	\$	700 000,00
<b>Plomería</b>	\$	17 500,00
<b>Navegación</b>	\$	16 300,00
<b>Implementos de seguridad</b>	\$	67 250,00
<b>Sitio (Astillero)</b>	\$	197 100,00
<b>Personal de oficina</b>	\$	69 800,00
<b>Transporte</b>	\$	75 400,00
<b>Trabajo/salarios</b>	\$	1 092 600,00
<b>Alimentación y alojamiento</b>	\$	233 840,00
<b>Préstamo privado</b>	\$	50 000,00
<b>Subtotal</b>	\$	3 439 790,00
<b>Amortiguador financiero 20%</b>	\$	687 958,00
<b>Agregado</b>		
<b>Comisiones</b>	\$	173 643,25
<b>Total</b>	\$	4 301 391,25

Fuente: SAILCARGO, 2019.

### 5.1.2 Inversión inicial con motor diésel

Para estimar el valor de un sistema de propulsión diésel, lo primero que se debe hacer es estimar la potencia necesaria del motor diésel. De manera sencilla, se podría pensar que si basta con dos motores eléctricos que en conjunto proporcionan una potencia máxima de 300 kW, bastaría también con un motor diésel de 300 kW; sin embargo, esto no es del todo válido. Según Torquedo (2018), aunque es lo mismo un CV en un motor de combustión interna que en un motor eléctrico, será necesario un motor eléctrico de menor potencia para generar el mismo empuje que un motor de combustión interna. La explicación de esto se aprecia en las curvas de

par motor, en las cuales, un motor eléctrico es capaz de entregar un excelente par desde velocidades muy bajas y por un largo intervalo de velocidades; mientras que los motores de combustión interna solo son capaces de entregar un par aceptable en un reducido intervalo de velocidades de rotación, y que generalmente son altas velocidades.

Determinar la potencia necesaria del sistema de propulsión de un barco desde cero resulta laborioso; para obtener un resultado preciso se requeriría el análisis de otra investigación exclusiva sobre este aspecto. No obstante, en este caso, al existir el dato que basta con un motor eléctrico de 300 kW para navegar incluso a 8 nudos en condiciones difíciles de mar, es posible aprovechar ese dato para obtener un estimado del motor diésel capaz de cumplir con los requerimientos.

Sabiendo que la reductora de velocidad es de uso general en los barcos con motor diésel, se puede tomar como ejemplo una caja que reduzca cuatro veces la velocidad nominal, y observar algunos modelos de la casa Caterpillar (en algunos de los cuales se advierten velocidades de rotación mínimas de 1800 rpm), para concluir que luego de la reducción se tendría una velocidad de 450 rpm. Existen velocidades mayores de rotación, pero la búsqueda se basó en el criterio de que a menor velocidad de rotación menos vibraciones, y más es la eficiencia de una hélice de gran tamaño.

Del modelo de motor eléctrico se sabe que:

$$Nm = \frac{300 \text{ kW} \times 9550}{300 \text{ rpm}}$$

Por lo anterior, resulta necesario un par en el eje de 9 550 Nm para proporcionar el empuje deseado por la hélice. El 9 550 de la fórmula corresponde a un factor de conversión.

Si ahora se averigua una potencia con el valor de 450 rpm luego de la reducción para obtener el mismo par, se tendría que:

$$\frac{9550 \text{ Nm} \times 450 \text{ rpm}}{9550} = P$$

De este modo, se logra una potencia necesaria del motor de 450 kW, observada en los modelos ofrecidos por la misma Caterpillar, el C18 ACERT con una potencia al freno de 470 kW y velocidad nominal entre 1800 y 2100 rpm (Caterpillar, 2020). Se cumple con las expectativas deseadas, tomando también en consideración que se recomienda evitar el uso del motor en su límite máximo para evitar desgaste prematuro y exceso de vibraciones en el barco (Cómo elegir la potencia de motor para un velero, s.f.).

Si se retoma el caso de Ópal, que por sus características es ideal para realizar comparaciones, anteriormente tenía un motor diésel de 210 kW, y se montó uno eléctrico de 150 kW para obtener prestaciones similares, con lo cual se observa que el motor diésel era 1,4 veces más potente; en este caso, se tienen 300 kW en motores eléctricos y se obtuvo 450 kW para un motor diésel, se evidencia así que el motor diésel obtenido es 1,5 veces más potente. Con esto no se quiere decir que sea válido aplicar siempre un factor entre 1,4 y 1,5 para hacer la homologación, solo se comparó que el valor obtenido no esté fuera de contexto respecto de un barco con características similares a las que se desean desarrollar.

Como se mencionó anteriormente, si se planteara incluir un motor diésel como propulsión auxiliar, se debe introducir dentro del sistema una transmisión reductora que cumpla con las expectativas señaladas en el punto anterior para el cálculo del motor. El fabricante Twin Disc Marine Transmisión permite conocer, mediante una herramienta de cálculo (Twindisc), el modelo de transmisión que se ajusta al motor del barco. Con el modelo MG-516 DC se ofrece una reducción 4,04:1, soportando una potencia de transmisión de 521 kW a 2100 rpm. Utilizando el motor a 1800 rpm con una potencia de 470 kW (Caterpillar, 2020) por medio de la reductora, la velocidad que se tendrá en el eje es de 445,54 rpm, y el torque transmitido será de:

$$\frac{450 \times 9550}{445.54} \approx 9646Nm$$

Se observa que el torque obtenido para transmitir por el eje es un tanto mayor al necesario de 9550 Nm, pero es producto de utilizar una reducción de 4,07 y no una de 4.

Para dimensionar el tanque de combustible necesario, se debe tomar en cuenta el consumo estimado diario –que como se verá en apartados posteriores es de 0,707 toneladas– y multiplicarlo por el máximo de número de días que se pasarían en el océano. Según datos proporcionados por SAILCARGO (2019), la ruta más larga corresponde a Hawaii, con un total de cuarenta y dos días; es decir, se requeriría un total de 30 toneladas de combustible, lo cual se supliría con un depósito de 35 300 litros de capacidad, pero en el mercado no es posible conseguir un depósito con esa capacidad exacta, por lo que se requeriría un depósito de 40000 litros de diésel.

Según CYPE\_Ingenieros (s.f.), un tanque para diésel con estas dimensiones tiene un precio de €20 206, o cerca de \$22 000, y el costo por mantenimiento es de \$500 al año durante los primeros diez años.

También, se deben incorporar otros equipos que igual están incluidos si se utilizara motor eléctrico. Los equipos y los costos se muestran a continuación.

Tabla 3. Costo de equipos para propulsión diésel.

<b>Equipo</b>	<b>Precio</b>
<b>Motor CAT C18</b>	50 000
<b>Transmisión</b>	18 900
<b>Hélice y eje</b>	70 000
<b>Inversor 230 V</b>	5 000
<b>Inversor 24 V</b>	5 000
<b>Baterías 24 V</b>	1 000
<b>Interfases hombre</b>	10 000
<b>Máquina</b>	
<b>Tanques de combustible</b>	22 000
<b>Total</b>	181 900

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel, con datos de proveedor (Ver Anexo tercero).

Para este caso, con motores diésel, la inversión inicial –tomando en cuenta los mismos datos que para el eléctrico– únicamente con el cambio del sistema de propulsión y la eliminación de los paneles solares tendría un estimado de:

Tabla 4. Inversión inicial de un velero con combustible fósil.

<b>Herramientas</b>	\$	<b>59 500,00</b>
<b>Diseño del barco</b>	\$	30 000,00
<b>Inspección</b>	\$	10 000,00
<b>Seguro</b>	\$	80 000,00
<b>Materiales de construcción naval</b>	\$	715 500,00
<b>Paneles solares</b>		N/A
<b>Sistema de propulsión diésel</b>	\$	181 900
<b>Plomería</b>	\$	17 500,00
<b>Navegación</b>	\$	16 300,00
<b>Implementos de seguridad</b>	\$	67 250,00
<b>Sitio (Astillero)</b>	\$	197 100,00
<b>Personal de oficina</b>	\$	69 800,00
<b>Transporte</b>	\$	75 400,00
<b>Trabajo/salarios</b>	\$	1 092 600,00
<b>Alimentación y alojamiento</b>	\$	233 840,00
<b>Préstamo privado</b>	\$	50 000,00
<b>Subtotal</b>	\$	2 896 690,00
<b>Amortiguador financiero 20%</b>	\$	579 338,00
<b>Agregado</b>		
<b>Comisiones</b>	\$	173 643,25
<b>Total</b>	\$	<b>3 649 671,25</b>

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel con datos de cotizaciones y de SAILCARGO (2019).

## 5.2 Costos de operación

Según Vigil (2011):

$$OC = M + ST + MN + I + AD$$

OC: costos de operación.

M: costes de tripulación.

ST: alimentos y reservas.

MN: reparaciones y mantenimiento.

I: seguro.

AD: administración.

### 5.2.1 Costos de operación con propulsión eléctrica

Según datos de SAILCARGO INC., los costos de operación estimados para el caso de propulsión eléctrica son:

Tabla 5. Gastos de un velero eléctrico.

Costo	Mensual	Anual
Salarios de tripulación	\$ 11 300	\$ 135 600
Reservas de la empresa	\$ 2 000,00	\$ 24 000,00
Alimentación (8\$ pp)	\$ 4 480,00	\$ 53 760,00
Lavandería	\$ 200,00	\$ 2 400,00
Combustible para bote	\$ 150,00	\$ 1 800,00
Agua	\$ 1 000,00	\$ 12 000,00
Renta Automóvil	\$ 400,00	\$ 4 800,00
Cena de la tripulación	\$ 800,00	\$ 9 600,00
Combustible barco	\$ -	\$ -
Atuendos de la tripulación	\$ 250,00	\$ 3 000,00
Mantenimiento	\$ -	\$ 10 000,00
Seguro	\$ -	\$ 55 000,00
Promociones	\$ 1 000,00	\$ 12 000,00
Generador eléctrico	\$ -	\$ -
Tarifa de agente	\$ 3 000,00	\$ 36 000,00
Tarifas de puerto	\$ -	\$ 30 000,00
Costos de contingencia	\$ 1 000,00	\$ 12 000,00
Certificación	\$ -	\$ 5 000,00
Personal de tierra	\$ 5 000,00	\$ 60 000,00
<b>Total</b>	<b>\$ 19 280,00</b>	<b>\$ 466 960,00</b>

Fuente: SAILCARGO (2019).

En esta tabla, la fila de mantenimiento corresponde a aquellos aspectos generales estimados en toda la embarcación; los costos por mantenimiento en equipos de propulsión varían por año según la periodicidad de las labores. Este tema se abordará en apartados posteriores.

### 5.2.2 Costos de operación con propulsión diésel

Para hacer la analogía con el uso de propulsión a base de combustible fósil, se utilizan los mismos datos, modificando, según corresponda, las casillas de combustible del barco, generador y los costos de mantenimiento.

Para estimar el costo por consumo de combustible en que se incurriría si el sistema de propulsión auxiliar fuese de combustible fósil, se utilizará el método desarrollado



por MEET (1999), el en cual, de acuerdo con el tipo de embarcación y el arqueo bruto (GT), se obtiene el consumo de combustible.

Los datos iniciales para realizar esta estimación son los siguientes:

Tabla 6. Clasificación por tipo de barco.

<b>Clasificación del tipo de barco</b>	
<b>Código</b>	<b>Nombre</b>
SB	Solid bulk
LB	Liquid bulk
GC	General cargo
CO	Container
PC	Passenger/Ro-Ro/Cargo
PA	Passenger
HS	High speed ferries
IC	Inland Cargo
<b>SS</b>	<b>Sail ships</b>
TU	Tugs
FI	Fishing
OT	Other

Fuente: MEET (1999).

Tabla 7. Fórmula de consumo según tipo de barco y arqueo bruto.

<b>Tipo de barco</b>	<b>Formula de consumo</b>
SB	$20,186+0,00049*GT$
LB	$14,685+0,00079*GT$
GC	$9,8197+0,00143*GT$
CO	$8,0552+0,00235*GT$
PC	$12,834+0,00156*GT$
PA	$16,904+0,00198*GT$
HS	$39,483+0,00972*GT$
IC	$9,8197+0,00143*GT$
<b>SS</b>	<b><math>0,42682+0,001*GT</math></b>
TU	$5,6511+0,01048*GT$
FI	$1,9387+0,00448*GT$
OT	$9,7126+0,00091*GT$

Fuente: MEET (1999)

Para el caso particular de CEIBA, el barco corresponde al tipo velero (SS) con 281 GT. Al introducir este dato en la fórmula, se obtiene un consumo diario de

combustible de 0,70782 toneladas. Para calcular el consumo estimado anual en toneladas, se debe multiplicar por el número de días de operación y por un factor que corresponde a 1 cuando el barco va a toda máquina; 0,8 los días en que el barco navega a velocidad crucero; 0,4 en maniobras y 0,2 en puerto.

Según datos de SAILCARGO, durante todo el año se hacen dos rutas que comprenden trescientos diecinueve días en total, de los cuales doscientos cuarenta y siete el barco se encuentra navegando y setenta y dos en puerto.

Tabla 8. Consumo de un velero con combustible fósil.

	<b>Navegación</b>	<b>Puerto</b>
<b>Consumo diario</b>	0,70782	0,70782
<b>Número de días</b>	247	72
<b>Factor</b>	1	0,2

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel con datos de SAILCARGO (2019).

En cada puerto de salida se cargará el combustible necesario para llegar al próximo puerto; por ejemplo, en Costa Rica se cargará combustible necesario para dieciséis días, tiempo que tarda en llegar al puerto en Perú, y así de manera sucesiva. Se realiza de esta forma pues, como se ve en la Tabla 10, por conceptos de precios del combustible, la recarga en cada país no costará lo mismo.

Tabla 9. Estimación de consumo anual de combustible para un velero con motor auxiliar diésel.

<b>Localidad</b>	<b>Días para llegar a próximo puerto</b>		<b>Consumo (t)</b>	<b>Consumo (l)</b>
	<b>Navegando</b>	<b>Puerto</b>		
<b>Costa Rica</b>	10	6	7,93	9326,57
<b>Perú</b>	6	6	5,10	5995,65
<b>Galápagos</b>	42	6	30,58	35973,91
<b>Hawai'i</b>	24	6	17,84	20984,78
<b>Vancouver</b>	9	6	7,22	8493,84
<b>California</b>	33	6	24,21	28479,35
		<b>Total</b>	92,87	109254,10
		<b>Total anual</b>	185,73	218508,20

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel con datos de SAILCARGO (2019).

Se utilizó el factor de 1 en el total de días de navegación bajo el criterio que el motor está pensado para evitar retrasos en las entregas durante los momentos en los que no hay viento; además, porque se pueden presentar condiciones desfavorables, como fuerte oleaje o tormenta, cuando esto ocurre, se debe ir a toda máquina; en lo que sería el peor de los escenarios. Tal y como se observa, se obtiene un aproximado para cada viaje a próximo puerto, además de un aproximado total anual de 185,73 toneladas de consumo, al multiplicar por dos el valor de cada ruta completa, considerando que se planean dos rutas anuales.

Si ahora se hace este ejercicio con el velero híbrido eléctrico Ópal, el cual posee una eslora de 24 metros y 68 GT; por medio de la fórmula para SS se obtiene un consumo diario (24 horas) de 0,495 toneladas de diésel. Según datos del mismo Ópal, antes de la conversión a híbrido eléctrico se tenía un consumo aproximado de 100 litros de diésel por cuatro horas de avistamiento de ballenas (Gunnarsson, Skúlason, Sigurbjarnarson y Enge, 2016), por lo que veinticuatro horas correspondería a 600 litros de diésel. Multiplicando este valor por la densidad del diésel, que es de 850 kg/m<sup>3</sup>, se obtiene un total de 510 kg, o lo que es lo mismo 0,510 toneladas; si se calcula el porcentaje de error entre el dato que arroja el método y el dato que el mismo Ópal da sobre el consumo, se obtendría:

$$\frac{0,510 - 0,495}{0,510} \times 100 = 2,94\%$$

Retomando el análisis con datos obtenidos de ARESEP (2020), los precios internacionales de diésel rondan los \$70 por barril, lo que corresponde aproximadamente a 159 litros (unos \$0,44 por litro; en Costa Rica, el precio comercial del diésel es de \$0,70 por litro al momento de realizar la consulta). Sin embargo, es importante considerar que no solo se cargará combustible en Costa Rica, y el precio internacional es una referencia a la que el comercializador le incluye un margen de ganancia, de este modo, lo más preciso sería tomar el dato de precio comercial en cada localidad donde se planea cada ruta.

Tabla 10. Estimación de costos anuales de combustible para un velero de carga con motor auxiliar diésel.

Localidad	Consumo (l)	Precio (USD)	Total compra
Costa Rica	9326,57	\$ 0,70	\$ 6 528,60
Perú	5995,65	\$ 0,94	\$ 5 635,91
Galápagos	35973,91	\$ 0,27	\$ 9 712,96
Hawaii	20984,78	\$ 1,06	\$ 22 243,87
Vancouver	8493,84	\$ 1,02	\$ 8 663,72
California	28479,35	\$ 0,86	\$ 24 492,24
	109254,10	Total	\$ 77 277,29
	218508,20	Total anual	\$ 154 554,58

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Como se observa, si se incluyera un motor diésel auxiliar en el velero, anualmente se tendría que facturar un aproximado de \$154 554,58, este método calcula el total de combustible consumido por la nave, entonces los costos por generación eléctrica ya están incluidos en el cálculo, de manera que solo faltan los costos por mantenimiento, descritos en la siguiente sección. Una vez obtenidos los costos por consumo, es posible realizar una aproximación de los gastos por concepto de operación si se instala un sistema de propulsión diésel, lo cual se ve en la siguiente tabla.

Tabla 11. Costos por operación.

Costo	Mensual	Anual
Salarios de tripulación	\$ 11 300,00	\$ 135 600,00
Reservas de la compañía	\$ 2 000,00	\$ 24 000,00
Alimentación (8\$ pp)	\$ 4 480,00	\$ 53 760,00
Lavandería	\$ 200,00	\$ 2 400,00
Combustible para bote	\$ 150,00	\$ 1 800,00
Agua	\$ 1 000,00	\$ 12 000,00
Renta automóvil	\$ 400,00	\$ 4 800,00
Cena de la tripulación	\$ 800,00	\$ 9 600,00
Combustible barco	\$ -	\$ 154 554,58
Atuendos de la tripulación	\$ 250,00	\$ 3 000,00
Mantenimiento	\$ -	\$ 10 000,00
Seguro	\$ -	\$ 55 000,00
Promociones	\$ 1 000,00	\$ 12 000,00
tarifa de agente	\$ 3 000,00	\$ 36 000,00
Tarifas de puerto	\$ -	\$ 30 000,00
Costos de contingencia	\$ 1 000,00	\$ 12 000,00
Certificación	\$ -	\$ 5 000,00
Personal de tierra	\$ 5 000,00	\$ 60 000,00
<b>Total</b>	<b>\$ 30 580,00</b>	<b>\$ 621 514,58</b>

Fuente: SAILCARGO (2019).

### 5.3 Costos de mantenimiento

La estimación del costo de las labores de mantenimiento se lleva a cabo, según Dhillon (2002), mediante la fórmula:

$$C_{em} = LR(1 + BR)TAH$$

$C_{em}$ : costo por empleado.

LR: tasa de costo laboral (salario por hora).

BR: tasa de beneficio (beneficios anuales).

TAH: total de horas anuales trabajadas.

La estimación de costos totales de las labores de mantenimiento:

$$TLC = C_{em}N$$

TLC (Total Labor Cost)

N: número de empleados.

Por otro lado, la estimación de los costos de materiales también es un aspecto importante por considerar, y es responsable de entre un 40% a un 50% de los costos totales de mantenimiento (Dhillon, 2002).

El costo total de las existencias en el momento de la reparación viene dado por la fórmula:

$$TCS = WI + IC + \left[ \frac{(T \times PDC) + (10 \times PDC)}{100} \right]$$

TCS: costo total del *stock* en el momento de reparación.

PDC: valor presente del artículo del inventario, incluido el precio de compra y valor de envío.

WI: valor del artículo de inventario después de n periodos.

IC: costo de inventario por artículo.

T: tiempo, expresado en meses, en que el artículo está en inventario.

$$PDC = w \times PP \times (1 + L_s + L_u) - SM$$

$$WI = PDC \times (1 + i)^n$$

$$IC = \frac{FSC \times B}{K \times R}$$

PP: precio del material por unidad.

L<sub>u</sub>: pérdidas generadas por *stock* devuelto a inventario, y que es muy pequeño para uso futuro.

w: peso u otra unidad de material utilizado.

SM: precio unitario del material recuperado.

L<sub>s</sub>: pérdidas por chatarras, esqueletos, astillas.

i: tasa de interés para un periodo específico.

n: número de periodos de interés.

FSC: costo anual por pie cuadrado de piso.

B: tamaño del compartimento.

R: recíproco de los años que pasa el artículo en inventario.

K: promedio número de artículos contenidos en el compartimento.

A falta de información sensible para realizar esta estimación de manera detallada, para este apartado se utilizarán únicamente los costos de los materiales por reemplazar, según el fabricante.

Estimación de costos de mantenimientos correctivos:

El costo de las labores del mantenimiento correctivo es estimado cuando los datos de tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR) son conocidos (Dhillon, 2002); por lo que, de momento, no se incluirán dentro de los costos de este análisis.

#### 5.3.1 Mantenimiento sistema de propulsión diésel

Para la estimación de costos de mantenimiento en que se incurriría al incluir un sistema de propulsión diésel, se basó el análisis en las recomendaciones del fabricante. En este sentido, se supuso la selección de un motor Caterpillar C18 con una transmisión Twin Disc, por lo que se utilizaron los manuales respectivos para ese conjunto. El fabricante recomienda los intervalos de mantenimiento, mas no así la duración de cada intervención; debido a ello, para estimar los costos por las labores de servicio, es necesario recurrir a la experiencia o a la literatura. En este caso, se optó por recurrir a la experiencia; para ello se programó una reunión con un experto, y así obtener la información sobre los tiempos estimados de duración.

Xavier Grandjacques es ingeniero mecánico de profesión, con grado de Unlimited 2<sup>nd</sup> Engineer, tiene cerca de diez años de experiencia en mantenimiento de Super Tankers de hasta 300 metros de eslora, de yates, veleros, y por supuesto, experiencia en el motor diésel que se ha seleccionado. Con su ayuda, se ha estimado el tiempo que toma cada labor de mantenimiento.

La rutina de mantenimiento y los tiempos propuestos se pueden observar a continuación.

Tabla 12. Labores de mantenimiento con motor auxiliar diésel.

Actividad	Elemento	D	S	M	Años					Servicio h
					1/4	1	2	3	6	
					500 h	1000 h	3000 h	5000 h	10000 h	
Inspeccionar	Indicador CCV	x								0,08
Chequear	Nivel de refrigerante	x								0,08
Inspeccionar	Indicador de servicio del filtro de aire	x								0,08
Chequear	Nivel de aceite en motor	x								0,08
Drenar	Separador de agua	x								0,08
Inspección visual	Alrededor del motor	x								0,08
Inspeccionar/limpiar	Válvula de drenaje de condensado de <i>aftercooler</i>		X							0,08
Inspeccionar/limpiar	Filtro de agua de mar		X							1
Inspeccionar/reemplazar	Varillar de Zinc		X							0,75
Obtener muestra	Refrigerante del sistema (nivel 1)				x					0,08
Obtener muestra	Refrigerante del sistema (nivel 2)					x				0,08
Agregar	Prolongador ELC en sistema de refrigerante						x			0,08
Reemplazar	Líquido refrigerante ELC							x		3,5
Inspeccionar/ajustar	Latigazo en válvulas del motor					x				2
Inspeccionar/ajustar	Inyectores de combustible					x				3
Inspeccionar	Bomba de agua auxiliar					x				0,25
Chequear	Nivel de electrolito en batería					x				0,25
Inspeccionar/ajustar/ reemplazar	Correas					x				0,25
Examinar/agregar	Aditivo en sistema refrigerante					x				0,5
Limpiar	Motor					x				1
Limpiar/Reemplazar	Elemento del filtro de aire					x				0,25
Limpiar	Elemento de ventilación del carter					x				0,5
Obtener muestra	Aceite de motor					x				0,17
Reemplazar	Aceite					x				1,75
Reemplazar	Filtro en motor					x				0,25
Reemplazar	Elemento de separador de agua filtro primario					x				0,5
Reemplazar	Filtro secundario en sistema de combustible					x				0,25
Drenar	Agua y sedimento en tanque de combustible					x				0,17
Inspeccionar/reemplazar	Mangueras y abrazaderas					x				1
Comprobar/limpiar	Núcleo de <i>aftercooler</i>					x				3
Inspeccionar/limpiar	Intercambiador de calor					x				5



Continuación de tabla 12

Actividad	Elemento	Años					Servicio h			
		D	S	M	1/4 500 h	1 1000 h		2 3000 h	3 5000 h	6 10000 h
Inspeccionar	Turbocargador					x				0,75
Inspeccionar	Bomba de agua auxiliar							x		2
Reemplazar	Refrigerante del sistema							x		3,5
Reemplazar	Regulador de temperatura de agua							x		2
Inspeccionar	Amortiguador de vibraciones del cigüeñal							x		1,5
Inspeccionar	Soportes del motor							x		0,75
Inspeccionar/limpiar	Sensor de velocidad del motor							x		0,25
Inspeccionar/ajustar	Latigazo de válvula del motor							x		2
Inspeccionar	Rotadores de válvulas del motor							x		2
Inspeccionar	Arranque del motor							x		3
Inspeccionar	Alternador								x	0,16
Limpiar/comprobar	Núcleo del enfriador de aceite								x	0,75
Overhaul	Parte superior								x	4
Overhaul	Todo el motor								X	15
<b>Eje propulsor</b>										
Lubricación	Eje							x		0,5
Limpieza	Eje							x		2
Ajuste y alineación	Eje							x		3
Revisión	Bocinas de eje							x		1
<b>Propela</b>										
Limpieza	Conjunto							x		2
Ajuste y balanceo	Palas							x		3
Revisar	Conjunto							x		2
Lubricar	Elementos							x		0,5
<b>Reductora</b>										
Chequear	Nivel de aceite		x							0,17
Lubricar	Accesorios de lubricación			x						0,33
Reemplazar	Filtro de aceite									0,25
Reemplazar	Aceite					x				0,5
Chequear	Intercambiador de calor y ánodos de sacrificio				x					0,75
Limpiar	Filtro de succión					x				0,33
Inspeccionar	Acople flexible							x		0,17
Overhaul	Reductora								X	4

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel con datos de fabricante.

En esta sección, los costos por *stock* se aproximaron según los reemplazos de equipos que proponen los fabricantes, y el valor de esos; para esto último, se

consultó a proveedores locales. El desglose de los costos por *stock* se puede observar a continuación.

Tabla 13. Costo de repuestos.

<b>Motor</b>						
Actividad	Elemento	Cantidad	Especificación	Costo unitario	Costo total \$	
<b>Inspeccionar/reemplazar</b>	Varillar de Zinc	5	Varilla	\$ 4,52	\$ 22,6	
<b>Agregar</b>	Prolongador ELC en sistema de refrigerante	1	galón	\$ 29,54	\$ 29,54	
<b>Reemplazar</b>	Líquido refrigerante ELC	14	galón	\$ 29,54	\$ 413,56	
<b>Examinar/agregar</b>	Aditivo en sistema refrigerante	1	botella 1/2 l	\$ 9,67	\$ 9,67	
<b>Limpiar/Reemplazar</b>	Elemento del filtro de aire	1	Elemento	\$ 162,98	\$ 162,98	
<b>Reemplazar</b>	aceite	10	Galón	\$ 23,89	\$ 238,90	
<b>Reemplazar</b>	Filtro en motor	1	Elemento	\$ 28,51	\$ 28,51	
<b>Reemplazar</b>	Elemento de separador de agua filtro primario	1	Elemento	\$ 31,89	\$ 31,89	
<b>Reemplazar</b>	Filtro secundario en sistema de combustible	1	Elemento	\$ 38,86	\$ 38,86	
<b>Reemplazar</b>	Refrigerante del sistema	14	Galón	\$ 29,54	\$ 413,56	
<b>Reemplazar</b>	Regulador de temperatura de agua	1	Elemento	\$ 24,50	\$ 24,50	
<b>Overhaul</b>	Parte superior	1	kit	\$ 1 592,00	\$ 1 592,00	
<b>Overhaul</b>	Todo el motor	1	Kit	\$ 5 315,00	\$ 5 315,00	
<b>Reductora</b>						
<b>Reemplazar</b>	Filtro de aceite	1	Elemento	\$ 19,33	\$ 19,33	
<b>Reemplazar</b>	Aceite	1	Cubeta	\$ 150,00	\$ 150,00	
<b>Overhaul</b>	Reductora	1	kit	\$ 1 822,00	\$ 1 822,00	

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel con datos de proveedores.

De las tablas anteriores, se pueden obtener las horas y los costos de mantenimiento partiendo de una operación de 319 días, 46 semanas o 10,6 meses por año, según corresponda, así como de un costo de ₡11 761,76 por maquinista de embarcación, que en dólares sería cerca de \$20,42 por hora laborada. Los costos asociados se pueden observar en la tabla siguiente.

Tabla 14. Costos por mantenimiento.

	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>	<b>Año 6</b>
<b>Horas de mantenimiento</b>	320,098	351,348	328,508	351,348	320,098	347,508
<b>Costos por servicio</b>	\$ 6 536,40	\$ 7 174,53	\$ 6 708,13	\$ 7 174,53	\$ 6 536,40	\$ 7 096,11
<b>Costos por stock</b>	\$ 1 247,94	\$ 1 715,54	\$ 3 253,50	\$ 1 715,54	\$ 1 247,94	\$ 9 266,10
<b>Costo mantenimiento</b>	\$ 7 784,34	\$ 8 890,07	\$ 9 961,63	\$ 8 890,07	\$ 7 784,34	\$ 16 362,21

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Como se puede observar en esta tabla, para el año seis el costo por mantenimiento es mucho mayor que para el resto de los años, esto se debe a que además de los

mantenimientos habituales programados año con año, también se acumulan el restablecimiento general del motor y de la reductora, por ello, el costo incrementa sustancialmente; no obstante, para el siguiente año –año siete– volverían a los costos medios de los años del uno al cinco.

### 5.3.2 Mantenimiento sistema de propulsión eléctrico

Según las especificaciones de diseño, se utilizarán dos motores síncronos de imán permanente modelo DTS2 315YO 54W-030-5 de la casa Baumuller; estos son motores de alto par diseñados para aplicaciones a baja velocidad angular, elaborados para uso en embarcaciones, y certificados por la casa de registro Lloyd's; además de los motores, se utilizarán equipos para completar el tren de propulsión, tales como ejes y hélices. Sobre la duración de cada tarea no se encontró información teórica y no se obtuvo respuesta por parte del fabricante. Al ser equipos de poco mantenimiento, en su mayoría, las intervenciones corresponden a limpiezas o inspecciones. Otros equipos, como ejes y hélices tienen similitud con el sistema diésel, debido a esto, los tiempos para este caso se estimaron por medio de comparación con ese sistema. Cabe hacer la salvedad de que hay dos trenes de propulsión, por lo tanto, la limpieza de las hélices demandará un tiempo 2X (por tratarse de dos hélices); contrario a lo especificado en el apartado de limpieza de hélice, que para el sistema de propulsión diésel demandó un tiempo X. Para labores de lubricación o inspección se procedió de la misma manera. La duración estimada de estos mantenimientos se observa en la Tabla 15.

Tabla 15. Labores de mantenimiento con sistema auxiliar eléctrico.

Labor	Equipo	Semanal	Mensual	3000 h	5000 h	10000 h	20000 h	Duración (h)
<b>Motor</b>								
Limpieza	Carcasa del motor		x					0,5
Verificar	Caudal de sistema de enfriamiento		x					0,33
Verificar	conexiones		x					0,33
Reemplazo	Rodamientos						x	Fabricante
Reemplazo	Encoder						x	Fabricante
Inspeccionar	Sellos de carcasa del cojinete de empuje	x						0,33
<b>Eje propulsor</b>								
Lubricación	Eje			x				1
Limpieza	Eje			x				4
Ajuste y alineación	Eje			x				6
Revisión	Bocinas de eje			x				2
<b>Propelas</b>								
Limpieza	Conjunto			x				4
Ajuste y balanceo	Palas			x				6
Revisar	Conjunto			x				4
Lubricar	Elementos			x				1
<b>Baterías</b>								
	Mantenimiento del fabricante					x		N/A

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel.

En el cálculo de costos no se debe discriminar uno de los temas que generan más preocupación al momento de pensar en la electrificación de cualquier medio de transporte: la batería. Hasta el momento, no se ha incluido ningún gasto por concepto de mantenimiento de este equipo tan importante. De acuerdo con uno de los fabricantes, se planea adquirir la batería. Estas poseen una vida útil que varía según las especificaciones del cliente y lo que esté dispuesto a pagar por ella. Durante la vida útil, el mantenimiento es casi nulo, pero al alcanzar el límite se hace necesario reemplazar las celdas ineficientes, lo cual implica un gasto considerable.

En la siguiente figura se muestra el costo inicial, así como el costo por mantenimiento al fin de la vida útil para una batería con una capacidad de 840 kWh. La batería que se plantea para CEIBA es de 300 kWh, y el valor, según datos de SAILCARGO, ronda los \$300 000.

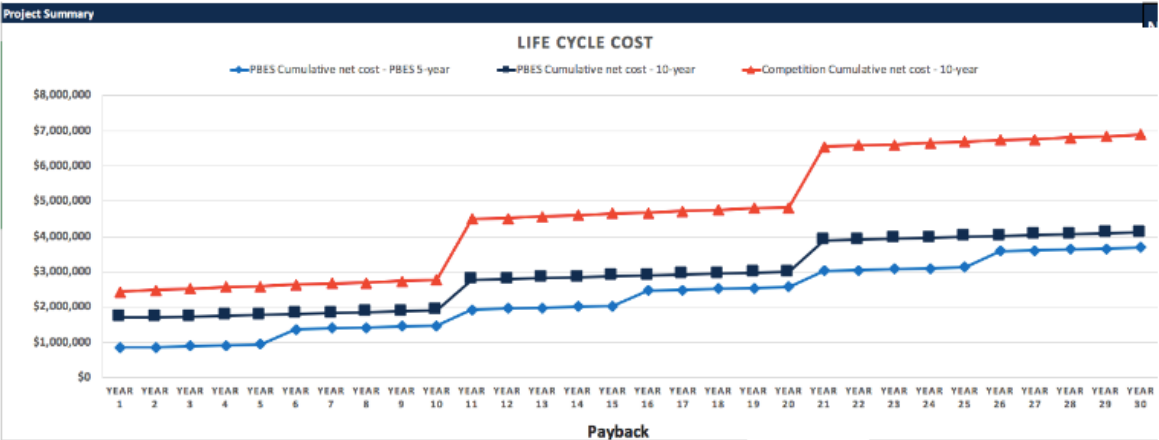


Figura 7. Costos de una batería de 840 kWh según vida útil.

Fuente: SPBES (2019).

Según lo mencionado por Valencia (2016), el precio de las baterías se encuentra ligado de manera directa con su capacidad de almacenamiento. En el 2016, el precio rondaba entre los \$300 y los \$800 por cada kWh de capacidad de almacenamiento. Se debe tener en cuenta que el fabricante no solo ofrece las baterías, sino todo un paquete integrado.

Si se aprovecha la condición de linealidad en el precio –siguiendo la gráfica de color azul en la figura– para el costo de una batería con una vida útil de cinco años, se pueden obtener dos aproximaciones un poco limitadas por la idealización, pero aproximaciones al fin. La primera es que una batería de 300 kWh rondaría un costo inicial 2,8 veces menos que la mostrada en el gráfico, es decir, cerca de los \$300 000 propuestos por SAILCARGO. La segunda es que los costos por mantenimiento también correspondan a 2,8 veces menos que los propuestos para la batería de 840 kWh, esto es, cerca de \$176 000 cada cinco años.

Una vez obtenidas las labores y la duración del mantenimiento es posible estimar los costos asociados. Para ello, se obtendrá el número de horas de mantenimiento anual. El análisis parte de un total de 319 días de servicio, 46 semanas o 10,6 meses por año, según corresponda, así como del salario de un maquinista de embarcación, el cual, de acuerdo con el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, es de ₡11 761,76 por hora laborada (MTSS, 2020). En dólares son alrededor de \$20,42, según el tipo de cambio en el momento de realizar la consulta.

Tabla 16. Costo por mantenimiento con sistema auxiliar eléctrico.

	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>	<b>Año 6</b>
<b>Horas de mantenimiento</b>	27,476	55,476	27,476	55,476	27,476	55,476
<b>Costos por servicio</b>	\$ 561,06	\$ 1 132,82	\$ 561,06	\$ 1 132,82	\$ 561,06	\$ 1 132,82
<b>Costos por stock</b>	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
<b>Costo mantenimiento</b>	\$ 561,06	\$ 1 132,82	\$ 561,06	\$ 1 132,82	\$ 176 561,06	\$ 1 132,82

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel.

En la fila de costos por *stock* no se incluye ningún gasto, ya que, según el fabricante, los reemplazos programados corresponden a rodamientos y encoder; ambas tareas se llevan a cabo de manera conjunta, y cada 20 000 horas; por lo tanto, dado el uso, se presenta cerca de cada diez años, y cae fuera del análisis a seis años planteado inicialmente.

#### 5.4 Costos de viaje

Según Vigil (2011):

$$VC = FC + PD + TP + CD$$

VC: costo de viaje.

FC: costes de combustible.

PD: costes portuarios.

TP: remolcadores y pilotajes.

CD: cuotas de los canales.

Si se observa la sección de costos operativos, ya se incluyeron estos rubros concernientes a viajes.

### 5.5 Resumen de inversión y costos

A modo de resumen, se presenta un cuadro comparativo con información sobre inversión inicial y costos relacionados a la elección de una u otra alternativa. Las cifras mostradas corresponden a inversión y gastos de la embarcación, no solo del conjunto propulsor.

Tabla 17. Resumen de inversión y costos por año.

	<b>Auxiliar eléctrico</b>	<b>Auxiliar diésel</b>
<b>Inversión inicial</b>	\$ 4 301 391,25	\$ 3 649 671,25
<b>Año</b>	<b>Gastos anuales</b>	<b>Gastos anuales</b>
<b>1</b>	\$ 467 521,06	\$ 629 298,92
<b>2</b>	\$ 468 092,82	\$ 630 404,65
<b>3</b>	\$ 467 521,06	\$ 631 476,21
<b>4</b>	\$ 468 092,82	\$ 630 404,65
<b>5</b>	\$ 643 521,06	\$ 629 298,92
<b>6</b>	\$ 468 092,82	\$ 639 468,79

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Comparando únicamente la inversión en el sistema de propulsión auxiliar, en específico para la embarcación CEIBA, el resultado obtenido se puede observar en el gráfico siguiente.

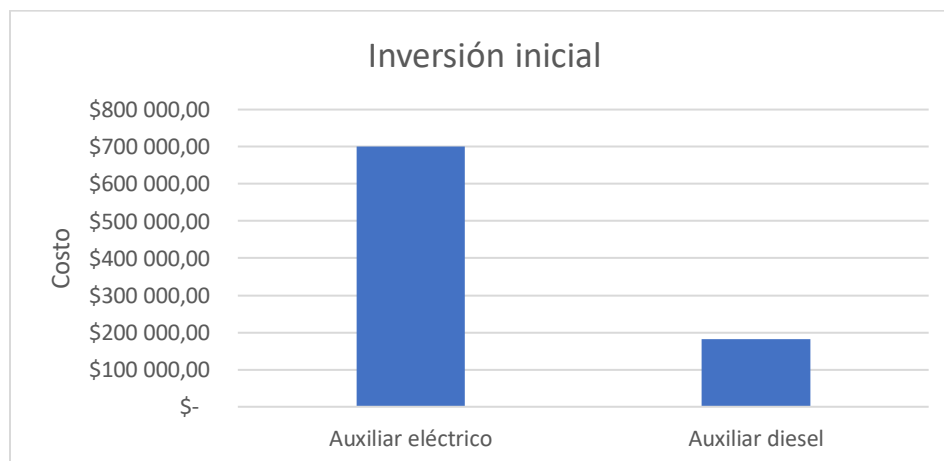


Figura 8. Comparación de inversión inicial.

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Comparando los gastos por concepto de operación y mantenimiento, se observa el comportamiento para ambos casos.

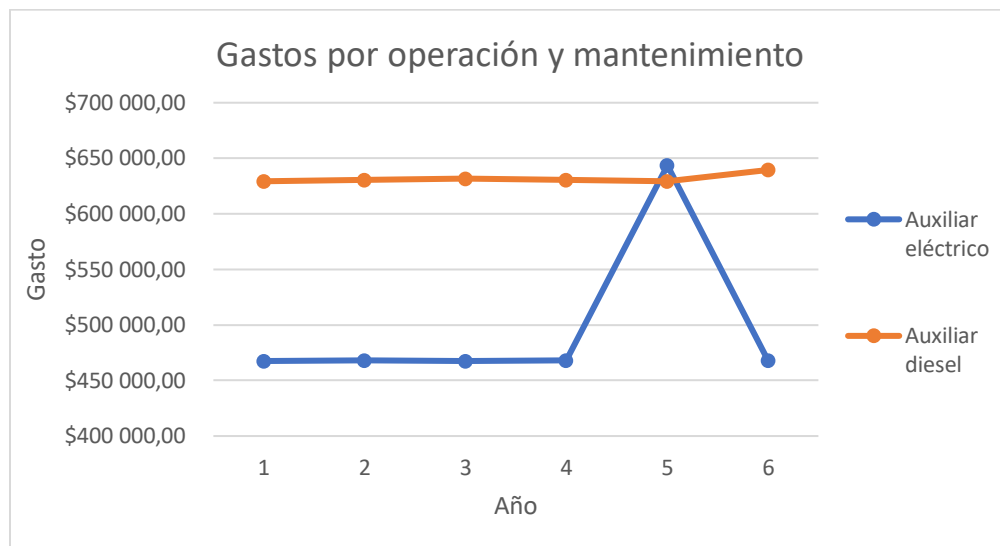


Figura 9. Comparación de gastos por operación y mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel.

En el gráfico anterior, titulado Gastos por operación y mantenimiento, se observa que, hasta el año cuatro, los gastos asociados al uso del velero con motor auxiliar eléctrico son aproximadamente 1,3 veces menores que los gastos por el uso del velero con motor diésel. Para el sistema con motor diésel, los gastos se mantienen casi constantes a lo largo de los años, mientras que para el sistema con motor eléctrico los gastos se disparan al año cinco de operación, pues es donde se presenta el primer recambio de celdas del acumulador de energía, según la vida útil del mismo.

## 5.6 Indicadores financieros del proyecto

Con el fin de evaluar la rentabilidad en el uso de ambos sistemas propuestos inicialmente para CEIBA en este trabajo, se planteó el cálculo de valor actual neto de los proyectos para seis años de análisis. Con el fin de comparar cuál de los dos proyectos representa mejores expectativas, se hizo una suposición de que en el año seis se recuperará la inversión mediante la venta del barco, con un precio correspondiente al valor en libros en ese momento. Se tomaron las proyecciones de



ingresos por año con las que cuenta SAILCARGO, así como los gastos calculados en secciones anteriores. Además de esto, se obtuvo un estimado de la tasa de rendimiento a partir del valor proyectado en los años para las acciones. Según datos de SAILCARGO, una acción de \$1 000 en el primer año aumentaría su valor en poco más de \$69, obteniendo de esta manera una tasa de rendimiento de 6,9%. Esta tasa varía levemente con el paso de los años, pero se establece como fija para evitar comprometer de más números sensibles de la empresa. Los flujos de efectivo que se proyectan por año con estos datos se observan a continuación.

Tabla 18. Flujos de efectivo para la inversión con sistema de propulsión auxiliar eléctrico.

Inversión	(4 301 391)	1	2	3	4	5	6
Ingresos		751 547	1 073 639	1 288 367	1 717 822	1 717 822	2 147 278
Costos		466 960	466 960	466 960	466 960	466 960	466 960
Utilidad bruta		284 587	606 679	821 407	1 250 862	1 250 862	1 680 318
Gastos		561	1 133	561	1 133	176 561	1132,8199
Gastos no desembolsables (ej: depreciación)		75 626	75 626	75 626	75 626	75 626	75 626
Utilidad antes de impuestos		208 400	529 920	745 219	1 174 103	998 675	1 603 559
Impuestos sobre la renta 30%		62 520	158 976	223 566	352 231	299 603	481 068
Utilidad después de impuestos		145 880	370 944	521 654	821 872	699 073	1 122 491
Gastos no desembolsables (Ajuste)		75 626	75 626	75 626	75 626	75 626	75 626
Incremento en el capital de trabajo							
Recuperación del capital de trabajo							
Recuperación de la inversión (valor desecho)							3 847 633
Nueva inversión requerida	-						
Flujo de efectivo del proyecto	(4 301 391)	221 506	446 570	597 280	897 499	774 699	5 045 750

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Tabla 19. Indicadores financieros para el proyecto con motor auxiliar eléctrico.

Tasa	<b>6,9%</b>
Flujos descontados	5 704 946
VAN	1 403 555
TIR	<b>13,29%</b>

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Se obtiene una cantidad positiva para el valor actual neto, lo cual indica que con las proyecciones realizadas sobre ingresos y gastos, es rentable invertir en el proyecto. De igual manera, se aprovechó para el cálculo de otro indicador financiero: la tasa interna de retorno (TIR), de este último indicador se obtuvo que según los ingresos y gastos proyectados, la tasa máxima que se podría ofrecer a los inversionistas sería de 13,29%, con la salvedad de que si se ofreciera esa tasa el VAN sería cero en el año seis, es decir, no habría ni ganancias ni pérdidas.

Tabla 20. Flujos de efectivo para la inversión con sistema de propulsión auxiliar diésel.

Inversión	(3 649 671)	1	2	3	4	5	6
Ingresos		751 547	1 073 639	1 288 367	1 717 822	1 717 822	2 147 278
Costos		621 514,58	621 514,58	621 514,58	621 514,58	621 514,58	621 514,58
Utilidad Bruta		130 033	452 124	666 852	1 096 308	1 096 308	1 525 763
Gastos		7 784	8 890	9 962	8 890	7 784	17 954,21
Gastos no desembolsables (ej: depreciación)		75 626	75 626	75 626	75 626	75 626	75 626
Utilidad antes de impuestos		46 622	367 608	581 264	1 011 791	1 012 897	1 432 183
Impuestos sobre la renta 30%		13 987	110 282	174 379	303 537	303 869	429 655
Utilidad después de impuestos		32 635	257 326	406 885	708 254	709 028	1 002 528
Gastos no desembolsables (Ajuste)		75 626	75 626	75 626	75 626	75 626	75 626
Incremento en el capital de trabajo							
Recuperación del capital de trabajo							
Recuperación de la inversión (valor desecho)							3 195 913
Nueva inversión requerida	-						
Flujo de efectivo del proyecto	(3 649 671)	108 262	332 952	482 511	783 880	784 654	4 274 067

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Tabla 21. Indicadores financieros para el proyecto con motor auxiliar diésel.

Tasa	<b>6,9%</b>
Flujos descontados	4 809 416
VAN	1 159 745
TIR	13,01%

Fuente: Elaboración Propia en Microsoft Excel.

De este análisis para el barco CEIBA, si se utilizara un motor diésel también se obtiene un resultado positivo en el valor actual neto de los flujos de efectivo a seis años, lo cual indica que en este caso el proyecto también resulta rentable. Analizando también el indicador de tasa interna de retorno, se obtiene una tasa mayor a la propuesta.

Si se comparan los resultados obtenidos para ambas propuestas, se concluye que ambas resultan atractivas; sin embargo, aquella que incorpora el uso de motor auxiliar eléctrico lo es más, pues a lo largo de los años refleja mayores dividendos incluso con los altos costes de inversión inicial y de mantenimiento de la batería. Lo que resta rentabilidad en el uso de motor diésel es el alto coste por energía respecto de su oponente, que la obtiene casi sin costo.

## 6 Capítulo VI. Factibilidad técnica

---

### 6.1 Generalidades

Según su naturaleza, algunas máquinas eléctricas son capaces de funcionar como generador y como motor; por su parte, la hélice de paso variable es capaz de desplazar el ángulo de sus palas para aumentar el rendimiento bajo condiciones de operación específicas, así como el diseño de las velas de la embarcación permite el avance incluso con vientos suaves. Por otro lado, los avances tecnológicos han permitido aumentar la capacidad de almacenamiento y, por ende, la autonomía de las baterías. Dadas las razones expuestas, el presente estudio puede resultar muy interesante, e incluso poner un nuevo actor dentro de la industria de los envíos, en caso de demostrarse su viabilidad.

Con la creciente demanda de productos y servicios amigables con el ambiente, el uso del motor eléctrico en el transporte ha venido ganando terreno; gracias a la constante investigación en materia de almacenamiento energético en baterías, está claro que el concepto de movilidad amigable con el ambiente se encuentra firme.

Aunque es una industria que está comenzando, se proyecta como una de las principales alternativas para hacer frente al cambio climático generado por las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero. Sin embargo, al igual que ocurre en la industria del automóvil, se encuentran algunos obstáculos, entre los que destacan el peso, la autonomía que puede entregar el sistema de baterías, y los altos costos. Con la constante investigación en el campo de almacenaje de energía, se espera que en las próximas décadas esos no sean obstáculos, y se pueda dar fin al sistema de transporte térmico tan contaminante. Una de las principales ventajas de un velero eléctrico es que no solo depende del sistema de baterías para la propulsión sostenible; la energía del viento se aprovecha tanto para el impulso de la nave como para la recarga de baterías, lo cual permite que la autonomía de la embarcación no se vea limitada a la capacidad de almacenamiento de las baterías.

Los principales aspectos que distinguen un vehículo eléctrico de uno de combustión interna son los componentes de almacenaje de energía, propulsión y frenado (EEA, 2018).

La mayor particularidad de la hélice de interés es que debe desempeñarse de modo eficiente y aceptable tanto para propulsar la embarcación como para la regeneración de energía cuando esta navega a cierta velocidad bajo propulsión a vela.

Los datos iniciales sobre la hélice de tornillo que se utilizará en la embarcación indican que sus palas son de paso variable, debe cumplir con un diámetro de 1,8 m, y debe contar con cuatro palas.

Estos datos no son antojadizos, el número de palas en embarcaciones es un dato ya conocido; dos palas son apenas utilizadas, ya que agregan mayores tensiones en el eje, y son propensas a generar vibraciones en el barco; tres palas son una regla general en barcos pequeños y medianos de gran velocidad; cuatro palas siempre se utilizan en barcos de carga, remolcadores y rompehielos (Bauer y Robertson, 1905). Asimismo, al propulsar, el diámetro de la hélice debe ser el mayor posible para hacer pasar por esta el mayor volumen de agua que se pueda (Wilson, 2005). Teniendo en cuenta, además, que la hélice trabajará en la generación de energía, el diámetro es un aspecto importante, pues la energía cinética que obtiene una hélice al desplazarse por un fluido o un fluido desplazarse a través de ella, es proporcional al área de la hélice, y, por tanto, a mayor diámetro mayor energía cinética disponible (Echeverría, s.f).

Dadas las condiciones iniciales, uno de los aspectos que más interesan al elegir un diseño u otro es la eficiencia; la eficiencia en una hélice depende de la relación entre el paso-diámetro, el área desarrollada, la relación entre área desarrollada-área de disco y el deslizamiento real. En barcos con hélices muy pequeñas y que rotan a gran velocidad, la eficiencia también es afectada por el fenómeno de cavitación, el cual es producto de la formación de pequeñas cavidades en las caras frontales de las palas al cortar la columna de agua (Bauer y Robertson, 1905).

Para la estimación de la potencia que puede ser generada por medio de la hélice al ser empujada por el agua, se utiliza la ecuación de movimiento de un flujo a través de un sólido descrita por Echeverría (s.f) en su trabajo sobre obtención de energía a partir de las corrientes marinas:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3$$

Donde:

P: potencia.

$C_p$ : coeficiente o límite de Betz.

$\rho$ : densidad del agua.

A: área del disco imaginario de la hélice.

v: velocidad del fluido.

En esta ecuación se utiliza un factor llamado límite de Betz, que recibe su nombre por el físico Albert Betz, el cual describió que, en cualquier diseño de turbina o hélice, el máximo teórico que puede transformarse de energía cinética a energía mecánica en el árbol es de 59,3%.

Ahora bien, para un caso particular, la eficiencia de la hélice también es un aspecto por considerar si desea estimarse la potencia que se obtendrá en el eje del generador. Como se puede apreciar en las gráficas siguientes, es evidente que con el pasar de los años las nuevas tecnologías y la profunda investigación en hélices de las casas fabricantes, la eficiencia ha aumentado respecto de los datos presentados; sin embargo, el fabricar una hélice eficiente no es una tarea sencilla, e involucra una tecnología apenas en desarrollo para la aplicación específica deseada, por lo que, en el peor de los casos, se tomará el dato de eficiencia recomendado.

Eficiencia versus relación paso-diámetro:

En los elementos de la pala donde la relación paso-diámetro  $\frac{d}{H}$  es menor a 0,5, la eficiencia tiende a ser muy baja, por lo cual se debe buscar que para el mayor número posible de elementos de la pala, la relación  $\frac{d}{H}$  conduzca a altas eficiencias.

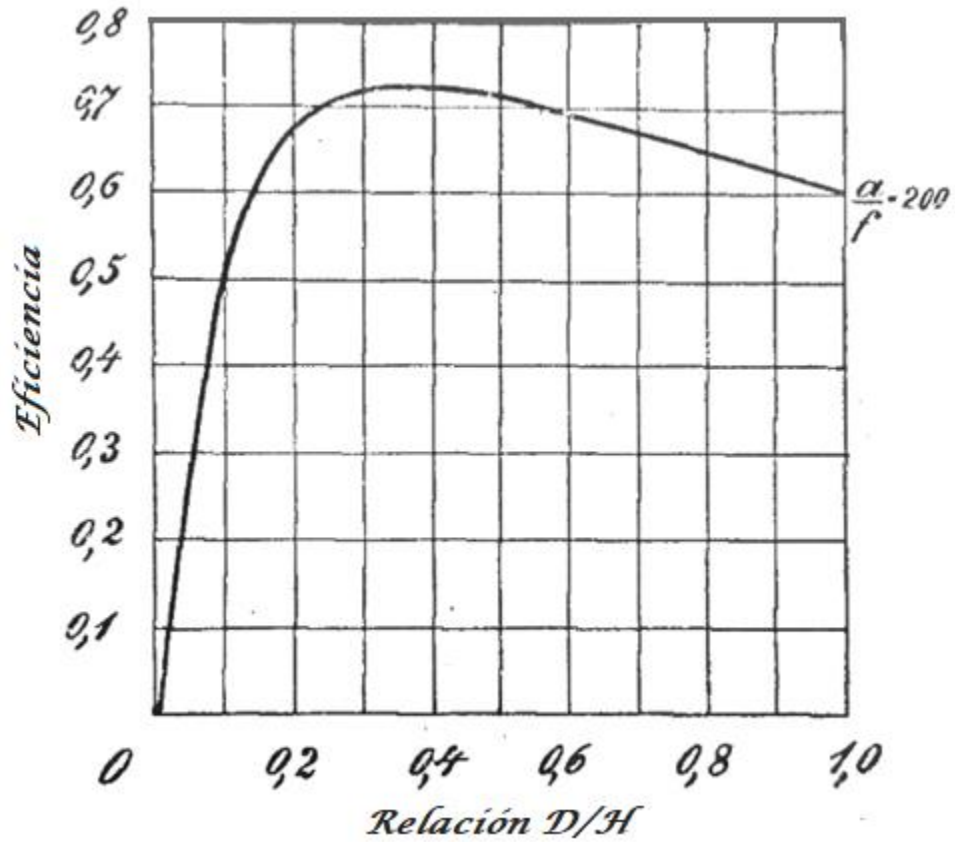


Figura 10. Eficiencia en función de la relación paso-diámetro de hélice.

Fuente: Bauer & Robertson (1905).

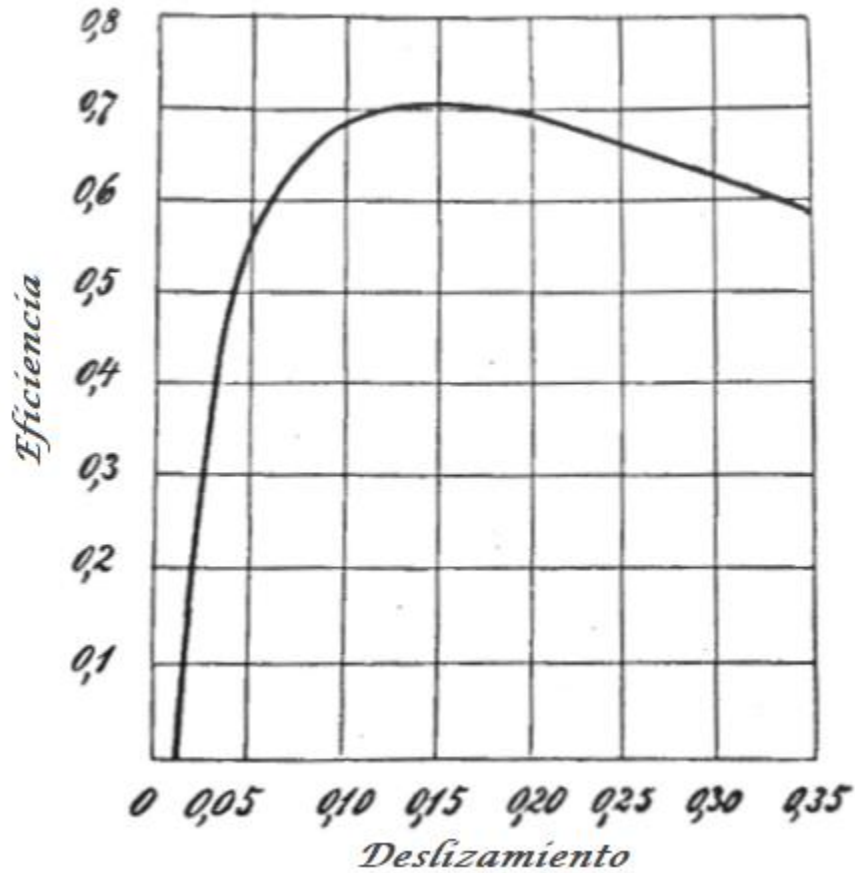


Figura 11. Eficiencia en función del deslizamiento de la hélice.

Fuente: Bauer & Robertson (1905).

En ambas gráficas, el autor recomienda buscar relaciones que conduzcan a una eficiencia mínima de 0,6, por lo que, si se toma ese valor teórico, es posible tener un estimado de la potencia de la que se dispondrá en el árbol. Una hélice de paso variable permite obtener una mejor eficiencia al hacer cambios en el paso; sin embargo, para efectos teóricos se tomará una eficiencia de hélice de 0,6 a fin de obtener un dato reservado. Los resultados al emplear la fórmula para el cálculo de potencia con una eficiencia de 0,6 se observan a continuación.



## 6.2 Cálculo teórico

Partiendo de las ecuaciones anteriormente observadas con los datos iniciales de área del disco de la hélice, la densidad del agua y el coeficiente de Betz, es posible calcular un estimado de potencia máxima que se podría obtener en el árbol de transmisión a partir del movimiento relativo del agua al avanzar el barco. Los resultados se muestran en la Tabla 22, en la cual, para la columna de torque se supuso una velocidad angular de la hélice de 300 rpm, solo para obtener de manera representativa el torque que se podría desarrollar. Posteriormente, se observará que la velocidad angular no es constante, y depende de la velocidad de avance del barco.

Tabla 22. Estimación de torque y potencia.

<b>W</b>	<b>kW</b>	<b>Nudos</b>	<b>Torque en árbol (Nm)</b>
<b>147332,02</b>	147,33	14,00	4689,72
<b>117962,26</b>	117,96	13,00	3754,86
<b>92780,51</b>	92,78	12,00	2953,30
<b>71464,62</b>	71,46	11,00	2274,79
<b>53692,43</b>	53,69	10,00	1709,08
<b>39141,78</b>	39,14	9,00	1245,92
<b>27490,52</b>	27,49	8,00	875,05
<b>18416,50</b>	18,42	7,00	586,22
<b>11597,56</b>	11,60	6,00	369,16
<b>6711,55</b>	6,71	5,00	213,64
<b>3436,32</b>	3,44	4,00	109,38
<b>1449,70</b>	1,45	3,00	46,15
<b>429,54</b>	0,43	2,00	13,67

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Esta potencia presentada es la que se estima esté disponible en el árbol. Para calcular un estimado de la potencia eléctrica que puede obtenerse de la regeneración, es necesario introducir datos de eficiencia tanto del motor como del árbol de transmisión de esa potencia; según datos de Baumüller, para motores de imanes permanentes DST2 315 a 300 RPM las eficiencias oscilan entre 0,86 y 0,92, de acuerdo con el modelo específico (Baumüller, 2014). Para la eficiencia en el árbol de transmisión, según Cabarcos (2018), las pérdidas por calor entre el motor y la hélice –contemplando el uso de reductor– son de 2%; al no contemplar el uso

de reductor, estas pérdidas se despreciarán. De manera teórica, la potencia eléctrica que podría regenerarse por unidad de generación, luego de asumir estos valores, se muestra a continuación.

Tabla 23. Potencia teórica que se puede convertir a eléctrica con una hélice de 1.8 metros de diámetro.

<b>W</b>	<b>kW</b>	<b>Nudos</b>
<b>126705,54</b>	126,71	14,00
<b>101447,54</b>	101,45	13,00
<b>79791,24</b>	79,79	12,00
<b>61459,57</b>	61,46	11,00
<b>46175,49</b>	46,18	10,00
<b>33661,93</b>	33,66	9,00
<b>23641,85</b>	23,64	8,00
<b>15838,19</b>	15,84	7,00
<b>9973,91</b>	9,97	6,00
<b>5771,94</b>	5,77	5,00
<b>2955,23</b>	2,96	4,00
<b>1246,74</b>	1,25	3,00
<b>369,40</b>	0,37	2,00

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Al dar un vistazo a uno de los pocos barcos que utilizan este sistema de generación, Ópal – el cual usa un sistema de características casi idénticas–, se demuestra que al navegar únicamente con velas a 5 nudos se obtiene una capacidad de generación eléctrica entre 4 y 5 kW (Gunnarsson, Skúlason, Sigurbjarnarson y Enge, 2016). En este estudio, el valor teórico luego de algunas idealizaciones es de 5,77 kW a 5 nudos.

### 6.3 Análisis CFD mediante el programa SolidWorks

Para elaborar el análisis del comportamiento de una hélice, se realizó un diseño simplificado sobre el cual hacer las simulaciones; no se utilizó un diseño comercial ya que las casas fabricantes, por obvias razones, no proveen esta información. El diseño que se siguió es el presentado en el libro “Marine Engines and Boilers” (1905).

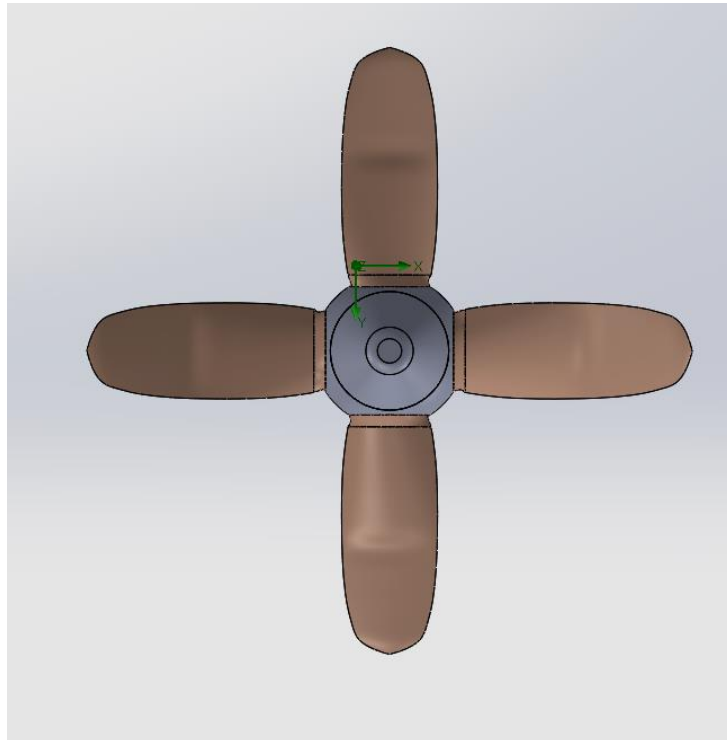


Figura 12. Vista frontal de hélice diseñada.

Fuente: Elaboración propia basada en el libro “Marine Engines and Boilers” (1905).

Para obtener los resultados, el programa tiene como dato de entrada la velocidad del fluido y la velocidad angular a la que gira la hélice; sin embargo, la velocidad de rotación es un dato desconocido, por lo que se recurrirá a introducir un dato inicial, observar los resultados e iterar a partir de lo obtenido.

Tabla 24. Primer ingreso de datos al programa.

Nudos	Velocidad de rotación (rad/s)							
	0	1	2	3	4	5	6	7
4	509	509	507	505	498	495	495	498
5	804	804	802	798	788	794	780	775
6	1140					1133		
7	1562					1548		
8	2086					2074		
9	2584					2568		
10	3204					3186		
11	3876					3798		

Elaboración propia en Microsoft Excel, con datos obtenidos de SolidWorks Student.

De este primer barrido de simulaciones, se observa que el torque obtenido en las palas de la hélice varía poco al aumentar la velocidad del fluido, lo cual supone, para una potencia dada, que al aumentar la velocidad del fluido, el dato que más presenta variación es el de velocidad angular. El lector puede observar un ejemplo de este fenómeno al soplar sobre las aspas de un pequeño ventilador, al soplar con mayor intensidad el aspa girará más rápido. Para las velocidades de 4 y 5 nudos, se realizaron simulaciones desde cero hasta 7 rad; para las demás velocidades solamente se comprobó que el comportamiento persiste, y se tomó un valor de torque medio entre las columnas de 0 y 5 rad a fin de obtener la máxima rotación que podría alcanzar el aspa para producir la máxima potencia –que se obtuvo en la Tabla 9– según la velocidad de fluido.

Tabla 25. Determinación de velocidad angular.

<b>Velocidad</b>	<b>Potencia máx (W)</b>	<b>Torque medio (N) software</b>	<b>n max (rad/s)</b>	<b>n max (rpm)</b>
<b>4</b>	3 436,315292	502	6,845249586	65,32
<b>5</b>	6 711,553305	799	8,399941558	80,11
<b>6</b>	11 597,56411	1 136,5	10,20463186	97,4
<b>7</b>	18 416,50227	1 555	11,84340982	113
<b>8</b>	27 490,52234	2 080	13,21659728	126
<b>9</b>	39 141,77887	2 576	15,19478994	145
<b>10</b>	53 692,42644	3 195	16,80514129	160
<b>11</b>	71 464,61959	3 837	18,6251289	177

Fuente: elaboración propia en Microsoft Excel, con datos obtenidos de SolidWorks Student.

Se procede a realimentar *el software* nuevamente con este nuevo valor de velocidad angular obtenido. Para observar el comportamiento del *software* se muestra lo siguiente:

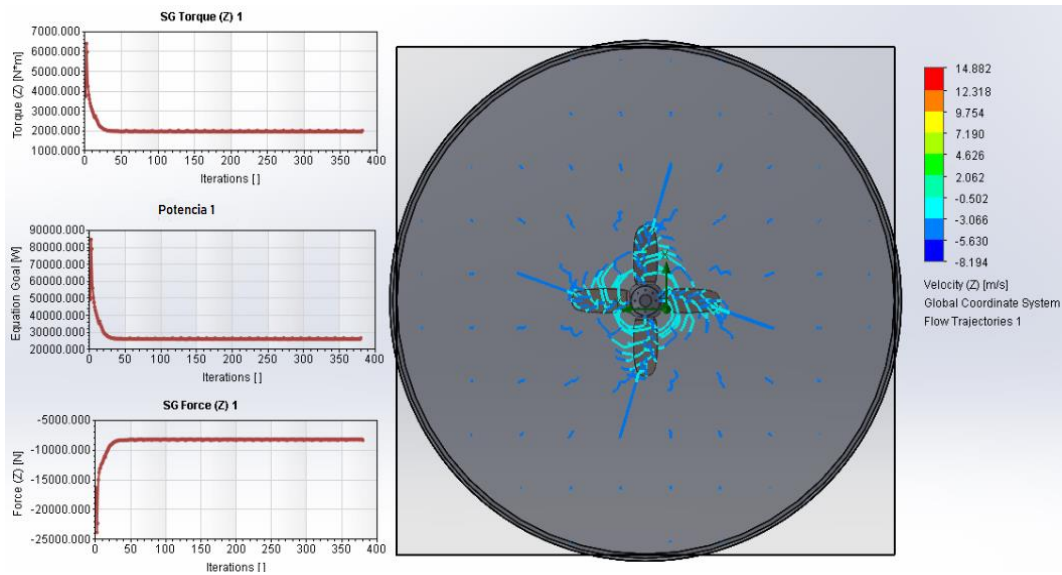


Figura 13. Vista del resultado de una simulación CFD.

Fuente: Elaboración propia en SolidWorks Student.

La imagen anterior corresponde a una simulación con el fluido pasando a una velocidad de 8 nudos (unos 4,12 m/s) y velocidad angular de 13,21 rad/s, en el centro se pueden observar la hélice y las líneas correspondientes al flujo de agua, el mapa de color indica que inicialmente el fluido se movía entre 3,066 m/s y 5,630 m/s, más exactamente a 4,12 m/s, que fue el parámetro al cual se configuró. Al contactar con la hélice y cambiar su dirección, se corrobora que la velocidad disminuye. El círculo que se aprecia alrededor es simplemente para encasillar el fluido, y que este tenga una trayectoria definida; por otro lado, el cuadrado fuera del círculo representa el dominio computacional sobre el que se realizó el cálculo. En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos con las palas orientadas a 30° desde el plano normal en la cara frontal de la hélice.

Tabla 26. Parámetros obtenidos para diferentes velocidades de avance.

<b>Nudos</b>	<b>m/s</b>	<b>rad/s</b>	<b>rpm</b>	<b>Torque obtenido (Nm)</b>	<b>Potencia (W)</b>	<b>Fuerza (N)</b>
<b>4</b>	2,05778	6,85	65,32	495	3 388	2 056
<b>5</b>	2,57223	8,40	80,11	781	6 565	3 353
<b>6</b>	3,08667	10,20	97,4	1118	11 412	4 676
<b>7</b>	3,60112	11,84	113	1517	17 964	6 303
<b>8</b>	4,11557	13,22	126	2021	26 723	8 319
<b>9</b>	4,63001	15,19	145	2505	38 054	10 384
<b>10</b>	5,14446	16,81	160	3182	53 503	13 049
<b>11</b>	5,6589	18,63	177	3741	69 713	15 522

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel, con datos de SolidWorks Student.

En la columna de potencias, se señala el valor que es posible obtener según el *software* por cada hélice, aunque son valores atractivos. Si recordamos la ley de conservación de la energía, se puede confirmar que esta no se da por generación espontánea, sino que proviene de la energía cinética del barco al moverse. En la columna de fuerza, se observa la fuerza que se opone al movimiento del barco al regenerar, lo cual se traducirá en una desaceleración; si se hace una analogía con el automóvil eléctrico, es como cuando se usa el freno regenerativo (en un automóvil eléctrico, se utiliza el freno regenerativo para convertir la energía cinética al bajar una pendiente u oponerse a la inercia del movimiento), en el barco de vela, y con presencia de viento, es como si en un automóvil se estuviera bajando una pendiente.

Si se realiza la aproximación de potencia total que puede ser regenerada por medio de las dos hélices, se obtienen los siguientes parámetros.

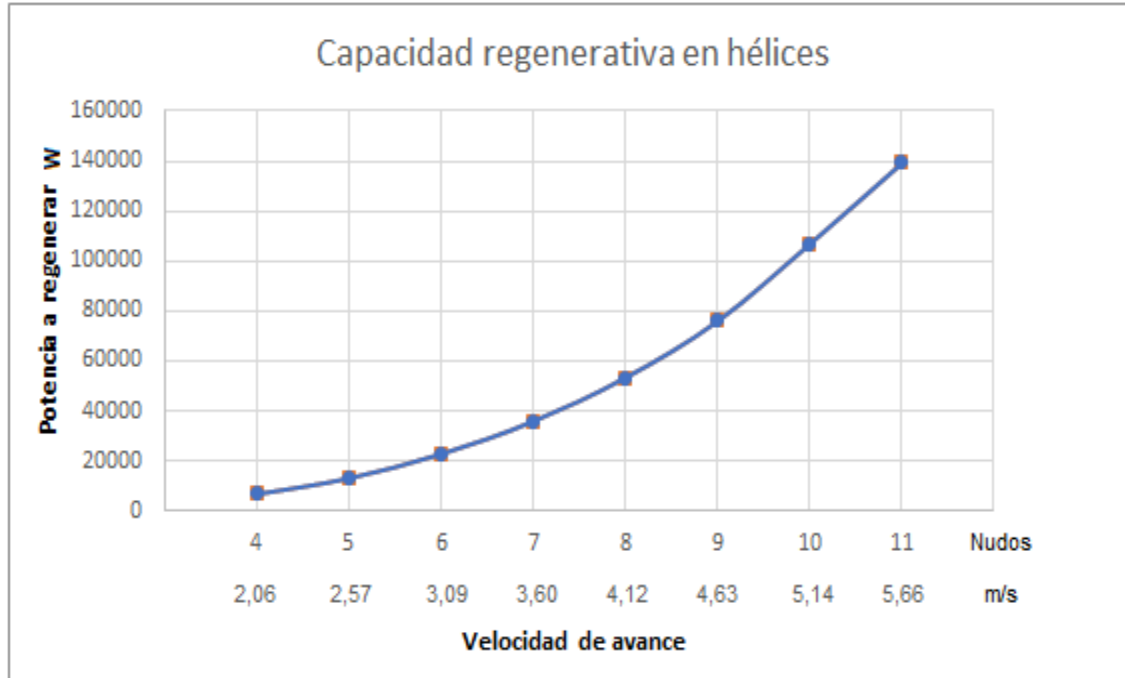


Figura 14. Potencia que se puede regenerar respecto de la velocidad de avance.

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel.

#### 6.4 Energía solar

Según datos de SAILCARGO, se plantea montar una estructura de paneles solares en la embarcación CEIBA, con un área total de hasta 70 m<sup>2</sup>. De acuerdo con Noguera, Pinto y Villarreal (2018), la eficiencia de los paneles comerciales actuales ronda el 15%, asimismo, el comercializador SUNFIELDS indica que, de manera aproximada, la irradiancia que recibe un panel solar en condiciones idóneas ronda los 1 000 W/m<sup>2</sup> (SunFields). Siguiendo estos datos, el rendimiento de un panel solar ronda los 150 W/m<sup>2</sup>.

Tomando en cuenta los 70 m<sup>2</sup> mencionados anteriormente, así como el rendimiento estimado por área para los paneles solares, se tendría una producción de 10,5 kW. Al considerar una media de ocho horas de luz solar, se obtendría una potencia total de 84 kWh proveniente de paneles solares por día.

## 6.5 Usabilidad de la energía

Para determinar la cantidad de energía que es posible regenerar, y, por ende, tener disponible para su uso posterior, es necesario sumar lo obtenido a través de la generación por paneles solares y la regeneración por el conjunto de hélices; este último dato, como vimos en secciones anteriores, depende de la velocidad en la que se desplaza el barco y del tiempo que utilice el sistema. De manera teórica, se puede suponer un escenario ficticio para dar una idea de lo que podría suceder. Se partirá de que el sistema de regeneración se utiliza únicamente dos horas por día a una velocidad de 6 nudos. Para esta velocidad, el sistema podría regenerar cerca de 23 kW, lo que, para dos horas, representaría 46 kWh de carga. En conjunto, los paneles solares y el sistema regenerativo cargan un total de 130 kWh en la batería en un día soleado. Si de esos 130 kWh se reservan 30 kWh para uso de otros equipos del barco, se tendrían 100 kWh disponibles para propulsión.

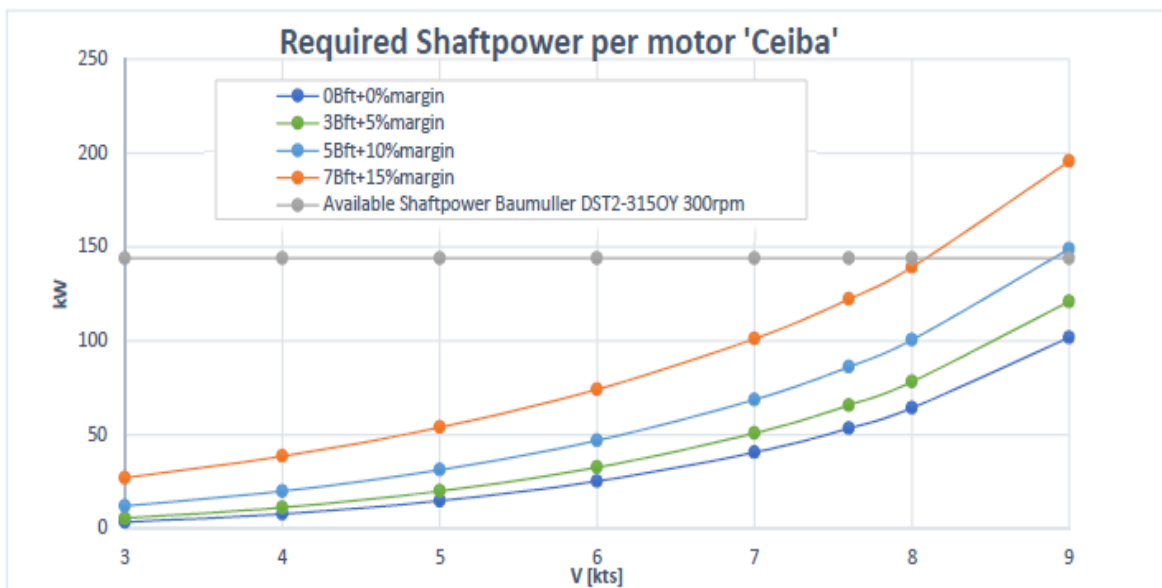


Figura 15. Potencia consumida respecto a la velocidad de avance.

Fuente: SAILCARGO.

Según la figura anterior, si se considera la línea de 5 Bft (es decir, con un viento en contra de 5 en escala Beaufort) a 5 nudos, ambos motores consumirían cerca de 50 kW, lo que daría un margen de dos horas de uso por día.



## 7 Capítulo VII. Factibilidad ambiental

El ciclo de vida de un equipo se compone por tres fases principales: fase preparatoria, fase operativa y fase de clausura (García, s.f.). Cada una de estas fases puede estar también compuesta por sub-fases, como se muestra a continuación.

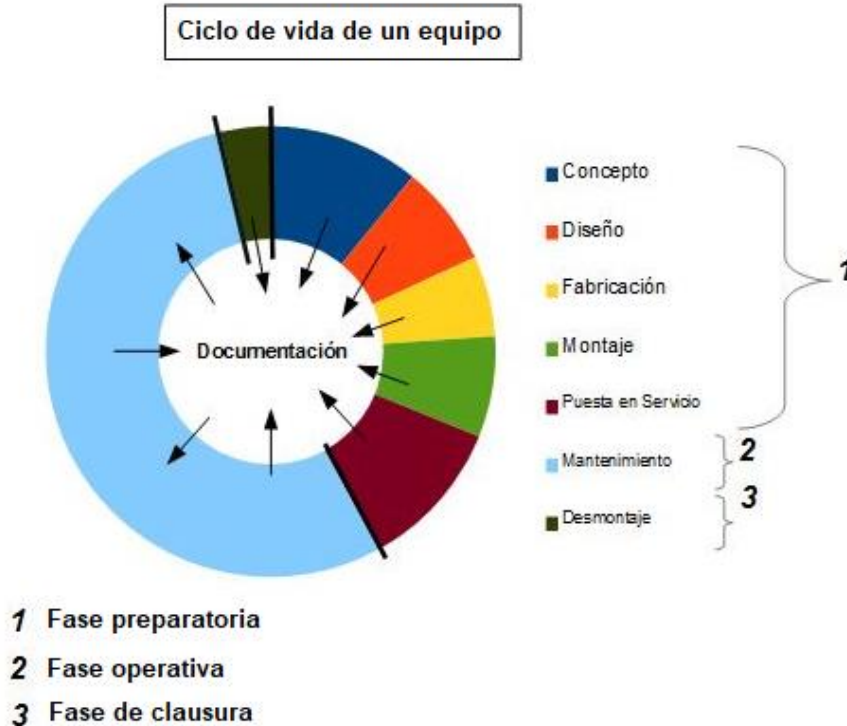


Figura 16. Ciclo de vida de un equipo.

Fuente: García (s.f.).

Los materiales de las embarcaciones son reciclados al final de la vida útil, sin embargo, el desguace ilegal en países como India, Bangladesh o Pakistán se convierte en una problemática medioambiental. El 75% de la contaminación por hidrocarburos en los mares proviene de esta actividad ilícita; se estima que el desguace de un solo barco carguero vierte en los mares alrededor de 40000 litros de aceite (RECUPERA, 2016).

Si se efectúa un análisis sobre el impacto en cada una de las fases de vida útil de la embarcación, podría visualizarse de manera más directa dónde el cambio de tecnología a propulsión eléctrica puede presentar una mejora sustancial en materia ambiental. La siguiente figura muestra el análisis realizado para una embarcación de pasajeros de 30 metros de largo.

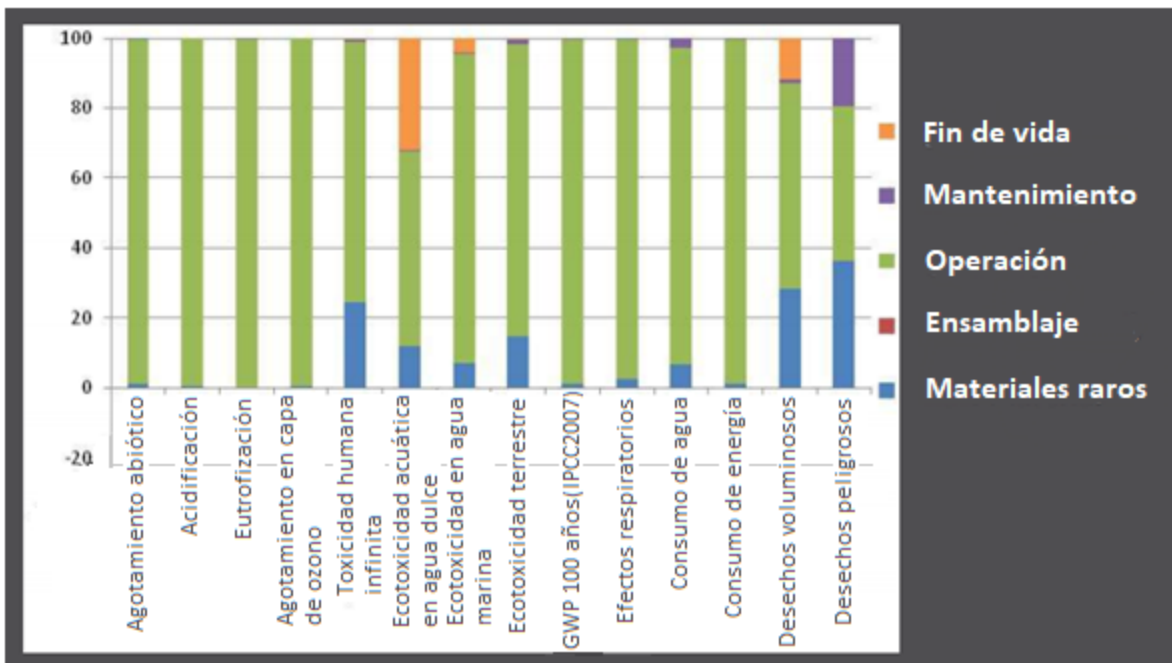


Figura 17. Impacto en cada fase del ciclo de vida útil de un vehículo.

Fuente: Tincelin.

Esta comparación se puede realizar de manera separada para cada una de las fases, a fin de lograr una visualización más directa del impacto generado.

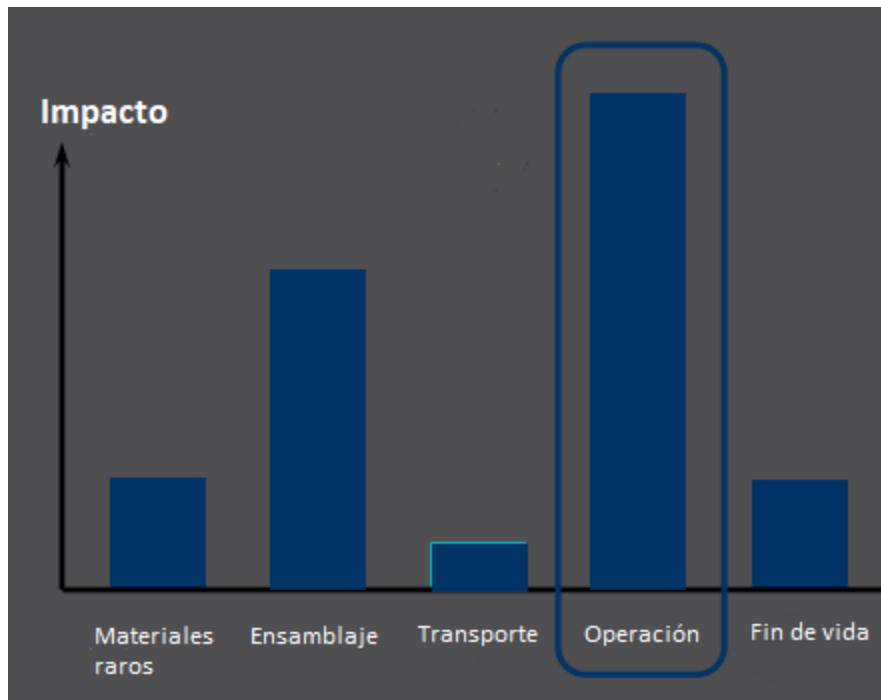


Figura 18. Impacto en cada fase del ciclo de vida útil de un vehículo.

Fuente: Tincelin.

De acuerdo con las dos figuras anteriormente presentadas, es posible observar que el mayor impacto ambiental se generaría durante la fase de operación de la embarcación si esta fuese con sistema propulsor diésel, como es lo habitual.

En este sentido, el consumo de combustible en la fase de operación es, sin duda, el rubro principal. Como se mencionó antes, según la Organización Marítima Internacional, los astilleros deben trabajar en reducir hasta en un 50% el índice EEDI, el cual se refiere a eficiencia energética. Sin embargo, se debe tener especial cautela, pues como se muestra en la figura siguiente, durante la búsqueda de mayores eficiencias para reducir el impacto en la fase operativa con motores de combustión interna, se podría incurrir en el aumento del impacto en los otros eslabones de la cadena.

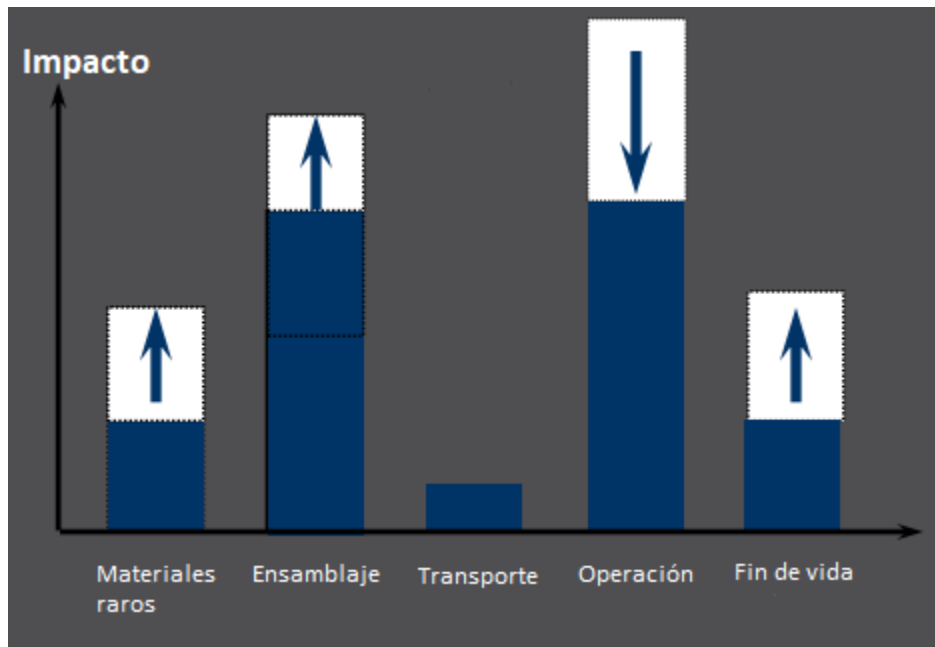


Figura 19. Relación de variación de impacto en ciclo de vida de un vehículo.

Fuente: Tincelin.

Debido a que el impacto ambiental ya es un tema ampliamente discutido en vehículos eléctricos terrestres, y dado el hecho de que, en esencia, un barco –con las diferencias del caso– sigue siendo un vehículo, puede recurrirse a los estudios en coches para fundamentar lo que podría ocurrir en embarcaciones. Si se estudian las mismas fases de vida útil haciendo la analogía entre embarcaciones y coches, se obtiene lo siguiente:

### 7.1 Fase preparatoria

Para el uso con tracción eléctrica se necesitará mayor cantidad de cobre, tanto en motor como en baterías, que la usada en un vehículo convencional de combustión interna, además, potencialmente, el uso de níquel y tierras raras, materiales que requieren una intensiva energía para su extracción y procesado en la construcción de baterías y del mismo motor.

En cuanto al cuerpo y demás sistemas, no tienen por qué existir muchas diferencias en el uso de una tecnología u otra, aunque, en algunas ocasiones, durante la búsqueda de aligerar peso y aumentar autonomía se utilizan materiales más

livianos, pero esta es una práctica que también podría utilizarse en vehículos de combustión interna, para aumentar eficiencia.

Los efectos del impacto ambiental suelen ser desglosados según los diferentes equipos, en particular más en la producción de la batería y la producción del resto del vehículo.

En cuanto a la batería, según EEA (2018), se estima que solo la extracción y el procesamiento de materiales raros aporta el 20% del total de emisiones de gases de efecto invernadero en la cadena de producción de la batería, que en total resulta entre un 33 y un 44% de las emisiones totales en la etapa de producción. La producción del motor eléctrico genera entre un 7 u 8% del total de emisiones, por el alto contenido de cobre y aluminio, los componentes del tren de transmisión producen entre un 16 y un 18%, y el resto de la estructura, un 35%.

Si se habla de impactos en la salud, EEA (2018), indica que el potencial impacto por toxicidad en humanos es entre 2,2 y 3,3 veces mayor en la producción de vehículos eléctricos que en la producción de vehículos de combustión interna, esto asociado con los efectos de la minería y el procesado de metales como cobre y níquel.

Desde el punto de vista de ciclo de vida, las emisiones de gases de efecto invernadero en la fase de producción de vehículos eléctricos son mayores que en la fase de producción de vehículos de combustión interna. En la siguiente figura se pueden corroborar los datos anteriores.

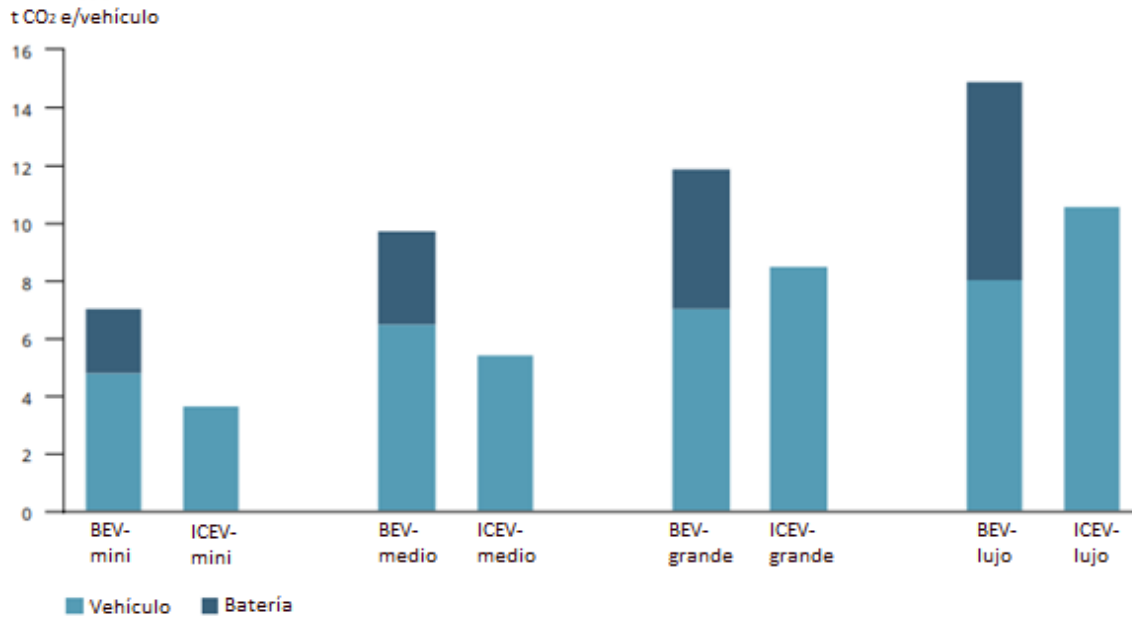


Figura 20. Impacto en la producción de diferentes tipos de vehículo eléctrico.

Fuente: EEA (2018).

Como anteriormente se mencionó, la comparación presentada es sobre vehículos terrestres, pero bien puede hacerse la analogía con un barco. A partir de esos datos, la conclusión es que producir un vehículo eléctrico emite entre 1,3 a 2 veces más toneladas de CO<sub>2eq</sub> que producir uno de combustión interna (EEA, 2018). Promediando los datos mostrados, e hipotetizando que en embarcaciones se presenta el mismo comportamiento, se asumirá como postura que en la etapa de fabricación se producen 1,65 veces más emisiones en un barco eléctrico que en uno de combustión interna, lo cual concuerda con lo dicho por Tincelin en la Figura 19: en la búsqueda de reducir los efectos en la fase de operación se aumenta el impacto en la fase de preparación.

## 7.2 Fase operativa

Según EEA (2018), en el análisis de los ciclos de vida se demuestra que aún con los altos requerimientos energéticos en la producción de vehículos eléctricos, el impacto de la energía consumida en la conducción es mucho mayor que el impacto en la producción, por lo cual es el aspecto dominante en el análisis de impacto en el ciclo de vida.

El impacto total producido para un vehículo será calculado como el impacto por kilómetro multiplicado por el número de kilómetros recorridos durante un periodo de tiempo determinado. Si bien es cierto un vehículo eléctrico no produce un impacto por gases de escape durante la fase operativa, sí se producen otros impactos de efecto colateral que vienen dados por las fuentes de generación de la energía, las características del vehículo, la forma en que se conduce, el relieve y los patrones de carga (EEA, 2018).

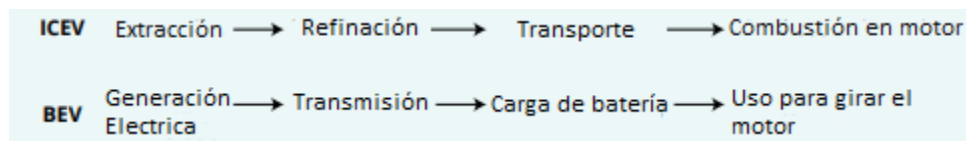


Figura 21. Cadena de impacto de los vehículos.

Fuente: EEA (2018).

De manera general, según EEA (2018), los factores de los cuales depende el impacto de un vehículo son: la energía requerida en la conducción y las emisiones de gases de efecto invernadero por cada unidad de esa energía requerida. Además, se debe considerar que los vehículos eléctricos teóricamente son más eficientes que los de combustión interna, los vehículos eléctricos son capaces de convertir en movimiento entre el 70-90% de la potencia suministrada, mientras en los vehículos de combustión interna el pico teórico de eficiencia ronda el 40%.

#### 7.2.1 Operación del barco con sistema auxiliar eléctrico

Si se toma el caso del velero con motores auxiliares eléctricos capaces de recargar las baterías mientras navega a vela, se elimina el factor de impacto por la generación de energía en centrales, por lo que en la fase de operación el nivel de impacto será cero; pero se debe tomar en cuenta el combustible requerido por los botes auxiliares.

Como se observó en secciones anteriores, el consumo total anual de combustible fósil en la operación del velero eléctrico CEIBA, correspondiente al rubro por los botes auxiliares que debe transportar a bordo es de \$1 800 anuales. Al ser pequeños botes auxiliares que generalmente utilizan motores fuera de borda, por el

tipo de motor, lo que se emplea es gasolina. Según ARESEP (2020), el precio internacional de la gasolina ronda los \$65 por barril, o sea, \$0,41 aproximado (asumiendo que utilicen gasolina).

$$\$ 1 800 \times \frac{1 l}{\$ 0,41} \times \frac{1 m^3}{1000 l} \times \frac{700 kg}{1 m^3} \approx 3073 kg \approx 3,073 toneladas$$

También se debe incorporar el dióxido de carbono que en algún momento se emitió por la producción de paneles solares; si bien este rubro corresponde a la fase de preparación, como se verá, también es posible introducirlo en este apartado.

Se constató que se planea incorporar, en total, 70 m<sup>2</sup> de paneles solares, los cuales son capaces de producir hasta 84 kWh por día. La Organización de las Naciones Unidas estima que la huella de carbono asociada a paneles solares fotovoltaicos corresponde a hasta 32 g/kWh (ONU), donde para estimar la cantidad de kWh es necesario realizar el cálculo para la vida útil. Para una vida útil de veinticinco años en total, se producirán 766 500 kWh, lo cual indica que durante el proceso de extracción y fabricación del panel solar hay asociado un total de 24,53 toneladas de dióxido de carbono. Si este rubro se calcula únicamente para un año, es posible asociarlo con la etapa operativa, como si se tratara de una amortización del dióxido de carbono que se produjo para fabricarlo; de esta manera, si se divide el dato de 24,53 toneladas entre los veinticinco años de vida útil de los paneles, sería válido decir que por cada año de uso se debe adjuntar 0,98 toneladas al rubro de emisiones por concepto de operación del barco con sistema auxiliar eléctrico.

Para el caso de CEIBA, con motor auxiliar eléctrico se tendría únicamente el rubro por las emisiones de los botes auxiliares, más el rubro correspondiente a paneles solares que se calculó anteriormente.

$$3,07 t gasolina \times \frac{1000 kg gasolina}{1 t gasolina} \times \frac{1 m^3 gasolina}{700 kg gasolina} \times \frac{1000 l}{1 m^3} \times \frac{2,231 kg CO_2}{1 l gasolina} \approx 9 784 kg CO_2$$

En total se tendrían 10,764 toneladas de CO<sub>2</sub> sumando el rubro por emisión de los paneles solares.



### 7.2.2 Operación de barco con sistema auxiliar diésel

Para el caso comparativo de un velero de iguales características pero con motor auxiliar de combustible fósil, a fin de conocer el impacto por emisiones, se obtendrá el consumo total de combustible a un año de operación; para ello, se tomará como base el consumo de combustible aproximado para cada tipo de embarcación en función del arqueado bruto (GT) que indica MEET (1999).

Para el caso de CEIBA; si se utilizara combustible fósil, habría que sumar el rubro de combustible consumido por el barco más el combustible consumido por los botes auxiliares:

$$185,02 \text{ toneladas diésel} + 3,07 \text{ toneladas de gasolina}$$

Con este dato de consumo, ahora es posible convertir por medio de factores que pueden ser encontrados en el MEET, o, como se utilizarán en este caso, valores consultados en IMN (2019), en donde se estima que por cada litro de diésel consumido se emiten 2,613 kg de CO<sub>2</sub> al ambiente, y para la gasolina, un estimado de 2,231 kg CO<sub>2</sub> por litro consumido. Realizando las conversiones pertinentes, se podrá presentar un estimado de las toneladas de CO<sub>2</sub> que se emiten anualmente.

$$185,02 \text{ t diésel} \times \frac{1000 \text{ kg diésel}}{1 \text{ t diésel}} \times \frac{1 \text{ m}^3 \text{ diésel}}{850 \text{ kg diésel}} \times \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{2,613 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ l diésel}} \approx 568 \text{ 773 kgCO}_2$$
$$3,07 \text{ t gasolina} \times \frac{1000 \text{ kg gasolina}}{1 \text{ t gasolina}} \times \frac{1 \text{ m}^3 \text{ gasolina}}{700 \text{ kg gasolina}} \times \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{2,231 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ l gasolina}} \approx 9 \text{ 784 kgCO}_2$$

Tal y como se observa, al hacer la sumatoria se obtiene un estimado de 578 557 kilogramos de CO<sub>2</sub>, es decir, si se utilizara un motor auxiliar con diésel como combustible, se emitiría anualmente a la atmósfera un total aproximado de 578,5 toneladas de dióxido de carbono.

Si se compara con las emisiones del barco usando sistema auxiliar eléctrico, el uso de motor diésel en la fase operativa representa emitir 567, 8 toneladas más de CO<sub>2</sub> a la atmósfera; en otras palabras, operar un velero con motor diésel emite 53,8 veces más CO<sub>2</sub> que operar un velero con motor auxiliar eléctrico y capacidad regenerativa.

Realizando una comparación de los números obtenidos para las emisiones proyectadas únicamente en la fase operativa por un año de uso, se observa:

Tabla 27. Estimación de emisiones de CO<sub>2</sub> en fase operativa.

Tipo de propulsión	Toneladas de CO <sub>2</sub>
Diésel	578,5
Asistencia eléctrica	10,764
<b>Diferencia</b>	<b>567,8</b>

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Word.

Esta diferencia se presenta en forma gráfica en la Figura 22. Cabe aclarar que esta diferencia obtenida se debe a que, para el sistema asistido por motores eléctricos, la principal fuente de potencia es el viento mediante las velas; para un sistema completamente eléctrico sería necesario obtener un factor de emisión por concepto de la energía utilizada para la producción eléctrica, por parte de quien venda la energía de ese tipo.

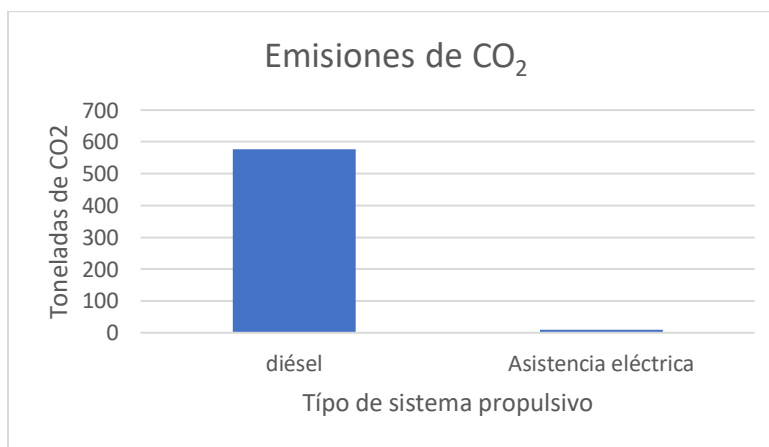


Figura 22. Emisiones de CO<sub>2</sub> en fase operativa.

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel.

### 7.3 Fase de clausura

En esta fase uno de los puntos importantes es la correcta disposición de los materiales utilizados. Entre los aspectos que más preocupan se encuentra la disposición de las baterías utilizadas, pues dar un segundo uso a las baterías en

otras aplicaciones contribuye enormemente a reducir la explotación de materiales raros.

Al momento de pensar en adquirir un vehículo eléctrico, se genera incertidumbre sobre la vida de la batería y la correcta disposición de esta. Según datos de la empresa GEOTAB, en un estudio realizado en 6 300 vehículos eléctricos, la capacidad de las baterías se degrada un 2,3% anual. Para todas las marcas estudiadas, en promedio, la degradación correspondiente se muestra en la figura que sigue.

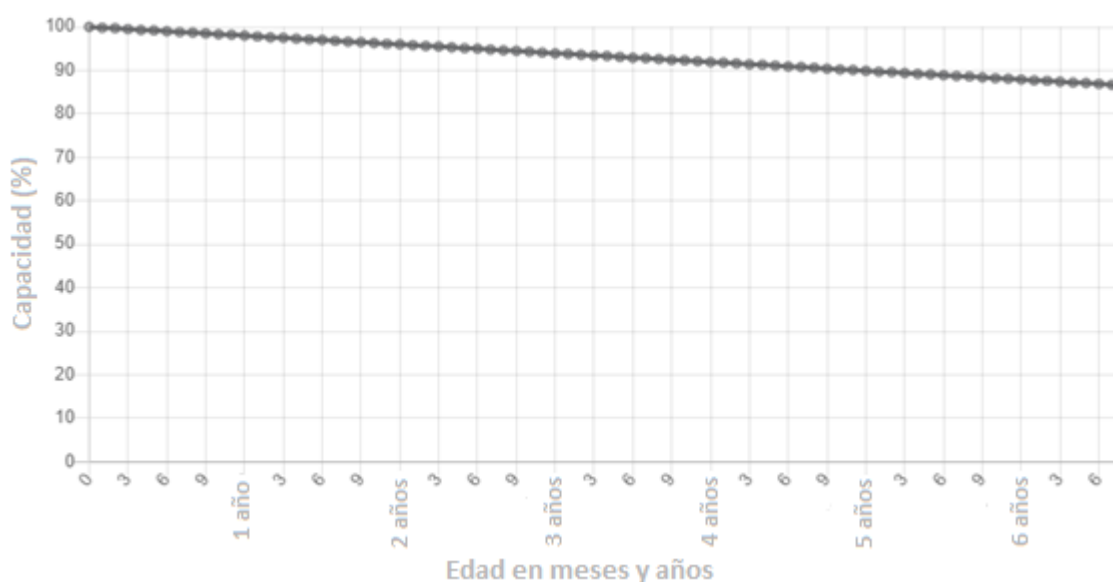


Figura 23. Degradación de una batería con el paso de los años.

Fuente: GEOTAB.

Según EEA (2018), visto por separado, la etapa final del ciclo de vida es la que representa el menor impacto, aunque juega un papel importante al reducir el impacto ambiental del ciclo de vida total, por lo realizado en otras etapas anteriores.

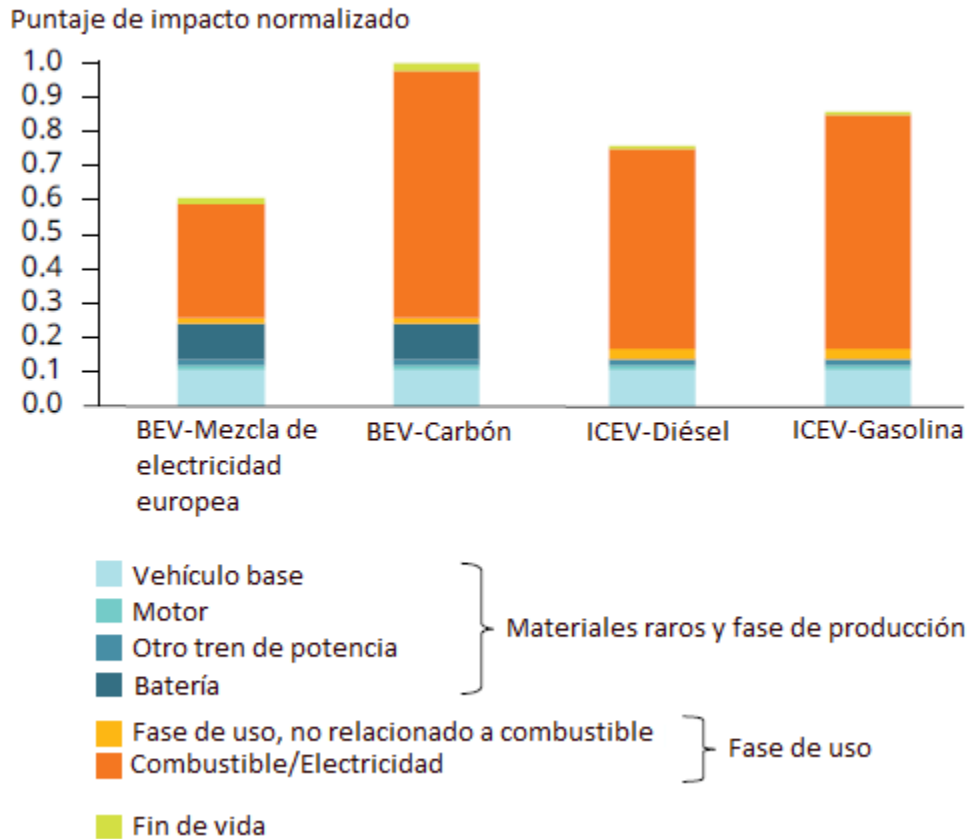


Figura 24. Impacto de diferentes tipos de vehículos.

Fuente: EEA (2018).

En la figura anterior se puede observar cómo el impacto en el fin de la vida útil solo representa una mínima parte de las emisiones del ciclo total de un vehículo –ya sea eléctrico o diésel–, lo cual puede también presentar el mismo patrón para una embarcación. Un análisis exhaustivo de este rubro respecto del rubro por operación arrojaría resultados casi despreciables en cuanto a peso por emisiones, por lo que se presentarán únicamente recomendaciones sobre la correcta disposición. Antes de pasar a ese punto, se presenta una comparación entre las emisiones utilizando ambos sistemas. En la Figura 24 es importante notar que el alto índice por emisiones de los vehículos eléctricos corresponde al método utilizado para generar la electricidad, no del todo renovable.

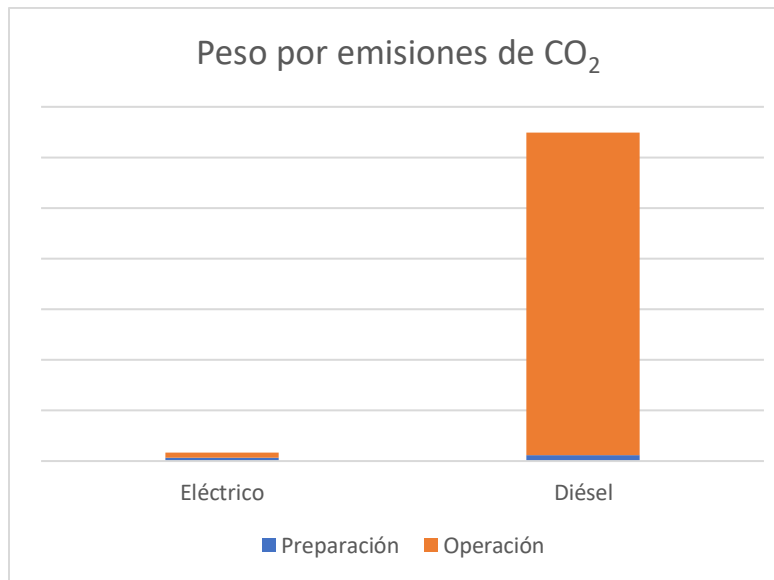


Figura 25. Comparación de peso por emisiones de CO<sub>2</sub>.

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel.

#### 7.4 Disposición

La industria del reciclaje de componentes de vehículos eléctricos es algo que aún no termina de fortalecerse, pues la misma industria del auto eléctrico está aún en desarrollo; por otro lado, la cantidad de vehículos que han concluido el ciclo de vida útil no es lo suficientemente grande para hacerlos atractivos, además de esto, se espera que las baterías duren todo el ciclo de vida útil del vehículo (entre ocho y diez años en autos), y luego pueda ser utilizada en almacenamientos de energía. Según se aprecia en la Figura 23, a los diez años, una batería, en promedio, está en un 75% de su capacidad inicial (EEA, 2018).

Un barco de madera, con los cuidados necesarios, puede operar por más de cien años, los paneles solares pueden operar por hasta treinta años, el equipo más sensible en la electrificación de esta embarcación es la batería, cuya vida útil depende de la elección inicial al realizar la compra. De acuerdo con SPBES (2019), para la sección del análisis económico se eligió una batería con una vida útil de cinco años, por lo que en este apartado se utilizará ese mismo supuesto. Cuando se deban reemplazar los paneles solares se habrá requerido el cambio de batería unas seis veces, por ello, el análisis se basará en la disposición de las baterías.

Correcta disposición: Una vez que la batería se encuentre en niveles inaceptables de carga, no es estrictamente necesario deshacerse de ella, el reuso directo, el reuso en cascada y, por último, el reciclaje son aspectos que se deben tomar en cuenta –en ese orden– para aprovechar al máximo el recurso ya explotado.

El reuso directo en una batería tan grande como la de una embarcación es un método sumamente atractivo y posible con modelos actuales en el mercado, y permiten reinsertar el conjunto al mercado de las baterías. Por otra parte, modelos actuales de baterías marinas permiten desacoplar y acoplar las celdas, como si se tratara de piezas de LEGO, pudiendo así remover las celdas en mal estado y dando una nueva vida a la batería removiendo solo pequeñas cantidades de material o, incluso, en el peor de los casos, remover todas las celdas y aprovechar toda la estructura, tal como lo describe el modelo CellSwap de la casa SPBES, el cual se promociona como una batería para barcos con rendimiento garantizado de por vida (SPBES, 2019).

La reutilización en cascada también es un método recomendado para dar una segunda vida a las baterías de vehículos eléctricos. Utilizarla como unidad de almacenamiento en pequeños proyectos de energía renovable puede aumentar la vida de la batería en un 72%, según EEA (2018). SAILCARGO no solo contempla el desarrollo del proyecto CEIBA, sino que está muy comprometido con el desarrollo de una zona socialmente vulnerable. Como parte del proyecto de responsabilidad social, se creó la asociación Astillero Verde, la cual es administrada de manera conjunta con SAILCARGO INC. En esta asociación se ofrece a los vecinos, quienes en su mayoría se dedican a labores de pesca en el Golfo de Nicoya, talleres sobre fabricación de botes y navegación con energía limpia, como la vela. Con el uso de baterías modulares, cuyas celdas pueden ser conectadas en serie para obtener el voltaje deseado, y en paralelo para obtener una capacidad de carga adecuada (SPBES, 2019), es posible también pensar que estas celdas, diseñadas desde el principio para uso marino, puedan ser utilizadas para propulsar pequeñas embarcaciones de pesca responsable, lo cual no solo reduciría el impacto producido

por los contaminantes motores fuera de borda de combustión interna, sino también ofrece la posibilidad de ahorro en facturación energética para los pescadores.

Reciclaje: este proceso en las baterías industriales generalmente involucra operaciones como: separación mecánica, pirometalurgia, hidrometalurgia. Es común que estos equipos contengan metales raros, difíciles de conseguir y extraer, por lo que el reciclaje representa grandes beneficios respecto de la explotación minera. En cuanto al motor eléctrico, el reciclaje de los imanes puede reducir hasta en un 96% la contaminación en relación con la producción de nuevos imanes con material virgen (EEA, 2018).

## 8 Capítulo VIII. Captura de datos futuros

---

### 8.1 Generalidades

Un sistema de captura de datos puede ser tan complejo o simple según las necesidades que se deseen resolver; de igual manera, están relacionados el costo, las licencias necesarias y las instalaciones requeridas.

La idea del sistema de captura de datos responde a la necesidad de contar con resultados cuantificables sobre la capacidad de operación del barco, con el fin de demostrar que es un modelo viable.

Un sistema simple se puede componer de la captura de datos de velocidad, de la posición y de la potencia, sea esta consumida o regenerada.

Uno de los aspectos que más genera expectativas es el sistema regenerativo por medio de las hélices. Debido a lo anterior, inicialmente se propondrá un sistema simple que obtenga datos de velocidad, posición, fecha y hora del dato tomado, así como de voltaje y corriente en una de las líneas de alimentación del generador.

Realizar estas mediciones es una tarea que demanda pocos recursos. Por razones de costos y licencias, se propone un sistema básico con Arduino.

### 8.2 Equipos necesarios

Los equipos necesarios para llevar a cabo esta labor se enumeran a continuación.

Placa Arduino UNO: Es una placa electrónica versátil, cuenta con 14 entradas/salidas digitales, 6 entradas analógicas, conexión a 5V, puertos serie para transferencia de datos, entre muchas otras aplicaciones (Díaz, 2016).





Figura 26. Placa Arduino UNO.

Fuente: Google Imágenes.

Módulo GPS NEO 6: Su voltaje de alimentación es de 5 V, sensible y preciso que se adapta muy bien a los requerimientos planteados.

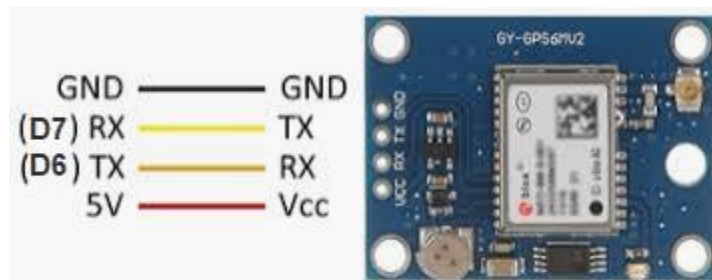


Figura 27. Módulo GPS.

Fuente: Google Imágenes.

Medidor de corriente SCT045R: Soporta hasta 600 A con una salida de voltaje de 0,33 V, es un sensor de corriente del tipo no invasivo, ya que no es necesaria la conexión física con el cable que transporta la corriente por medir; la medición se lleva a cabo por inducción electromagnética. De este sensor salen dos cables de conexión, el cable negro se conecta a la patilla GND y el blanco al pin A0 del Arduino.

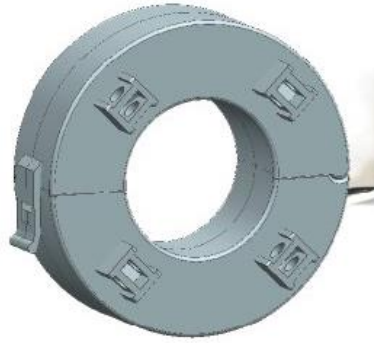


Figura 28. Sensor de corriente.

Fuente: Google Imágenes.

Medidor de voltaje ZMPT101B: Tiene incorporado un transformador que le permite hacer lecturas de voltajes de hasta 220 V con una salida de hasta 5 V; lo cual cae dentro del rango de medición en Arduino. En los pines del sensor de la figura se muestra la dirección de pin que se debe conectar en el Arduino.



Figura 29. Sensor de voltaje.

Fuente: Google Imágenes.

Fuente de alimentación de 5 V MDR-10-5 MEAN WELL: se utiliza para alimentar la placa Arduino.



Figura 30. Fuente de voltaje de 5 V DC.

Fuente: Google Imágenes.

Modulo SD card: Debido a la poca memoria que ofrece la placa Arduino UNO, es necesario introducir un módulo SD para almacenar los datos medidos por los sensores, como si se tratara de un *datalogger*.

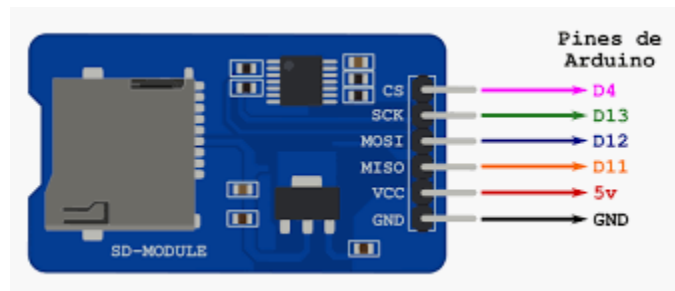


Figura 31. Módulo memoria SD.

Fuente: Google Imágenes.

Caja con tapa hermética: Todos los equipos anteriormente mencionados para el sistema de captura de datos son de tipo electrónico, son delicados y no se encuentran protegidos contra agua u otros contaminantes, por lo que una buena práctica es encapsular todos esos equipos en una caja con algún grado de

protección frente al ambiente. En este caso, se recomienda un grado de protección IP65 –similar a la de la imagen mostrada–, por la humedad y salinidad del mar.



Figura 32. Caja hermética.

Fuente: Google Imágenes.

### 8.3 Funcionamiento

Según Campbell Scientific, un registrador de datos o *datalogger* “es el corazón de una estación de medida” (CampbellScientific, 2020), que mide las señales a una velocidad de muestreo definida. En este caso, se trató de emular ese trabajo por medio de la placa Arduino UNO, pero, debido a la limitación de memoria que posee esta placa, se hace necesario incluir una memoria que permita la correcta captura de datos. Al ser viajes largos, en los cuales según la frecuencia de muestra se podrían capturar millones de datos, se programó de manera que realice una impresión en un fichero –creado en la memoria– sobre los parámetros medidos cada diez minutos. El código de programación se puede observar en el Anexo segundo. La placa Arduino se encargará de abrir el fichero cada diez minutos, e imprimir en el archivo creado los datos que entrega el módulo GPS en un código tipo GPRMC, así como el dato de corriente y voltaje; del mismo módulo GPS es posible tomar la fecha y hora de lectura.

## 8.4 Inversión en equipos para captura de datos

Generalmente, este tipo de componentes se pueden conseguir de manera fácil a través de tiendas en internet, por lo que se consultarán los precios en Amazon para estimar el valor del sistema de adquisición de datos. Los precios sugeridos no incluyen gastos de envío.

Tabla 28. Costos de sistema de adquisición de datos.

<b>Equipo</b>	<b>Precio dólares</b>
<b>Placa Arduino UNO</b>	23
<b>Módulo GPS</b>	13,49
<b>Medidor de corriente</b>	25
<b>Medidor de voltaje</b>	6,73
<b>Fuente 5V</b>	19,22
<b>Módulo SD</b>	10
<b>Caja</b>	50
<b>Total</b>	147,44

Fuente: Elaboración propia con datos de Amazon.

## 9 Capítulo IX. Conclusiones

---

1. Por medio del análisis económico realizado se constató que a pesar de los altos costos en inversión inicial que conlleva la implementación del sistema auxiliar eléctrico, con el paso de los años el ahorro en combustible respecto de un barco de iguales características pero con motor diésel, lo vuelven una alternativa más atractiva.
2. Desde el punto de vista técnico, se puso en estudio la capacidad regenerativa del sistema auxiliar, tanto de manera teórica como por medio de *software*. Se observó que es posible regenerar hasta 23 kW de energía eléctrica a una velocidad de 3,09 m/s.
3. Mediante el análisis desde el punto de vista ambiental se concluyó que, aunque las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la fabricación de un barco eléctrico serían mayores respecto de uno de combustión interna por el tema de mayor explotación de metales y tierras raras, las emisiones en la fase operativa de un barco de combustión interna alcanzan números muy elevados; incluso para un equipo auxiliar como el utilizado en la comparación, lo que vuelve casi despreciables los datos de emisiones por fabricación.
4. Para la adquisición de datos con los cuales se pueden poner a prueba los resultados teóricos obtenidos en este estudio, se requiere un sistema básico de bajo coste. Otros equipos, como las baterías, podrían traer su propio sistema de monitoreo; por lo que se podría integrar más de un sistema a fin de demostrar la utilidad de la embarcación.

## 10 Capítulo X. Recomendaciones

---

1. Se recomienda ser cauteloso con el sistema regenerativo de las hélices de paso variable, en cuanto a no exigirlo de más cuando se alcanzan velocidades importantes, pues las fuerzas que se presentan en las palas se transmiten por los árboles a las bocinas, y de estas a los sistemas de amarres y velas, por lo que pueden provocar ruptura en algún elemento.
2. Se debe tener prudencia para no utilizar de más los equipos de alta demanda energética, como los motores, ya que estos, en poco tiempo, pueden consumir la carga de la batería en caso de no contar con un sistema aislado que asegure energía a equipos esenciales.

## 11 Bibliografía

---

- Al-Falahi, M. D., S, N. K., Jayasinghea, S. D., & Enshaei, H. (2018). Power management optimization of hybrid power systems in electric ferries. *Energy Conversion and Management*, 172, 50-66. Recuperado el 12 de 3 de 2020, de <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.itcr.ac.cr/science/article/pii/S0196890418307362>
- Aranda, A., & Zabalza, I. (2010). *Ecodiseño y análisis de ciclo de vida*. España. Recuperado el 6 de 4 de 2020, de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=xFQgktQ6S8EC&oi=fnd&pg=PA1&dq=el+ciclo+de+vida+%C3%BAtil+de+un+equipo+&ots=JdbfzqKmzx&sig=4D3zXUQMaFM7PrbsvgLFgSMouB0#v=onepage&q=el%20ciclo%20de%20vida%20%C3%BAtil%20de%20un%20equipo&f=false>
- ARESEP. (2020). *Precios promedios FOB semanales de los productos terminados*. Recuperado el 23 de 4 de 2020, de <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrjoiN2I1YjUwNzktZGE5My00MGU2LWJmNDctZGNI MzJjZWZMGJkliwidCI6IjBkNzIzOGY4LWI3ODQtNDk2MC1iZGUyLTZIMzM1MwQyNDcwZC IslmMiOjR9>
- Bauer, G., & Robertson, L. (1905). *Marine Engines and Boilers their desing and construction*. New York: NORMAN W. HENLEY PUBLISHING CO.
- Baumuelller. (2014). *Baumuelller services*. Recuperado el 30 de 4 de 2020, de <https://www.baumueller-services.com/de/downloads/motors/send/3-doc-motors/168-dst2-135-400-en>
- Bhardwaja, S., Bhattacharya, S., Tang, L., & Howell, K. E. (2019). Technology introduction on ships: The tension between safety and economic. *Safety Science*, 115, 329-338. Recuperado el 22 de 4 de 2020, de <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.itcr.ac.cr/science/article/pii/S0925753518301772>
- Cabarcos, X. (2018). *Diseño de la línea de ejes de un buque de última generación*. Recuperado el 30 de 4 de 2020, de [https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/21186/CabarcosPena\\_Xurxo\\_TFM\\_2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/21186/CabarcosPena_Xurxo_TFM_2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- CampbellScientific. (2020). Recuperado el 24 de 7 de 2020, de <https://www.campbellsci.es/faqs?v=1>
- Canales, R. (2015). Criterios para la toma de desición de inversiones. *REICE*. Recuperado el 20 de 3 de 2020, de <https://revistacienciaseconomicas.unan.edu.ni/index.php/REICE/article/view/74>



- Caterpillar. (2020). *cat.com*. Recuperado el 12 de 6 de 2020, de [https://www.cat.com/en\\_GB/products/new/power-systems/marine-power-systems/auxiliary-engines/18501365.html](https://www.cat.com/en_GB/products/new/power-systems/marine-power-systems/auxiliary-engines/18501365.html)
- Centro de conocimiento de la industria marítima. (2013). Recuperado el 27 de 3 de 2020, de <https://www.maritimeinfo.org/es/Maritime-Directory/a-ships-life-es-b6b21454802911e2bc480013721274c6>
- Cómo elegir la potencia de motor para un velero*. (s.f.). Recuperado el 12 de 5 de 2020, de [Maniobradebuques.com](https://www.maniobradebuques.com/): <https://www.maniobradebuques.com/pdf/Como%20elegir%20la%20potencia%20de%20motor%20para%20un%20velero2.pdf>
- CYPE\_Ingenieros. (s.f.). *Generador de precios*. Recuperado el 12 de 5 de 2020, de [http://www.generadordeprecios.info/obra\\_nueva/Instalaciones/IC\\_Calefaccion\\_\\_climatizacion\\_y\\_A/Combustible\\_liquido/ICD125\\_Deposito\\_de\\_combustible\\_liquido\\_\\_de\\_0\\_0\\_0\\_0\\_11\\_0\\_0.html](http://www.generadordeprecios.info/obra_nueva/Instalaciones/IC_Calefaccion__climatizacion_y_A/Combustible_liquido/ICD125_Deposito_de_combustible_liquido__de_0_0_0_0_11_0_0.html)
- Dhillon, B. (2002). *Engineering Maintenance a modern approach*. CRC Press. Recuperado el 8 de 4 de 2020, de [http://site.iugaza.edu.ps/sabdelall/files/2010/02/Engineering\\_Maintenance\\_a\\_modern\\_approach.pdf](http://site.iugaza.edu.ps/sabdelall/files/2010/02/Engineering_Maintenance_a_modern_approach.pdf)
- Díaz, J. (2016). *MiArduino*. Recuperado el 13 de 7 de 2020, de <http://www.iescamp.es/miarduino/2016/01/21/placa-arduino-uno/>
- Duarte, C. (2018). El protocolo de Kioto: ¿Logro o fracaso? Recuperado el 31 de 3 de 2020, de [https://www.elespanol.com/ciencia/20180105/protocolo-kioto-logro-fracaso/272842718\\_12.html](https://www.elespanol.com/ciencia/20180105/protocolo-kioto-logro-fracaso/272842718_12.html)
- Echeverría, A. (s.f). *Obtención de energía a partir de las corrientes marinas*. Madrid. Recuperado el 16 de 4 de 2020, de [http://oa.upm.es/49272/1/TFG\\_%20ALVARO\\_ECHEVERRIA\\_CABODEVILLA.pdf](http://oa.upm.es/49272/1/TFG_%20ALVARO_ECHEVERRIA_CABODEVILLA.pdf)
- EEA. (2018). *Vehículos eléctricos desde el ciclo de vida y las perspectivas de la economía circular*. Recuperado el 21 de 4 de 2020, de <https://www.eea.europa.eu/publications/electric-vehicles-from-life-cycle>
- Euronews. (2019). Ellen el primer gran ferry eléctrico del mundo. Recuperado el 15 de 3 de 2020, de <https://es.euronews.com/2019/11/25/ellen-el-primer-gran-ferry-electrico-del-mundo>
- García Posada, S. (2002). Estudio del comportamiento de una hélice de paso variable como propulsor de un buque de carga a granel en condiciones dentro y fuera de diseño. Barcelona. Recuperado el 10 de 4 de 2020, de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/25510>
- García, R. (s.f.). *Ingeniero Marino*. Recuperado el 20 de 4 de 2020, de [https://ingenieromarino.com/mantenimiento-del-buque1oparteintroduccion-al-plan-de-mantenimiento/#11-Ciclo\\_de\\_vida\\_de\\_un\\_equipo\\_o\\_instalacion](https://ingenieromarino.com/mantenimiento-del-buque1oparteintroduccion-al-plan-de-mantenimiento/#11-Ciclo_de_vida_de_un_equipo_o_instalacion)

- GEOTAB. (s.f.). *EV Battery Degradation Comparison Tool*. Recuperado el 23 de 4 de 2020, de <https://storage.googleapis.com/geotab-sandbox/ev-battery-degradation/index.html>
- Gueorguiev Iordanov, S., & Millet i Biosca, L. (2014). *Estudio de la viabilidad de la propulsión eólico-eléctrica de una embarcación tipo RC Sailing Challenge (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya)*. Recuperado el 27 de 4 de 2020, de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/24663/Mem%C3%B2ria.pdf>
- Gunnarsson, G., Skúlason, J., Sigurbjarnarson, Á., & Enge, S. (2016). Regenerative electric/hybrid drive train for ships. *NORDIC INNOVATION*. Recuperado el 27 de 4 de 2020, de <https://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:1294665/FULLTEXT01.pdf>
- IMN. (2019). *Factores de emisión de gases de efecto invernadero*. Recuperado el 24 de 4 de 2020, de <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/factores-de-emision-gei-noveno-edicion-2019/>
- IMO. (s.f.). *Organización Marítima Internacional*. Recuperado el 15 de 4 de 2020, de <http://www.imo.org/es/About/Conventions/ListOfConventions/Paginas/International-Convention-on-Tonnage-Measurement-of-Ships.aspx>
- Lapko, A. (2016). The Use of Auxiliary Electric Motors in Boats and Sustainable Development of Nautical Tourism – Cost Analysis, the Advantages and Disadvantages of Applied Solutions. *Transportation Research Procedia*, 16, 323-328. Recuperado el 2 de 3 de 2020, de <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.itcr.ac.cr/science/article/pii/S2352146516306457>
- Manderbacka, T. T. (2019). An overview of the current research on stability of ships and ocean vehicles. *Ocean Engineering*, 186. Recuperado el 27 de 3 de 2020, de <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.itcr.ac.cr/science/article/pii/S0029801819302914>
- MEET. (99). *METHODOLOGY FOR CALCULATING TRANSPORT EMISSIONS*. TRANSPORT RESEARCH LABORATORY. Recuperado el 5 de 3 de 2020, de <https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/meet.pdf>
- MINAE. (2019). *Plan Nacional de Descarbonización*. Recuperado el 5 de 3 de 2020, de <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/02/PLAN.pdf>
- Motorpasion. (s.f.). Barcos eléctricos X Shore. Recuperado el 10 de 12 de 2019, de <https://www.motorpasion.com/otros/barcos-electricos-x-shore-como-tesla-oceano-autonomia-100-millas-marinas>
- MTSS. (2020). *Lista de salarios 2020*. Recuperado el 14 de 7 de 2020, de [http://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/Documentos-Salarios/lista\\_salarios\\_2020.pdf](http://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/Documentos-Salarios/lista_salarios_2020.pdf)
- Newell, A., Nuttall, P., Prasad, B., & Veitayaki, J. (2017). Turning the Tide: the need for sustainable sea transport in the Pacific. *Marine Policy*, 75, 249-259. Recuperado el 3 de 3 de 2020, de <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.itcr.ac.cr/science/article/pii/S0308597X16000142>

- Noguera, O., Pinto, R., & Villarreal, J. (2018). *La eficiencia de los nuevos materiales fotosensibles usados en la fabricación de paneles solares*. Recuperado el 10 de 7 de 2020, de Dialnet: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6664999>
- NorthSailing. (2019). *northsailing.is*. Recuperado el 26 de 6 de 2020, de <https://www.northsailing.is/the-boats/schooner-opal/>
- OMI. (2019). *La Organización Marítima Internacional aprueba medidas para reducir las emisiones del transporte marítimo*. Recuperado el 31 de 3 de 2020, de <https://unfccc.int/es/news/la-organizacion-maritima-internacional-aprueba-medidas-para-reducir-las-emisiones-del-transporte>
- ONU. (1998). Protocolo de Kyoto de la convención Marco de Las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Recuperado el 31 de 3 de 2020, de <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpsan.pdf>
- ONU. (s.f.). *un.org*. Recuperado el 3 de 7 de 2020, de <https://www.un.org/es/chronicle/article/la-promesa-de-la-energia-solar-estrategia-energetica-para-reducir-las-emisiones-de-carbono-en-el>
- profesionaleshoy.es*. (2018). Recuperado el 27 de 11 de 2019, de <http://profesionaleshoy.es/construccion-naval/2018/09/18/turbina-ftmc-una-de-corrientes-marinas-para-la-corriente-del-golfo-en-el-estrecho-de-florida-o-las-corrientes-de-marea-del-reino-unido-/12680>
- RECUPERA. (2016). El reciclaje naval, una fuente de recursos. *Recupera*, 6. Recuperado el 12 de 4 de 2020, de <http://www.recyship.com/documentos/75182.pdf>
- SAILCARGO. (2019). *sailcargo.org*. Recuperado el 20 de 2 de 2020, de <https://www.sailcargo.org/#intro>
- Sapag, N. (2007). *Proyectos de inversión Formulación y evaluación*. México. Recuperado el 20 de 5 de 2020, de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=pIS1QnFYt5IC&oi=fnd&pg=PP15&dq=los+proyectos+de+inversi%C3%B3n+&ots=3whgRa2W1F&sig=Oz5NEQ2sWhjo11OZlg8WFqwdWGM#v=onepage&q=los%20proyectos%20de%20inversi%C3%B3n&f=false>
- SPBES. (2019). *Value in energy storage*. Obtenido de <https://spb.es.com/determining-value-in-energy-storage/>
- SunFields. (s.f.). *sfes-solar.com*. Recuperado el 10 de 7 de 2020, de <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/rendimiento/>
- Tincelin, T. (s.f.). A LIFE CYCLE APPROACH TO SHIPBUILDING. *Stirlingdesign*. Recuperado el 20 de 4 de 2020, de A LIFE CYCLE APPROACH TO SHIPBUILDING: [https://www.stirlingdesign.fr/presses/conferences/stirling\\_design\\_sustainable\\_ship\\_design\\_en.pdf](https://www.stirlingdesign.fr/presses/conferences/stirling_design_sustainable_ship_design_en.pdf)
- Torqueedo. (2018). *Navegación eléctrica 2018*. *Torqueedo*. Recuperado el 8 de 3 de 2020, de <https://media.torqueedo.com/catalogs/torqueedo-catalog-2018-es.pdf>

- Twindisc. (s.f.). *Transmission selector tool*. Recuperado el 19 de 5 de 2020, de <http://www.twindisc.com/transmission-selector-tool/>
- UCR. (2019). *Costa Rica: 92 % más mar que tierra*. Recuperado el 22 de 6 de 2020, de <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2019/06/07/costa-rica-92--mas-mar-que-tierra.html#:~:text=Costa%20Rica%20es%20un%20pa%C3%ADs,extensi%C3%B3n%20aproximada%20de%20800%20km>.
- Valencia, A. (2016). La era del litio. *Revista Colombiana de Materiales*. Recuperado el 10 de 7 de 2020, de <https://revistas.udea.edu.co/index.php/materiales/article/view/326488/20783785>
- Vigil, E. (2011). *Gestión de riesgos en inversiones marítimas*. Barcelona. Recuperado el 20 de 2 de 2020, de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/15344/memoria.pdf>
- Wang, H., Oguz, E., Jeong, B., & Zhou, P. (2018). Life cycle cost and environmental impact analysis of ship hull maintenance strategies for a short route hybrid ferry. *Ocean engineering*, 161, 20-28. Recuperado el 20 de 2 de 2020, de [https://www.sciencedirect-com.ezproxy.itcr.ac.cr/science/article/pii/S002980181830619X](https://www.sciencedirect.com.ezproxy.itcr.ac.cr/science/article/pii/S002980181830619X)
- Wilson, J. (2005). *Medidas de ahorro de combustible y de costos para armadores de pequeñas embarcaciones pesqueras*. FAO. Recuperado el 16 de 4 de 2020, de <http://www.fao.org/3/x0487s/X0487S00.htm#TOC>
- Wordpress.com. (2017). Recuperado el 10 de 12 de 2019, de <http://www.google.com/amp/s/aprendiendoarduino.wordpress.com/2017/01/22/de-arduino-al-procesado-de-datos-masivo/amp/>

## 12 Anexos

---

### 12.1 Anexo primero. Simbología utilizada.

Tabla 29. Simbología.

CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono
CO <sub>2eg</sub>	dióxido de carbono equivalente
NO <sub>x</sub>	óxido nitroso
SO <sub>x</sub>	óxido de azufre
W	vatio(s)
k	kilo
rpm	revoluciones por minuto
A	amperio(s)
V	voltio(s)
rad	radianes
N	<i>newton (s)</i>
m	metros
s	segundos
GEI	gas de efecto invernadero
ONU	Organización de las Naciones Unidas
UE	Unión Europea
EEDI	índice de eficiencia energética del proyecto
OMI	Organización Marítima Internacional
UCR	Universidad de Costa Rica
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
VAN	valor actual neto
TIR	tasa interna de retorno
ESS	sistema de almacenamiento de energía
h	hora
GRT	toneladas brutas de registro
NRT	toneladas netas de registro
GT	tonelaje bruto
NT	tonelaje neto

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Word.

## 12.2 Anexo segundo. Código del programa Arduino.

```
#include <SD.h>

#include <SoftwareSerial.h>

SoftwareSerial GPS(7,6);// se esta conectando GPS Rx en pin 7 y Tx en pin 6

File Data;

void setup() {

    Serial.begin(9600);
    GPS.begin(9600);
    Serial.print("Cargando SD ...");
    if (!SD.begin(4)) {
        Serial.println("Error al iniciar SD");
        return;
    }
    Serial.println("Se ha iniciado SD");
}

void loop() {

    Data = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);//abrimos el archivo

    if (Data) {
        Serial.print("Escribiendo SD: ");
        char posicion = GPS.read();
        int sensorvalue0 = analogRead(A0);
        float corriente = sensorvalue0*(600/0.33);
        int sensorvalue1 = analogRead(A1);
        float voltaje = sensorvalue1*(220/5);
        Data.print(", posicion=");
```

```
Data.print(posicion);
Data.print(", corriente=");
Data.print(corriente,3);
Data.print(", voltaje=");
Data.println(voltaje,3);

Data.close();//cerramos el archivo

Serial.print(", posicion=");
Serial.print(posicion);
Serial.print(", corriente=");
Serial.print(corriente,3);
Serial.print(", voltaje=");
Serial.println(voltaje,3);

} else {
  Serial.println("No es posible abrir el archivo");
}
delay(600000); //Toma cada 10 minutos

}
```

## 12.3 Anexo tercero. Precios de equipos.

### Marine Engines Inventory - Depco Power Systems

Item Number	Engine Brand	Engine Model	Engine Serial No	ARR_CPL	Horsepower	Condition	Hours	Advertised Price	Liquidation Price
Item-16869	Caterpillar	3516C HD	PXJ00470	385-6962	3,005	New Surplus	0	\$335,000	
Item-16923	Caterpillar	3516	29200930	2W-8864	2,200	Good Used	5,748	\$75,000	
Item-16924	Caterpillar	3516	29200931	2W-8864	2,200	Good Used	5,720	\$75,000	
Item-16925	Caterpillar	3516	29200853	2W-8864	2,200	Good Used	6,188	\$75,000	
Item-16926	Caterpillar	3516	29200854	2W-8864	2,200	Good Used	6,529	\$75,000	
Item-16703	Caterpillar	3512C HD	SLM00160	277-2931	2,183	New Surplus	0	\$225,000	
Item-16694	Caterpillar	3516B	S2S00376	232-2522	2,000	New Surplus	0	\$250,000	
Item-16695	Caterpillar	3516B	S2S00379	232-2522	2,000	New Surplus	0	\$250,000	
Item-15992	Caterpillar	C32 ACERT	RPM00171	363-7036	1,900	Low Hour	507	\$119,000	\$79,900
Item-16050	Caterpillar	C32 ACERT	RPM00239	363-7036	1,900	Low Hour	1,500	\$117,000	\$59,900
Item-16028	Caterpillar	C32	RXB02520	2392351	1,652	Core	Unknown	\$26,900	\$15,900
Item-16029	Caterpillar	C32	RXB02588	2392350	1,652	Good Used	1,049	\$74,500	\$42,900
Item-16898	Caterpillar	3512B	4TN00454	174-3193	1,500	High Hour Runner	Unknown	\$39,900	
Item-16862	Caterpillar	3512 DITA	50Y00941	2W-8862	1,360	High Hour Runner	Unknown	\$49,500	
Item-16530	Cummins	KTA38-M2	33153516	2404	1,350	Good Used	Unknown	\$43,000	\$33,900
Item-16531	Cummins	KTA38-M2	33147378	2404	1,350	Good Used	Unknown	\$49,500	\$33,900
Item-16533	Cummins	KTA38-M2	33142959	2404	1,350	Good Used	Unknown	\$49,900	\$33,900
Item-16735	Caterpillar	3508B	75M00962	173-6944	1,050	High Hour	Unknown	\$59,000	
Item-16552	Cummins	KTA38-M	33108240	865	1,045	High Hour Runner	Unknown	\$29,500	
Item-16554	Cummins	KTA38-M	33136639	976	1,045	Rebuilt	0	\$69,500	
Item-16555	Cummins	KTA38-M	33115712	865	1,045	Rebuilt	0	\$69,500	
Item-16751	Caterpillar	C32	SDN00661	363-7028	1,000	New Surplus	0	\$195,000	
Item-16864	Cummins	KTA50-M	33120884	977	1,000	High Hour Runner	Unknown	\$32,500	
Item-16796	Caterpillar	3508B	75M00695	180-9194	960	High Hour Runner	Unknown	\$39,500	
Item-16861	Caterpillar	3508 DITA	96Y00745	2W-8860	855	High Hour Runner	Unknown	\$39,500	
Item-16615	Caterpillar	C18 ACERT	GTB00168	377-0750	803	New Surplus	0	\$57,500	
Item-16249	Cummins	KT38-M	33112597	855	800	High Hour Runner	Unknown	\$29,500	\$17,900
Item-16877	Caterpillar	3412E DITA	9PW02830	176-5664	720	High Hour Runner	37,707	\$34,500	
Item-16878	Caterpillar	3412E DITA	9PW02839	176-5664	720	High Hour Runner	25,230	\$34,500	
Item-16560	Caterpillar	3412 DITA	60M03810	4W-3920	624	High Hour Runner	Unknown	\$32,500	
Item-16246	Caterpillar	3412 DIT	60M07134	4N-2247	540	High Hour Runner	Unknown	\$28,000	\$19,900
Item-16261	Caterpillar	3412 DIT	60M06145	4N-2247	540	High Hour Runner	Unknown	\$28,000	\$19,900
Item-15786	Caterpillar	3412 DIT	60M04751	4N-2247	540	High Hour Runner	39,302	\$29,500	\$16,900
Item-15787	Caterpillar	3412 DIT	60M04155	4N-2247	540	High Hour Runner	13,532	\$29,500	\$16,900

### DEPCO - Marine Gears (06-04-2020)

Item Number	Serial No.	Brand	Model No.	Gear Ratio	Condition	Flywheel Hsg Size	Spin Tested	HP @ 1800 RPM	HP @ 2400 RPM	Advertised Price	Liquidation Price
Item-14747	17W00922	Caterpillar	7231	4.67	High Hour	SAE 0	No	764		\$11,900	\$3,900
Item-14772	17W00921	Caterpillar	7231	4.67	High Hour	SAE 0	No	764		\$11,900	\$3,900
Item-14113	11/220 371	Other	GUW 355/1293	3.5	Good Used	Free Standing	No	700		\$10,900	\$2,900
Item-16389	2069119	Twin Disc	MG5065A	2.04	New Surplus	SAE 3	No	311	600	\$8,000	
Item-16881	567559	Twin Disc	MG514	4.5	Good Used	SAE 1	Pending	365	455	\$14,500	
Item-16882	544804	Twin Disc	MG514	6	Good Used	SAE 1	Pending	365	455	\$15,500	
Item-16251	5BB514	Twin Disc	MG514C	4.13	Good Used	SAE 1	Yes	365	455	\$14,000	
Item-16799	5DN144	Twin Disc	MG514C	5.16	Good Used	SAE 1	Yes	365	455	\$14,500	
Item-16801	5AG362	Twin Disc	MG514C	5.16	Good Used	SAE 1	Yes	365	455	\$14,500	
Item-16902	5N3094	Twin Disc	MG514C	4.5	Good Used	SAE 1	Yes	365	455	\$14,500	
Item-16904	5BX459	Twin Disc	MG514C	4.5	Good Used	SAE 1	Yes	365	455	\$14,500	
Item-16905	5C1201	Twin Disc	MG514B	4.5	Good Used	SAE 1	Yes	365	455	\$14,000	
Item-16900	5HV101	Twin Disc	MG516	5.05	Good Used	SAE 1	Yes	544	688	\$18,900	
Item-15417	3U8933	Twin Disc	MG518-1	4.48	Good Used	SAE 1	Yes	580	710	\$19,900	\$10,900
Item-09170	DEPC000462	Twin Disc	MG518	2	Good Used	SAE 1	Yes	580	710	\$13,900	\$3,900
Item-16879	3E1364	Twin Disc	MG527	5.17	Good Used	SAE 0	Pending	730	870	\$22,500	
Item-13968	3P6476	Twin Disc	MG530	4.94	Good Used	SAE 0	Pending	940	1,045	\$29,500	
Item-16880	9A2543	Twin Disc	MG5506	5.44	New Surplus	SAE 00	Pending	1,675	1,885	\$59,000	

Fuente: Cotización de proveedor.



ELECTRIC ENGINE		
Variable Pitch Propeller	\$	70,000,00
Electric Propulsion		
Motor	\$	30,000,00
Motor Drive	\$	15,000,00
<b>600 Volt DC System</b>		
Rails		
Cables	\$	3,000,00
Connectors_IP67	\$	2,000,00
Switches	\$	1,000,00
Fast Fuses	\$	1,000,00
Sensors	\$	1,000,00
Precharge	\$	2,000,00
Filters	\$	2,000,00
HV_DC to 230V_AC Inverter	\$	5,000,00
HV_DC to 24V_DC Inverter	\$	5,000,00
HV_batteries	\$	300,000,00
<b>Electric Generators</b>		
Generator Drive	\$	15,000,00
Electric Generator	\$	15,000,00
Diesel Motor	\$	10,000,00
<b>24V DC System</b>		
24V_DC to 230V_AC Inverter	\$	2,000,00
24V_batteries	\$	1,000,00
Cabling		
Fuses		

All estimates in this section were provided by Peter Heiss of Sigma Plus Associates, Switzerland and are based off the comparable project of converting the schooner Opal in Iceland to 100% electric engine.

Fuente: SAILCARGO INC.

\*\* Algunos de los precios aquí mencionados se utilizaron para ambos sistemas.

## 12.4 Anexo cuarto. Mantenimiento motor diésel.

SEBU7689-10

81  
Maintenance Section  
Maintenance Interval Schedule

### Maintenance Interval Schedule

83542894

SMCS Code: 1000; 7500

Ensure that all safety information, warnings and instructions are read and understood before any operation or any maintenance procedures are performed.

The user is responsible for the performance of maintenance, including all adjustments, the use of proper lubricants, fluids, filters, and the replacement of components due to normal wear and aging. Failure to adhere to proper maintenance intervals and procedures may result in diminished performance of the product and/or accelerated wear of components.

Use distance, fuel consumption, service hours, or calendar time, WHICH EVER OCCURS FIRST, in order to determine the maintenance intervals. Products that operate in severe operating conditions may require more frequent maintenance.

**Note:** Before each consecutive interval is performed, all maintenance from the previous interval must be performed.

Some maintenance intervals will depend on the operating environment of the vessel and on the operating time. Operating in water that contains silt, sediment, the algae and salt will adversely affect the maintenance intervals for some items. In addition, intermittent use of the vessel will adversely affect the maintenance intervals for some items.

#### When Required

Battery - Recycle .....	85
Battery - Replace .....	85
Battery or Battery Cable - Disconnect .....	86
Engine - Clean .....	100
Engine Oil Level Gauge - Calibrate .....	104
Engine Storage Procedure - Check .....	110
Fuel System - Prime .....	112
Heat Exchanger - Inspect .....	121
Maintenance Recommendations .....	123
Sea Water Strainer - Clean/Inspect .....	129
Zinc Rods - Inspect/Replace .....	132

#### Daily

Closed Crankcase Ventilation (CCV) Filter Service Indicator - Inspect .....	87
Cooling System Coolant Level - Check .....	95
Engine Air Cleaner Service Indicator - Inspect ...	102
Engine Oil Level - Check .....	103
Fuel System Primary Filter/Water Separator - Drain .....	114
Walk-Around Inspection .....	131

#### Initial 20 to 40 Service Hours

Belts - Inspect/Adjust/Replace .....	86
--------------------------------------	----

#### Every 50 Service Hours or Weekly

Aftercooler Condensate Drain Valve - Inspect/Clean .....	83
Sea Water Strainer - Clean/Inspect .....	129
Zinc Rods - Inspect/Replace .....	132

#### Initial 500 Hours (for New Systems, Refilled Systems, and Converted Systems)

Cooling System Coolant Sample (Level 2) - Obtain .....	98
--	----

#### Every 500 Service Hours

Cooling System Coolant Sample (Level 1) - Obtain .....	96
--	----

#### Every Year

Cooling System Coolant Sample (Level 2) - Obtain .....	98
--	----

#### Every 6000 Service Hours or 3 Years

Cooling System Coolant Extender (ELC) - Add ...	95
---	----

#### Every 12 000 Service Hours or 6 Years

Cooling System Coolant (ELC) - Change .....	92
---	----

#### First 14 400 L (3750 US gal) of Fuel or 250 Service Hours

Engine Valve Lash - Inspect/Adjust .....	110
Fuel Injector - Inspect/Adjust .....	111

#### Every 14 400 L (3750 US gal) of Fuel or 250 Service Hours or 1 Year

Auxiliary Water Pump (Rubber Impeller) - Inspect .....	85
Battery Electrolyte Level - Check .....	86
Belts - Inspect/Adjust/Replace .....	86
Cooling System Supplemental Coolant Additive (SCA) - Test/Add .....	98
Engine - Clean .....	100
Engine Air Cleaner Element - Clean/Replace .....	100
Engine Crankcase Breather - Clean .....	102
Engine Oil Sample - Obtain .....	105
Engine Oil and Filter - Change .....	105
Fuel System Primary Filter (Water Separator) Element - Replace .....	113
Fuel System Secondary Filter - Replace .....	115
Fuel Tank Water and Sediment - Drain .....	120
Hoses and Clamps - Inspect/Replace .....	122

**Every 28 500 L (7500 US gal) of Fuel or 500 Service Hours or 1 Year (Deep Sump)**

Engine Oil and Filter - Change ..... 105

**Every 57 000 L (15 000 US gal) of Fuel or 1000 Service Hours**

Aftercooler Core - Clean/Test ..... 83  
 Closed Crankcase Ventilation (CCV) Fumes Disposal Filter - Replace ..... 87  
 Heat Exchanger - Inspect ..... 121  
 Turbocharger - Inspect ..... 130

**Every 170 400 L (45 000 US gal) of Fuel or 3000 Service Hours**

Auxiliary Water Pump (Bronze Impeller) - Inspect ..... 84  
 Cooling System Coolant (DEAC) - Change ..... 89  
 Cooling System Water Temperature Regulator - Replace ..... 99  
 Crankshaft Vibration Damper - Inspect ..... 99  
 Engine Mounts - Inspect ..... 103  
 Engine Speed/Timing Sensor - Clean/Inspect ..... 109  
 Engine Valve Lash - Inspect/Adjust ..... 110  
 Engine Valve Rotators - Inspect ..... 111  
 Fuel Injector - Inspect/Adjust ..... 111  
 Starting Motor - Inspect ..... 129

**Every 284 000 L (75 000 US gal) of Fuel or 5000 Service Hours**

Alternator - Inspect ..... 84  
 Maintenance Recommendations ..... 123  
 Oil Cooler Core - Check/Clean/Test ..... 125  
 Overhaul (Top End) ..... 128  
 Water Pump - Inspect ..... 132

**Every 570 000 L (150 000 US gal) of Fuel or 10 000 Service Hours**

Maintenance Recommendations ..... 123  
 Overhaul (Major) ..... 126



Figura 33. Motor CAT C18.

Fuente: imágenes de Google.

## 12.5 Anexo quinto. Mantenimiento motor eléctrico.

### 5.2 Maintenance

Depending on the operating conditions, (e. g. mode, temperature, speed and load), the service life of the bearings and sealing elements can differ greatly.

Maintenance work (except for oil changes) must be carried out by Baumüller or a specialist company commissioned by Baumüller.

In the case of troublefree operation, we generally recommend the following maintenance procedures:

- replacement of the **bearings** after 20000 running hours (The bearings are designed for a calculated service life of 20000 running hours)
- In case of hollow-shaft motors: replacement of the **encoder, encoder-bearing** and **toothed belt** after 20000 running hours.

In the case of **thrust-bearing motors**, we generally recommend the following maintenance guidelines:

- First **oil change** after about 5000 operating hours. All subsequent oil change after 10000 operating hours. Oil lubrication (sump) with **high-performance synthetic gear oil** – "Klübersynth GH6-320" (Klüber Lubrication) or "Omala S4 WE 320"(Shell) or „Degol GS 320" (ARAL).
- A change of shaft sealing, in case of presence, must be implemented when leakage occurs.

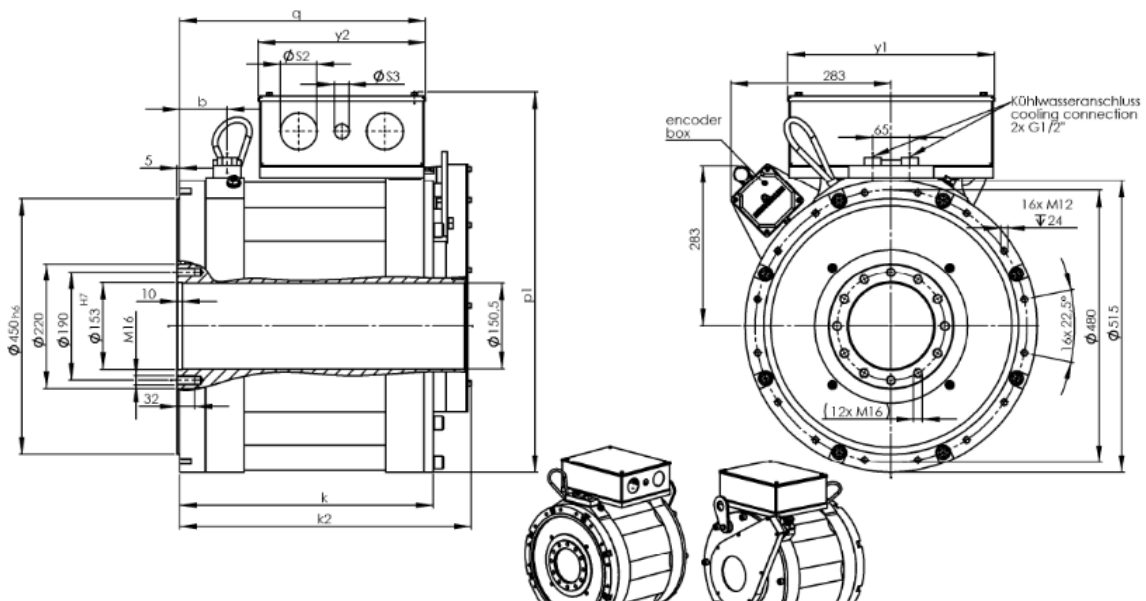


Figura 34. Motor eléctrico.

Fuente: SAILCARGO INC.