

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Diseño del sistema de propulsión eléctrico de una lancha para turismo
alimentado por energía solar”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Erick Javier González Franco

Juan Pablo Caicedo Cevallos

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

DEDICATORIA

Dedico este tema de tesis a mis padres por el apoyo incondicional que me brindaron durante el tiempo transcurrido como estudiante de la ESPOL.

Erick Javier González Franco

El presente proyecto se lo dedico a mis padres por su constante apoyo a lo largo de mi carrera.

Juan Pablo Caicedo Cevallos

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres y hermanos que me brindaron su apoyo durante el desarrollo de mi carrera.

Agradezco a los profesores de la ESPOL por compartir su conocimiento y experiencia conmigo. Y a la institución por permitirme desarrollarme como estudiante de la carrera de Ing. Mecánica.

Agradezco especialmente a Jorge Marcial M.Sc. por acompañarnos con sus consejos a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Erick Javier González Franco

Agradezco a mi madre por el constante apoyo que me brindó, a mi padre por su comprensión y consejos, a mi hermano por su ayuda en la carrera y a mi novia por sus ánimos cuando más lo necesité.

Agradezco a Jorge Marcial M.Sc. por brindarnos las directrices para realizar este trabajo y por su valiosa guía en el ámbito ingenieril.

Juan Pablo Caicedo Cevallos

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Erick Javier González Franco y Juan Pablo Caicedo Cevallos damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Erick Javier González
Franco



Juan Pablo Caicedo
Cevallos

EVALUADORES



Jorge Marcial MSc.

PROFESOR DE LA MATERIA



Jorge Marcial Msc.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Las embarcaciones de turismo son populares en los principales balnearios de la costa ecuatoriana, dado que brindan el servicio de navegación por la bahía. Este proyecto se basa en la implementación de un sistema de motor eléctrico accionado por bancos de baterías que a su vez serán recargados por paneles solares. La introducción de este sistema en el ámbito marino posee varias ventajas como la ausencia de gases de combustión, ruido, entre otros aspectos que ayudan al sistema a ser más amigable con el medio ambiente y mejorar la calidad del servicio que se puede brindar al turista a bordo de la embarcación. Para la selección del sistema adecuado se realizó una matriz de decisión en la que se optó por un motor eléctrico PMSM de 10 kW con un voltaje de funcionamiento de 48 VDC, en conjunto con un sistema de poleas para la transmisión de potencia. Para la instalación fotovoltaica se utilizó 4 paneles solares de 500 W, un panel solar de 230 W, un regulador de carga tipo MPPT y un total de 16 baterías. Mediante una simulación se logró establecer una potencia efectiva de diseño de 6.9 kW y la ubicación óptima de la carga a bordo de la embarcación para desplazar 5400 libras incluyendo 9 personas, todo esto a una velocidad de 5 nudos por un tiempo de 8 horas de autonomía. El costo-beneficio de la instalación del sistema se estimó en un ahorro como mínimo de alrededor de \$5000 dólares anuales en gasolina artesanal, considerando una embarcación de igual capacidad de pasajeros, añadiendo que el sistema en cuestión promueve la reducción de la huella ecológica.

Palabras Clave: Embarcación, instalación fotovoltaica, potencia, motor eléctrico.

ABSTRACT

Tourist boats are popular in the main resorts of the Ecuadorian coast since they provide the navigation service through the bay. This project is based on the implementation of an electric motor system powered by battery banks that in turn will be recharged by solar panels. The introduction of this system in the marine environment has several advantages such as the absence of combustion gases, noise, among other aspects that help the system to be more friendly to the environment and improve the quality of the service that can be provided to tourists. aboard the boat. For the selection of the appropriate system, a decision matrix was made in which a 10 kW PMSM electric motor with an operating voltage of 48 VDC was chosen, together with a pulley system for power transmission. For the photovoltaic installation, 4 solar panels of 500 W, a solar panel of 230 W, a charge regulator type MPPT and a total of 16 batteries were used. Through a simulation it was possible to establish an effective design power of 6.9 kW and the optimal location of the load on board the boat to displace 5,400 pounds including 9 people, all this at a speed of 5 knots for a time of 8 hours of autonomy . The cost-benefit of installing the system was estimated to save at least around \$ 5000 dollars per year in artisanal gasoline, considering a vessel with the same passenger capacity, adding that the system in question promotes the reduction of the ecological footprint.

Keywords: *Boat, photovoltaic installation, power, electric motor.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Definición del problema	1
1.2 Justificación del proyecto.....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo general.....	2
1.3.2 Objetivos específicos	2
1.4 Marco Teórico.....	2
1.4.1 Tipos de motores utilizados en embarcaciones de turismo en Salinas	2
1.4.2 Uso de motores eléctricos en aplicaciones marinas	3
1.4.3 Ventajas y desventajas del un motor eléctrico en aplicaciones marinas..	3
1.4.4 Diferencias entre motor dentro y fuera de borda.....	4
1.4.5 Sistema propulsivo y de gobierno con motor dentro de borda.	4
1.4.6 Potencias THP, DHP, EHP, SHP y BHP en una embarcación.	5
1.4.7 Software MaxSurf	6
1.4.8 Energía solar fotovoltaica.....	6
1.4.9 Sistema de almacenamiento de energía en un bote eléctrico.....	7
CAPÍTULO 2.....	9

2.	Metodología	9
2.1	Alternativas de diseño de forma	9
2.1.1	Diseño de forma del modelo 1	9
2.1.2	Diseño de forma del modelo 2	10
2.1.3	Selección de la mejor alternativa al diseño de forma	11
2.2	Factores de diseño	11
2.3	Normas	12
2.4	Cálculos	12
2.4.1	Cálculo de potencia y consumo energético del motor	12
2.4.2	Cálculo del diámetro del eje	14
2.4.3	Cálculo estimado del diámetro y paso de la hélice	15
2.4.4	Cálculo del número de paneles solares	16
2.4.5	Cálculo de número de baterías	18
2.4.6	Cálculo del rendimiento global de la instalación fotovoltaica	18
2.4.7	Cálculo del ángulo óptimo de inclinación de paneles	19
2.4.8	Cálculo de corriente para la selección del regulador de carga MPPT	22
2.4.9	Cálculo de capacidad del cargador de baterías	22
2.5	Componentes	23
2.5.1	Componentes del sistema de gobierno	23
2.5.2	Componentes para el sistema de propulsión	26
2.5.3	Componentes electrónicos y eléctricos	28
2.6	Construcción del sistema de gobierno y propulsión.	30
2.6.1	Sistema de gobierno	30
2.6.2	Sistema de propulsión	32
2.6.3	Sistema eléctrico	33
CAPÍTULO 3		35

3.	Resultados y análisis	35
3.1	Resultados.....	35
3.1.1	Potencia y consumo energético del motor	35
3.1.2	Diámetro del eje	41
3.1.3	Cálculo del diámetro y paso de la hélice del motor	42
3.1.4	Número de paneles solares	42
3.1.5	Número de baterías	46
3.1.6	Rendimiento global de la instalación fotovoltaica.....	46
3.1.7	Corriente requerida para la selección del regulador de carga MPPT.....	47
3.1.8	Capacidad del cargador de baterías	47
3.2	Análisis de costos.....	48
3.2.1	Costo de materiales	48
3.2.2	Costo total de la implementación del sistema y viabilidad.....	49
CAPÍTULO 4.....		50
4.	Conclusiones y recomendaciones	50
4.1	Conclusiones.....	50
4.2	Recomendaciones.....	50

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
AISI	American Iron and Steel Institute
ANSI	American National Standards Institute
ASME	The American Society of Mechanical Engineers
AC	Corriente alterna
DC	Corriente directa
IP	Ingress Protection
IMO	Organización Marítima Internacional
GZ	Brazo adrizante
SHP	Potencia al eje
EHP	Potencia efectiva
BHP	Potencia al freno
PMSM	Motor sincrónico de imanes permanentes

SIMBOLOGÍA

HP	Horsepower
Lb	Libras
kW	KiloWatts
W	Watts
Nm	Newton metro
RPM	Revoluciones por minuto
MPa	Mega Pascales
h	Horas
m	Metros
Ah	Amperios hora
Pulg	Pulgadas
V	Voltios
mm	Milímetros
tn	Toneladas
lb-in	Libras pulgadas
kWh	KiloWatts hora
kg	Kilogramos

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Bote de turismo de Salinas con motor fuera de borda.....	3
Figura 1.2 Lancha de placer con motor eléctrico	3
Figura 1.3 Motor Volvo Penta dentro de borda.....	4
Figura 1.4 Timón, eje, arbotante y hélice de una embarcación	5
Figura 1.5 Diagrama de potencias en un bote	6
Figura 1.6 Casco modelado en Maxsurf	6
Figura 1.7 Aplicación de energía fotovoltaica en navíos.....	7
Figura 2.1 Primer modelo	9
Figura 2.2 Segundo modelo	10
Figura 2.3 Fibras artesanales	13
Figura 2.4 Otras Fibras artesanales.	13
Figura 2.5 Relación entre velocidad del bote y RPM de la hélice.....	15
Figura 2.6 Diagrama de cuerpo libre de la estructura.....	17
Figura 2.7 Inclinación de panel utilizando aplicación.....	20
Figura 2.8 Interfaz PVGIS.....	21
Figura 2.9 Irradiación solar en la provincia de Santa Elena.....	21
Figura 2.10 Guía de selección para sistema de gobierno.....	23
Figura 2.11 Selección de elementos para sistema de gobierno.	23
Figura 2.12 Esquema general del sistema de gobierno.....	30
Figura 2.13 Esquema del mecanismo de movimiento del timón.....	31
Figura 2.14 Brazo del timón, limera, chumacera.	31
Figura 2.15. Ensamble del sistema de propulsión.	32
Figura 2.16. Vista en explosión del sistema de propulsión.	33
Figura 2.17 Esquema general de la conexión eléctrico.	34
Figura 3.1 Dimensiones finales de la embarcación y su desplazamiento.....	35

Figura 3.2 Curva de Potencia EHP [kW] vs velocidad [kn] del bote.....	36
Figura 3.3 Brazo adrizante (GZ) con respecto al ángulo.	40
Figura 3.4 Equilibrio entre el centro de gravedad y el centro de boyantez.	41
Figura 3.5 Dimensiones del techo.	43
Figura 3.6 Fuerza distribuida sobre el techo.....	43
Figura 3.7 Diagrama de Fuerza cortante.	44
Figura 3.8 Diagrama de momento.	44
Figura 3.9 Ubicación de los paneles en el techo de la embarcación.	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Matriz de decisión para el diseño de forma	11
Tabla 2.2 Valores de puntuación asignada.....	11
Tabla 2.3. Estimación de carga total a desplazar.	12
Tabla 2.4 Coeficientes para determinación de eficiencia global.	19
Tabla 2.5 Valores de irradiación solar para ángulo de inclinación de 0 a 45°.....	19
Tabla 2.6 Valores de irradiación solar para ángulo de inclinación de 50 a 90°.....	20
Tabla 2.7 Irradiación solar para los ángulos desde 16 hasta 19°.	20
Tabla 2.6 Componentes del sistema de propulsión.....	26
Tabla 2.7 Componentes del sistema eléctrico.	28
Tabla 3.1 Potencia EHP y Resistencia calculada a varias velocidades.....	37
Tabla 3.2. Resultados obtenidos con la condición de carga establecida.....	39
Tabla 3.3. Criterio IMO para embarcaciones menores de 24 m de eslora.....	40
Tabla 3.4 Intensidad corriente máxima de paneles.	47
Tabla 3.5 Costo de los materiales.	48
Tabla 3.6 Costo total.....	49

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Definición del problema

Las embarcaciones de turismo son populares en los principales balnearios de la costa ecuatoriana, dado que brindan el servicio de navegación por la bahía. En el cantón Salinas de la provincia de Santa Elena, este tipo de botes utilizan motores de dos o cuatro tiempos los cuales producen contaminación como los gases de combustión, pequeñas partículas de combustible que caen al mar, ruido generado hacia el ambiente, entre otros. Además, de que el uso de ellos involucra un gasto considerable de operación con respecto a la gasolina o diésel. Por este motivo una opción factible es cambiar el sistema motriz por un sistema de motor eléctrico impulsado por paneles solares y un banco de baterías, que cumpla con los requerimientos de potencia para la embarcación y que su eficiencia sea similar o mejor que al utilizar un motor de combustión interna.

1.2 Justificación del proyecto

Los botes turísticos son utilizados para realizar recorridos en los cuales se pueden apreciar aves como piqueros de patas azules o albatros, además de apreciar las playas de Salinas desde el mar. El proyecto se basa en la implementación de un sistema de motor eléctrico accionado por un banco de baterías que a su vez serán recargadas por paneles solares, lo que resultara en la ausencia de gases de combustión, ruido, entre otros aspectos que ayudarán al sistema a ser más amigable con el medio ambiente y mejorar la calidad del servicio que se puede brindar al turista a bordo de la embarcación y también disminuir el costo de operación diario asumido.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Implementar un motor eléctrico alimentado por paneles solares y un banco de baterías en una embarcación de turismo en el cantón de Salinas en la provincia de Santa Elena.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Seleccionar la mejor combinación de elementos del sistema eléctrico y motriz mediante el uso de una matriz de decisión.
2. Realizar una simulación en el software Maxsurf para poder estimar la potencia necesaria del motor eléctrico.
3. Seleccionar componentes necesarios como paneles solares, banco de baterías, motor eléctrico, partes del sistema de propulsión y gobierno, entre otros.
4. Comparar el costo-beneficio de la implementación del nuevo sistema en una embarcación de turismo con respecto al sistema de motor de combustión interna.
5. Utilizar adecuadamente las normas para realizar el diseño conceptual del sistema compuesto.

1.4 Marco Teórico

1.4.1 Tipos de motores utilizados en embarcaciones de turismo en Salinas

Los motores que actualmente se utilizan en la mayoría de los botes de turismo son fuera de bordas de dos o cuatro tiempos a gasolina super o artesanal, y motores diésel en menor número. Mayormente se utilizan motores de 48 a 75 hp en embarcaciones de hasta 15 pasajeros y combinación de 2 motores de 75 hp o mayor caballaje para lanchas de más de 25 personas.



Figura 1.1 Bote de turismo de Salinas con motor fuera de borda

1.4.2 Uso de motores eléctricos en aplicaciones marinas

Actualmente debido a los nuevos desarrollos tecnológicos, la implementación de motores eléctricos en sistemas de propulsión de botes cada vez es más frecuente. Existen varias marcas reconocidas como Torqeedo, Electric Yacht, Motorenergy, que ofrecen kits completos para realizar el debido cambio tomando en cuenta los requerimientos de potencia, tipo de motor (dentro o fuera de la borda), entre otros.



Figura 1.2 Lancha de placer con motor eléctrico

1.4.3 Ventajas y desventajas de un motor eléctrico en aplicaciones marinas

Como ventajas se tiene que los motores eléctricos para barcos son más silenciosos, tienen un menor costo de mantenimiento, son amigables con el medio ambiente, su funcionamiento es más sencillo en comparación al

motor de combustión interna, además estos dan al navío mayor maniobrabilidad y son más livianos (Martinez, 2020).

Como desventajas se tiene menor autonomía, en ciertos casos proporcionan un menor torque en relación con el motor convencional, en aplicaciones en donde son alimentados por bancos de baterías, el tiempo de recarga de estos es relativamente alto claro está dependiendo de la velocidad y disponibilidad de la fuente de recarga.

1.4.4 Diferencias entre motor dentro y fuera de borda

Un motor fuera de borda es aquel que se encuentra ubicado en el espejo de una embarcación como el que se muestra en la figura 1.1, se encuentran de en diferentes rangos de potencia tanto en eléctricos y de combustión. La diferencia básica con el motor dentro de borda o estacionario es que este se encuentra instalado dentro de la embarcación apoyado sobre soportes y alineado con el eje de propulsión.



Figura 1.3 Motor Volvo Penta dentro de borda

1.4.5 Sistema propulsivo y de gobierno con motor dentro de borda.

Este sistema básicamente está compuesto por el motor seguido de una caja reductora, en caso de embarcaciones de alta velocidad se usa caja multiplicadora, después de la caja de engranes mediante bridas se conecta el eje de propulsión el cual a su vez aloja la hélice en su otro extremo. Este conjunto está apoyado sobre un cojinete y soporte llamado arbotante que a su vez se encuentra empernado al casco de la embarcación, cabe

recalcar que todo este conjunto siempre debe estar debidamente alineado para evitar las vibraciones y posibles problemas en los elementos que lo componen, incluso bases del motor.

El sistema de gobierno está compuesto por el timón y los elementos que lo direccionan como mangueras, servo y cilindro hidráulico en el caso más básico, ya que en la actualidad existen sistemas modernos que incluyen pilotos automáticos. La finalidad es direccionar la embarcación hacia el rumbo deseado.



Figura 1.4 Timón, eje, arbotante y hélice de una embarcación

1.4.6 Potencias THP, DHP, EHP, SHP y BHP en una embarcación.

La potencia THP es entregada por la hélice del barco la cual genera el empuje para mover la embarcación y es igual a la velocidad de avance por el empuje. La potencia DHP se encuentra en el eje de transmisión justo antes del propulsor por lo que incluye las pérdidas por la caja reductora, cojinetes de apoyos y sellos.

La potencia efectiva o EHP es aquella necesaria para superar la resistencia generada por el casco de un navío a una determinada velocidad sin incluir la potencia generada por la hélice. Por otro lado, la potencia SHP es igual a la potencia al freno del motor BHP, menos las pérdidas en el reductor (Gerr, 1989).

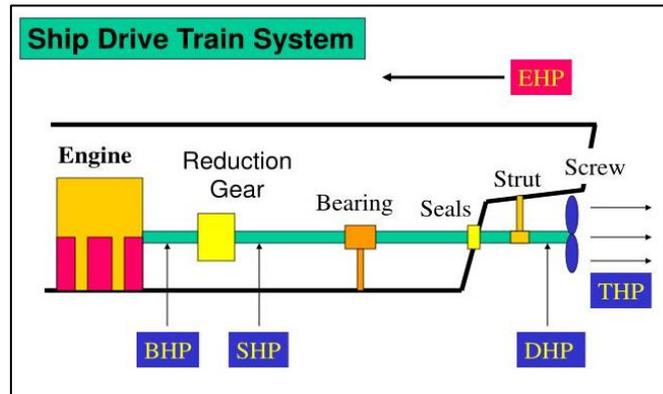


Figura 1.5 Diagrama de potencias en un bote

1.4.7 Software MaxSurf

El programa permite diseñar cualquier tipo de embarcación que se desee realizar, gracias a que cuenta con diversos módulos como el de estabilidad, predicción de potencia y resistencia, predicción de movimientos, desarrollo de placas, modelado de casco con NURB, entre otros que hacen a este software una herramienta potente en el diseño naval.

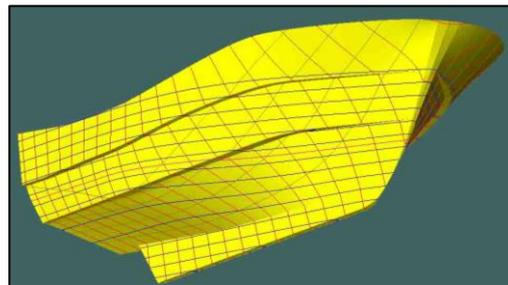


Figura 1.6 Casco modelado en Maxsurf

1.4.8 Energía solar fotovoltaica

Este tipo de energía la cual transforma la radiación solar en energía eléctrica gracias al efecto fotoeléctrico actualmente tiene aplicaciones muy diversas como puede ser el suministro de energía hacia un banco de baterías para poder suplir la demanda energética de una casa, electrificación de pueblos pequeños, navegación marina entre otras. Hoy en día la energía fotovoltaica es muy importante porque disminuye el

consumo de combustibles fósiles en lo que respecta a la generación de energía eléctrica.

Barcos solares

En el 2017 se contabilizaban más de 1000 botes de este tipo alrededor del mundo (Smit, 2017). Con el paso del tiempo el número antes mencionado va en aumento ya que es una forma innovadora que permite a los botes mediante el uso de paneles fotovoltaicos poder trasladarse hacia el rumbo deseado.



Figura 1.7 Aplicación de energía fotovoltaica en navíos

1.4.9 Sistema de almacenamiento de energía en un bote eléctrico.

El sistema de almacenamiento es el encargado de proporcionar energía al sistema motriz, también convertir la radiación solar en energía eléctrica y de controlar el flujo de corriente hacia el banco de baterías.

Panel Solar

Los paneles solares son los encargados de captar la radiación solar y convertirla en energía eléctrica gracias al efecto fotoeléctrico, la adecuación de varios de estos es necesario debido a los requerimientos de potencia en la embarcación.

Banco de Baterías

El banco de baterías almacenara la energía generada por los paneles solares, hay varios tipos de baterías que pueden ser utilizados, pero aplicaciones en donde se requieren considerables ciclos de descarga, las baterías de ciclo profundo son las más adecuadas. Esto quiere decir que se podrán descargar y cargar más veces que una batería convencional.

Regulador de carga

El regulador de carga funciona de intermediario entre el conjunto de paneles solares y el banco de baterías, su principal función es distribuir la corriente desde los paneles hacia el banco de baterías eficientemente, asumiendo parámetros como porcentaje de descarga de baterías, potencia disponible solar, entre otros.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Alternativas de diseño de forma

2.1.1 Diseño de forma del modelo 1

El modelo 1 mostrado en la figura 2.1, consiste en varios componentes mecánicos y eléctricos que trabajando de forma adecuada podrán transmitir potencia al eje de la hélice. La parte eléctrica consiste en paneles solares que captarán la energía solar y la transformará a eléctrica, la cual será almacenada en bancos de baterías debidamente posicionados en el navío. Posteriormente el motor eléctrico PMSM hará uso de esta energía mediante un controlador cuando se requiera transmitir potencia al eje de la hélice mediante un sistema de poleas y banda el cual conectará el eje del motor y hélice, generando así el movimiento de la embarcación.

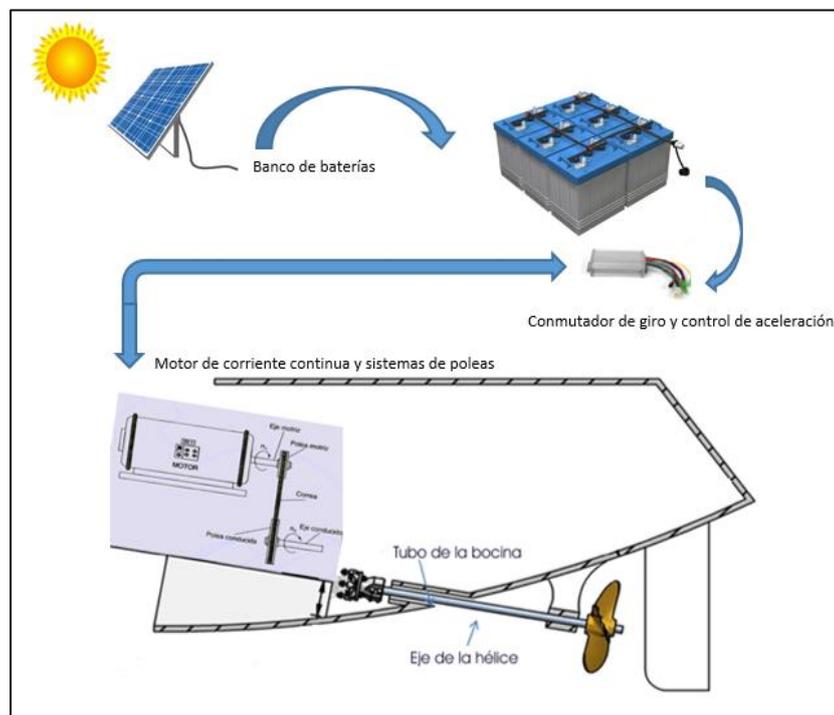


Figura 2.1 Primer modelo

2.1.2 Diseño de forma del modelo 2

El modelo 2 mostrado en la figura 2.2, tiene una similitud con el modelo 1 en cuanto a la captación de energía solar por medio de paneles solares para ser almacenada en los bancos de baterías. La energía almacenada será entregada al motor eléctrico convencional AC mediante un inversor y variador de frecuencia. Y un reductor de velocidad transmitirá potencia al eje de la hélice.

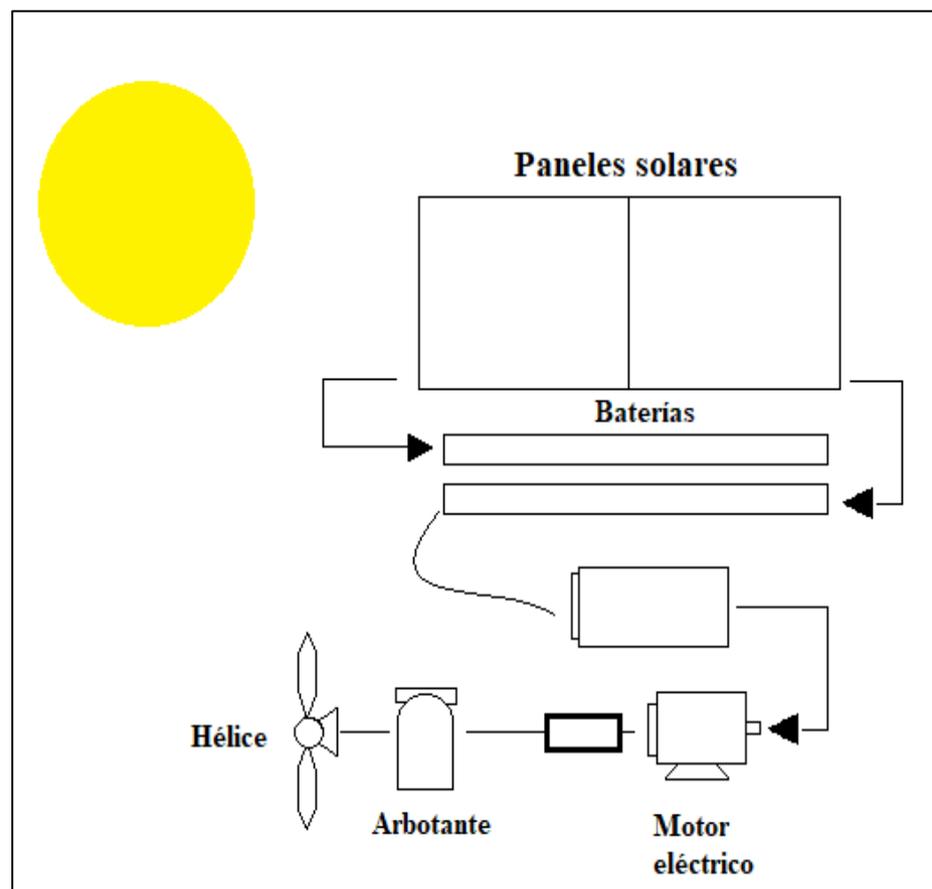


Figura 2.2 Segundo modelo

2.1.3 Selección de la mejor alternativa al diseño de forma

Tabla 2.1 Matriz de decisión para el diseño de forma

#	Criterios técnicos	Peso (%)	Modelo 1	Modelo 2
1	Mantenimiento	15	5	4
2	Instalación	18	4	5
3	Costo (Materiales y mano de obra)	20	8	5
4	Autonomía	20	6	8
5	Peso	4	7	5
6	Durabilidad	8	6	8
7	Eficiencia	10	8	8
8	Ecoeficiencia	2	7	6
9	Tamaño	3	6	7
Total		100	6.15	6.07

Tabla 2.2 Valores de puntuación asignada

Alto	9-10
Medio	5-8
Bajo	1-4

De acuerdo con la matriz de decisión planteada el ganador fue el modelo 1, principalmente debido a que resulta más económico, fácil instalación, mantenimiento, menor tamaño entre otros parámetros mostrados en la matriz.

2.2 Factores de diseño

Los factores de diseño para el sistema son:

- Potencia del motor.
- Corriente y tensión del sistema.
- Diámetro y paso de la hélice.
- Energía solar disponible.
- Peso total de la embarcación.

2.3 Normas

Las normas mencionadas a continuación fueron utilizadas para un correcto diseño tanto en la parte eléctrica como en la parte mecánica, procurando mantener un nivel de seguridad dentro de los estándares establecidos. Las normativas más importantes para tomar en cuenta son:

- AISI 304. Ejes de acero inoxidable resistente al efecto corrosivo del medio ambiente, vapor, agua y ácidos.
- ASME-ANSI B106.1M “Design of Transmission Shafting”
- Norma IP67. Para protección contra chorros de agua en todas las direcciones.
- Norma IMO para embarcaciones pesqueras menores de 24 m de eslora.

2.4 Cálculos

2.4.1 Cálculo de potencia y consumo energético del motor

Antes de realizar el cálculo de potencia, se realiza una aproximación de la carga total que va a transportar la embarcación, con respecto al peso del casco se estimó en base a páginas de anuncios de ventas de botes con dimensiones similares al diseño, y este oscila entre los 1500 y 2000 libras por lo que se tomó un promedio.

Tabla 2.3 Estimación de carga total a desplazar

Descripción	Peso (lbs)
Personas	1350
Embarcación	1750
Motor	36
Accesorios	150
Paneles	253
Baterías	1840
Peso total	5379

Se procede a determinar la potencia requerida mediante el software MAXSURF para determinar los valores de resistencia del casco y potencia

EHP, además de obtener un análisis de estabilidad que permite conocer la distribución adecuada de carga.

Para la respectiva simulación primero se procede a diseñar el casco tomando en consideración modelos similares a fibras artesanales, posteriormente se harán modificaciones del modelo para que sea turística.



Figura 2.3 Fibras artesanales



Figura 2.4 Otras Fibras artesanales

Una vez obtenida la potencia EHP se utilizará la ecuación 2.1 para determinar la potencia en el eje del propulsor SHP.

$$SHP = \frac{EHP}{\eta_P} \quad (2.1)$$

Donde EHP es la potencia necesaria para vencer la resistencia del casco en [kW] y η_P es la eficiencia propulsiva del sistema. Después de esto se

aproximará la potencia al freno (BHP) del motor a seleccionar, a la potencia SHP ya que no se tiene una caja reductora. Con respecto al torque y RPM se calcularán en base a la curva de la potencia del motor, por otro lado, se tomará en cuenta que el torque al eje de la hélice obedece a la ecuación 2.2.

$$T_{eje-hélice} = n * T_m \quad (2.2)$$

Donde T_m es el torque del motor en [Nm] y n es la relación de transmisión. Luego de esto, se establece la cantidad de energía que va a necesitar el motor para su funcionamiento por un tiempo de 8 horas que se requiere de autonomía, esto se lo realiza con la ayuda de la ecuación 2.3.

$$CE = P_{motor} * t \quad (2.3)$$

Donde CE es el consumo energético en [kWh] y P_{motor} es la potencia antes calculada (BHP) en [kW].

2.4.2 Cálculo del diámetro del eje

Como se conoce la potencia del motor se puede establecer el diámetro del eje el cual va a transmitir la potencia. Es importante que el eje de la hélice sea diseñado para poder transmitir el torque generado, y de tal forma que no supere la resistencia a torsión del material. A continuación, se procede a calcular el diámetro mediante la ecuación 2.4.

$$D = \sqrt[3]{\frac{60 * SHP}{RPM}} \quad (2.4)$$

Donde D es el diámetro del eje en [in], SHP es la potencia en el eje del propulsor en [HP] y RPM son las revoluciones por minuto en eje de la hélice. Cabe recalcar que esta ecuación puede ser utilizada teniendo en cuenta que las tensiones admisibles que serán utilizadas en aceros no superen

esfuerzos de 27.58 MPa (4000 psi) para ejes de transmisión de potencia (Allan Fonseca ,2014).

2.4.3 Cálculo estimado del diámetro y paso de la hélice

Para el cálculo aproximado nos basaremos en gráficas obtenidas mediante métodos empíricos y fórmulas que fueron desarrolladas por George Cruch. Cabe recalcar que estas gráficas son aplicables para hélices de 3 aspas y una razón de ancho-medio de las palas de 0.33 (Gerr, 1989).

Para el cálculo del diámetro tenemos la siguiente ecuación:

$$D = \frac{632.7 * SHP^{0.2}}{RPM^{0.6}} \quad (2.5)$$

Dónde D es el diámetro de la hélice en pulgadas, SHP es la potencia en el eje propulsor en [HP] y RPM son las revoluciones por minuto del eje propulsor. El paso estimado de la hélice para el diseño se aproximará mediante la figura 2.4, usando los valores de velocidad deseada (5 nudos) y RPM de la hélice (3055).

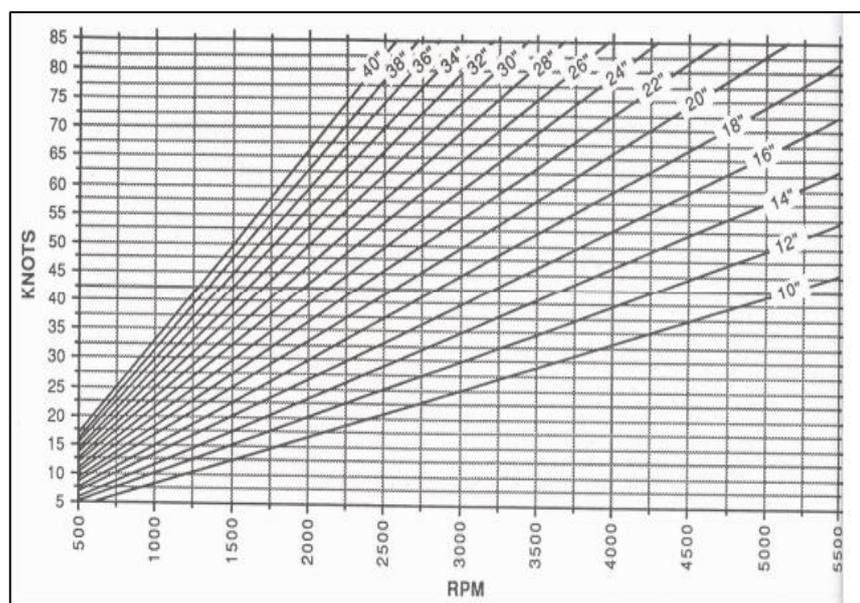


Figura 2.5 Relación entre velocidad del bote y RPM de la hélice

2.4.4 Cálculo del número de paneles solares

Para establecer el número de paneles solares y baterías, se procede a determinar las horas solares pico donde se tendrá una mayor aportación de energía solar por medio de la ecuación 2.6.

$$HSP = \frac{I_{mes}}{I_{unidad} * \text{Días del mes}} \quad (2.6)$$

Donde HSP son las horas de pico solar en un día, I_{mes} en [kW*h/m²], es la irradiación solar en el mes más desfavorable del año, es decir, con menos energía solar aportada y I_{unidad} es la unidad de irradiación solar en [kW/m²]. Conocido el valor del consumo energético del motor, las horas solares pico y la potencia que tiene el panel solar seleccionado se determinara el número de paneles ideales que se necesita en el sistema mediante la ecuación 2.7.

$$\# \text{ de paneles} = \frac{\text{Consumo energético}}{\text{Potencia del panel} * HSP} = \frac{\frac{Wh}{\text{día}} * \text{días}}{HSP * w} \quad (2.7)$$

Donde w es la potencia del panel en [W]. Cabe recalcar que esto sería en el caso de que el motor sea alimentado únicamente por los paneles, pero se debe tener en cuenta que las baterías se encargarán de la autonomía de la embarcación por una cierta cantidad de tiempo.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que la estructura que soportará los paneles va a estar sometida a un esfuerzo de flexión por lo que el número de paneles a colocar puede ser limitado.

Como la carga se encuentra distribuida a lo largo de la estructura, se calculan las reacciones en los extremos, los cuales son iguales ($R_1=R_2$) se hace un análisis de sumatoria de fuerzas en el eje Y según la primera ley de Newton para obtener la ecuación 2.8 y determinar las reacciones.

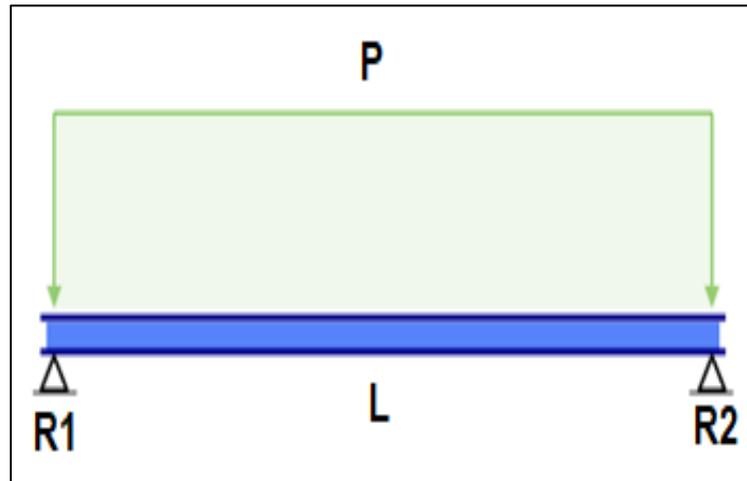


Figura 2.6 Diagrama de cuerpo libre de la estructura

$$\begin{aligned}
 \sum F_y &= 0 \\
 R1 + R2 - PL &= 0 \\
 R1 + R2 &= PL \\
 R1 = R2 &= R \\
 R &= \frac{PL}{2} \tag{2.8}
 \end{aligned}$$

Donde P es la carga distribuida en [N/m] y L es la longitud de la estructura en [m]. Conociendo las cargas y reacciones que actúan sobre la estructura se puede graficar los diagramas de fuerza cortante y momento flector con lo que se procede a obtener el momento máximo (M) para calcular el esfuerzo de flexión requerido a partir de la ecuación 2.9.

$$\sigma_{max} = \frac{MC}{I} \tag{2.9}$$

Donde I en [m⁴] es la inercia y C es la sección media en [m] donde será aplicado el esfuerzo y M es el momento máximo en [Nm]. Para la geometría de la estructura analizada se tiene una inercia específica que se calcula a través de la ecuación 2.10.

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2.10)$$

Donde b es el ancho en metros al igual que la altura y h. Además, se tomará como esfuerzo de fluencia (S_y) de la estructura aproximadamente 106.62 [MPa] considerando que es una estructura de fibra de vidrio en su gran mayoría (Taborda, Cañas, 2016).

2.4.5 Cálculo de número de baterías

Para determinar la capacidad de batería que es necesaria para el sistema se utiliza la ecuación 2.11 que relaciona el aporte de paneles y un porcentaje de descarga para el tipo de batería seleccionada.

$$CB = \frac{\text{Días de autonomía} * (\text{Consumo total por día} - \text{Aporte de paneles})}{\% \text{ de descarga de la batería} * \text{Voltaje del sistema} * \% \text{ pérdidas}} \quad (2.11)$$

Conocido este consumo, se procede a seleccionar el conjunto de baterías que conectadas en serie, paralelo o serie-paralelo puedan cumplir con la capacidad calculada en [Ah].

2.4.6 Cálculo del rendimiento global de la instalación fotovoltaica

En una instalación fotovoltaica autónoma en la que se presenta acumulación de energía, se debe tener en cuenta varios factores que ocasionan pérdidas en el rendimiento de la instalación. Para obtener dicho valor se procede a calcular el rendimiento global mediante la ecuación 2.12.

$$R = (1 - Kb - Kc - Kr - Kv) \left(1 - Ka \frac{N}{Pd}\right) \quad (2.12)$$

En donde los coeficientes que intervienen se relacionan junto con otros parámetros que se muestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Coeficientes para determinación de eficiencia global

Kb	Coeficiente de pérdidas por rendimiento en el acumulador.
Ka	Fracción de energía que se pierde por auto-descarga.
Kc	Pérdidas por el rendimiento del inversor.
Kr	Pérdidas en el controlador de carga
Kv	Otras pérdidas no consideradas anteriormente.
N	Número de días de autonomía para asegurar un servicio sin carga.
Pd	Profundidad máxima de descarga admisible.

El escenario óptimo es cuando se obtiene un rendimiento global del sistema por sobre el 75% lo cual es muy accesible en este sistema teniendo en cuenta que los equipos que serán instalados son de primer uso (Vilariño, 2014).

2.4.7 Cálculo del ángulo óptimo de inclinación de paneles

El ángulo conveniente para un sistema de adquisición de energía solar es determinado por varios factores como: la radiación incidente en el lugar y la sombra interpuesta entre la luz solar y el sistema de adquisición. Con la ubicación de instalación de los paneles solares se procede a estimar un ángulo óptimo, esto se consigue gracias al Sistema de Información Geográfica Fotovoltaica (PVGIS), donde se puede llegar a un ángulo con el cual se tenga la máxima irradiación solar como se observa en las tablas 2.5, 2.6 y 2.7.

Tabla 2.5 Valores de irradiación solar para ángulo de inclinación de 0 a 45°

Ángulo (°)	Irradiación solar (kWh/m ²)
0	109,78
5	118,79
10	119,97
15	120,61
20	120,69
25	120,2
30	119,14
35	111,94
40	104,8

Tabla 2.6 Valores de irradiación solar para ángulo de inclinación de 50 a 90°

Ángulo (°)	Irradiación solar (kWh/m ²)
50	85,33
55	72,91
60	61,39
65	50,27
70	40,14
75	37,39
80	34,84
85	32,38
90	30,02
50	85,33

Tabla 2.7 Irradiación solar para los ángulos desde 16 hasta 19°

Ángulo (°)	Irradiación solar (kWh/m ²)
16	120,67
17	120,71
18	120,72
19	120,72

A modo de comparación, mediante la aplicación SolarCT se obtuvo un ángulo aproximado de inclinación (tilt angle) de 21.6° de acuerdo con la localización por coordenadas seleccionada (latitud y longitud) como se puede observar en la figura 2.8, lo que implica que el ángulo obtenido de 19° está dentro del rango apropiado para el ángulo de inclinación óptimo del sistema.



Figura 2.7 Inclinación de panel utilizando aplicación

Considerado que los paneles se disponen en orientación sur con una inclinación de 19° e ingresando latitud y longitud de la ubicación específica por donde se movilizará la embarcación se obtiene la irradiación solar por medio de una fuente de datos (PVGIS).

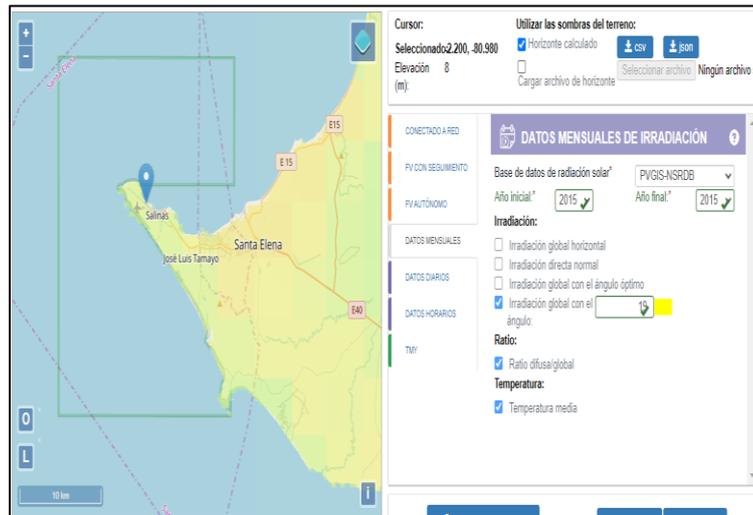


Figura 2.8 Interfaz PVGIS

Como esta plataforma muestra la irradiación solar por mes como se muestra en la figura 2.9, se procede a seleccionar el mes con la irradiación solar más desfavorable para el proceso de diseño.

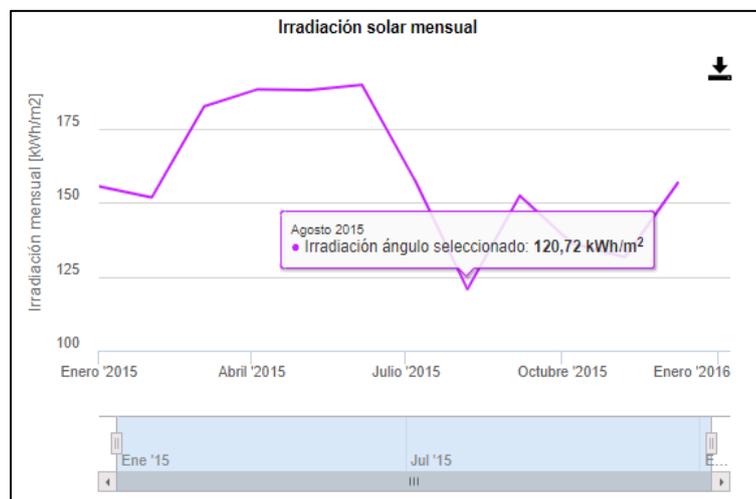


Figura 2.9 Irradiación solar en la provincia de Santa Elena

Una vez obtenido el valor de radiación en la península de Santa Elena en el mes más desfavorable (agosto) se puede establecer el valor de HSP (Horas de pico solar) con la ayuda de la ecuación 2.6 vista anteriormente.

2.4.8 Cálculo de corriente para la selección del regulador de carga MPPT

Para la selección del regulador de carga o también llamado seguidor de potencia, se tomará en cuenta la intensidad de corriente total de los paneles solares a utilizar conociendo que están conectados en paralelo. Hecho esto se determinará la intensidad mínima para la selección del regulador de carga mediante la ecuación 2.13.

$$I_{requerida} = I_{max} + 10\% I_{max} \quad (2.13)$$

Donde las intensidades están en unidades de amperios.

2.4.9 Cálculo de capacidad del cargador de baterías

Dado que la batería se descargará hasta un 80 y 85 por ciento en un día, se tomará en cuenta este valor aproximado de la cantidad de amperios – hora total del banco de baterías y se seleccionará un cargador que pueda proveer dicho valor. Ese análisis de capacidad requerida se puede determinar mediante la ecuación 2.14.

$$C_{cargador} = (CB - CB * \%Descarga) \quad (2.14)$$

Donde $C_{cargador}$ es la capacidad que debe cubrir el cargador de baterías en un tiempo de ocho horas.

2.5 Componentes

2.5.1 Componentes del sistema de gobierno

De la siguiente guía mostrada, basada en la eslora de la embarcación, tipo de embarcación y aplicación se elige la combinación adecuada:

BOAT LENGTH UP TO:	PLANING HULL				DISPLACEMENT HULL				SAIL	
	SINGLE ENGINE		TWIN ENGINE		SINGLE ENGINE		TWIN ENGINE		SINGLE ENGINE	
										
	Pleasure	Work	Pleasure	Work	Pleasure	Work	Pleasure	Work	Pleasure	Work
26FT (8.0M)	1	4	1	4	2	4	2	4	4	4
32FT (10.0M)	2	4	1	4	3	4	3	4	4	4
38FT (11.5M)	3	5	2	5	5	5	3	5	4	5
44FT (13.5M)	5	Ref	3	5	Ref	Ref	5	Ref	5	Ref
50FT (15.0M)	Ref	Ref	5	Ref	Ref	Ref	Ref	Ref	Ref	Ref

a) Displacement Hull – maximum hull speed does not normally exceed 18 knots.
b) Planing Hull – maximum hull speed normally exceeds 18 knots.

Figura 2.10 Guía de selección para sistema de gobierno

Se elige la combinación mostrada que corresponde la combinación # 4:

DESCRIPTION	QTY. REQ.	MODEL	PART NO.
4 4-1/4 Turns Lock to Lock			
Cylinder	1	BA150-7TM	HC5318
Helm	1	SeaStar II-Standard **	HH5272
Copper Tube	1	3/8" dia Copper Tube (note 2 & 3) or	
SeaStar Hose	1	SeaStar Outboard Hose (note 2 & 3)	HO5__
Oil	3	SeaStar Oil	HA5430
For Extra Steering Station Add:			
Helm	1	SeaStar II-Standard **	HH5272
Fitting Kit	1	Add a Station	HF5502
Extra Tube	1	3/8" dia Copper (note 2 & 3)	
Oil	1	SeaStar Oil	HA5430

Figura 2.11 Selección de elementos para sistema de gobierno

Tabla 2.5 Componentes del sistema de gobierno

Componente	Descripción	Imagen
Volante	Volante de acero inoxidable 316 de 15.5".	
Bomba hidráulica	Bomba hidráulica SEASTAR II HH5272.	
Cilindro hidráulico	Cilindro de dirección hidráulica SEASTAR BA150-7TM.	
Manguera de dirección hidráulico	Kit de manguera de dirección hidráulica SeaStar de longitud de 15 ft.	
Limeras	Limeras para eje de 1", se puede mecanizar en un taller nacional.	

Brazo	Brazo para dirección del timón con cuñero de 1/4", se puede mecanizar en taller nacional.	
Pala de timón	Pala de timón fabricado en acero inoxidable, se puede mecanizar en taller nacional.	
Ánodo de sacrificio	Ánodo de protección contra la corrosión del timón modelo RB-R2.	
Pernos, tuercas, anillos planos y de presión	Se utilizaran para asegurar todos los componentes del sistema.	

2.5.2 Componentes para el sistema de propulsión

Tabla 2.6 Componentes del sistema de propulsión.

Componente	Descripción	Imagen
Motor Eléctrico	Motor eléctrico ME1306 PMSM de 10kW de potencia continua, con controlador SEVCON y acelerador ET134, en sistema de 48V.	
Eje de transmisión	Eje de acero inoxidable AISI 304, 7/8" de diámetro.	
Prese Estopero	Prese Estopero para el eje de transmisión para eje de 7/8". Se puede mecanizar en talleres nacionales.	
Bocín	Bocín del eje, Jhonson Cutless 7/8" X 1-1/4" X 3".	

Arbotante	Espolon de apoyo del eje de transmision, se puede mecanizar en acero inoxidable en taller nacional.	
Helice	Hélice de bronce Dyna Yet de tres aspas de 10" de diámetro y paso de 6".	
Ánodo de sacrificio	Ánodo de protección contra la corrosión para el eje de transmisión de 7/8" CM-C02.	
Correa dentada	Correa HTD 640-8M-30.	
Chumacera	Chumacera para ejes de 7/8".	

Sistemas de poleas	Sistemas de poleas de 44 y 22 dientes, de relación 2:1.	
Base del motor	Esta base aloja el motor y el sistema de poleas para la transmisión de potencia. También contara con un templador para la correa dentada	

Cabe recalcar que al igual que el sistema de gobierno y eléctrico se utilizaran adecuadamente, los pernos, tuercas, anillos de presión y planos, entre otros elementos para que el sistema funcione correctamente.

2.5.3 Componentes electrónicos y eléctricos

Tabla 2.7 Componentes del sistema eléctrico

Componente	Descripción	Imagen
Bancos de baterías	Batería Estacionaria 600Ah 48V Ultracell UZS600.	

<p>Paneles solares</p>	<p>X2-133 EiTai 500 W PV Panel Solar 48 V Panel Solar Mono Panel Solar con TUV, IEC 96 celdas.</p>	
<p>Panel solar</p>	<p>Panel solar monocrystalino 48V 230 W HFP-230.</p>	
<p>Regulador de carga</p>	<p>Regulador de carga Victron MPPT Smart Solar 250/85.</p>	
<p>Cargador de baterías</p>	<p>Cargador de batería 48V Victron Skylla TG 25A IP21 (125-250 A-H).</p>	

2.6 Construcción del sistema de gobierno y propulsión.

Para la construcción de ambos sistemas se utilizarán los elementos antes descritos en las tablas 2.5, 2.6 y 2.7.

2.6.1 Sistema de gobierno

Para el ensamble de este sistema se debe acoplar la limera en la ubicación adecuada del casco, esto se hará mediante pernos, y silicón para hermetizar el acoplamiento. Después se acoplará el eje del timón que atraviesa el casco a una chumacera la cual deberá asentarse en un soporte hecho de madera revestido con fibra de vidrio. Realizado esto se unirán el brazo de movimiento y extremo del timón mediante una chaveta y una tuerca de seguridad en el extremo pasante de la pala. Para finalizar se unirá el brazo de movimiento al cilindro hidráulico mediante un perno pasante con tuerca, para permitir el movimiento del timón gracias al cilindro hidráulico conectado con el servo mediante mangueras hidráulicas.

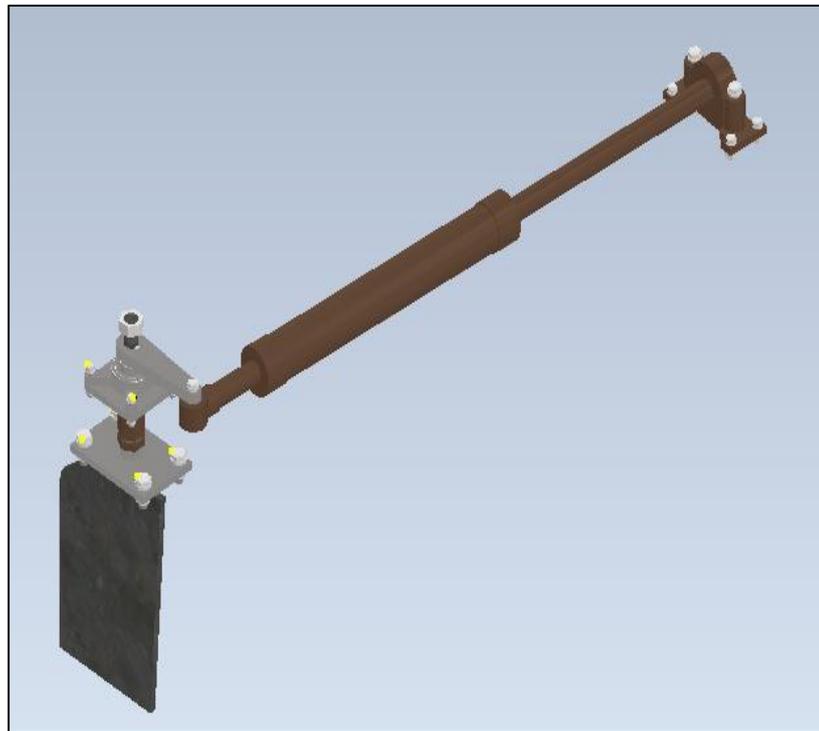


Figura 2.12 Esquema general del sistema de gobierno

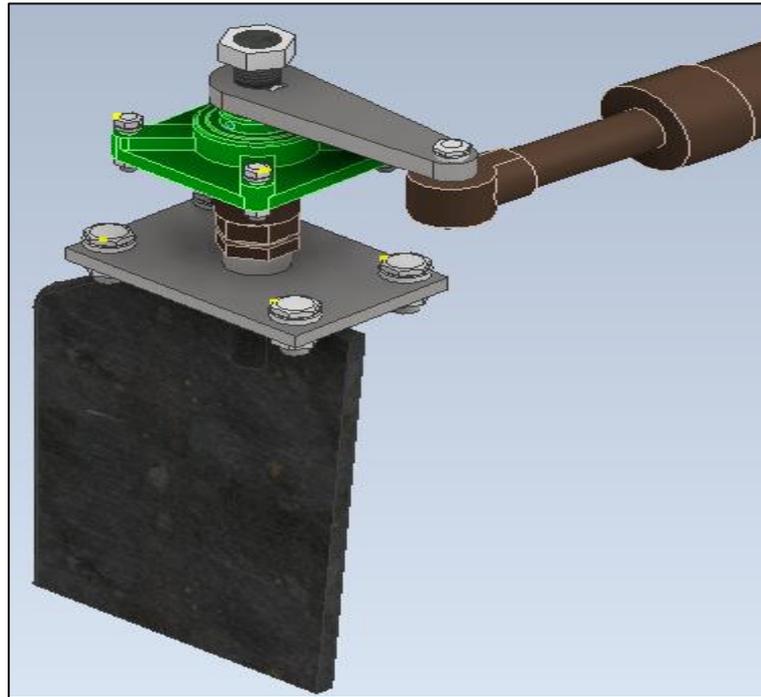


Figura 2.13 Esquema del mecanismo de movimiento del timón

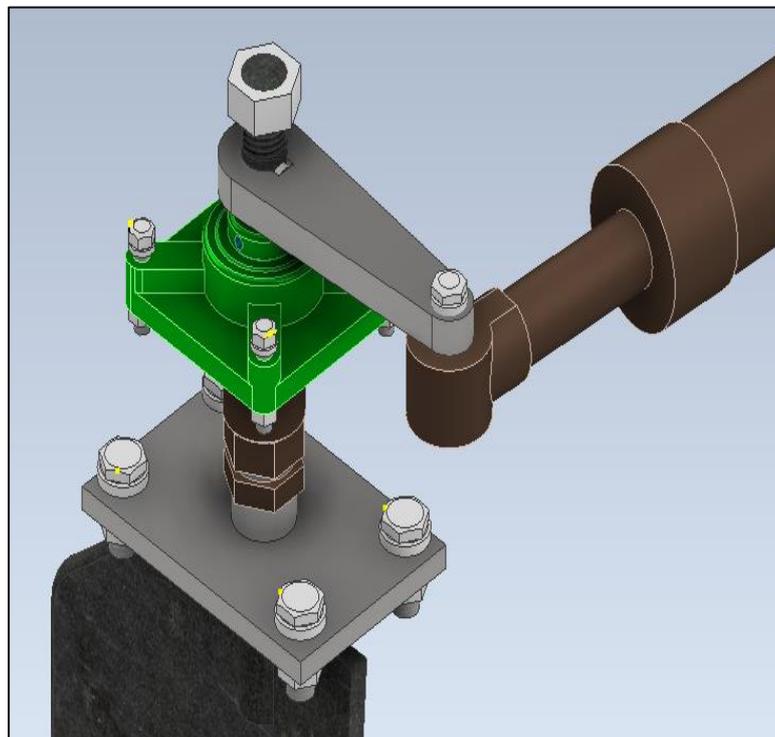


Figura 2.14 Brazo del timón, limera, chumace

2.6.2 Sistema de propulsión.

El sistema de propulsión se ensamblará en dos etapas, en la primera se acoplará el túnel del eje al casco de la embarcación. Después de esto preliminarmente se acoplará o alineará el motor en conjunto con las poleas, al eje de la hélice, esto se realiza para tomar medidas del arbotante que puedan permitir que el eje se alinea adecuadamente con las poleas y motor. Después con las medidas hechas se fabricará el arbotante y se instalará en conjunto con la hélice, motor, poleas, banda, chumaceras y preñe estopero.

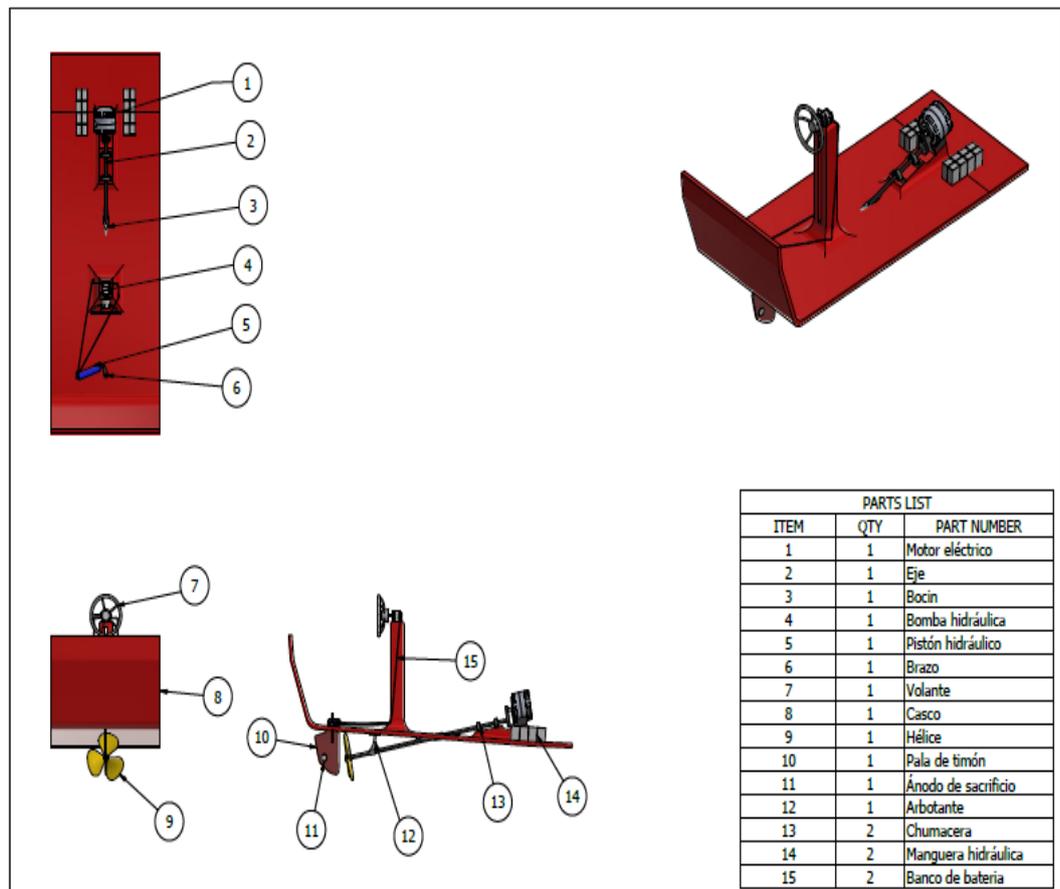


Figura 2.15. Ensamble del sistema de propulsión

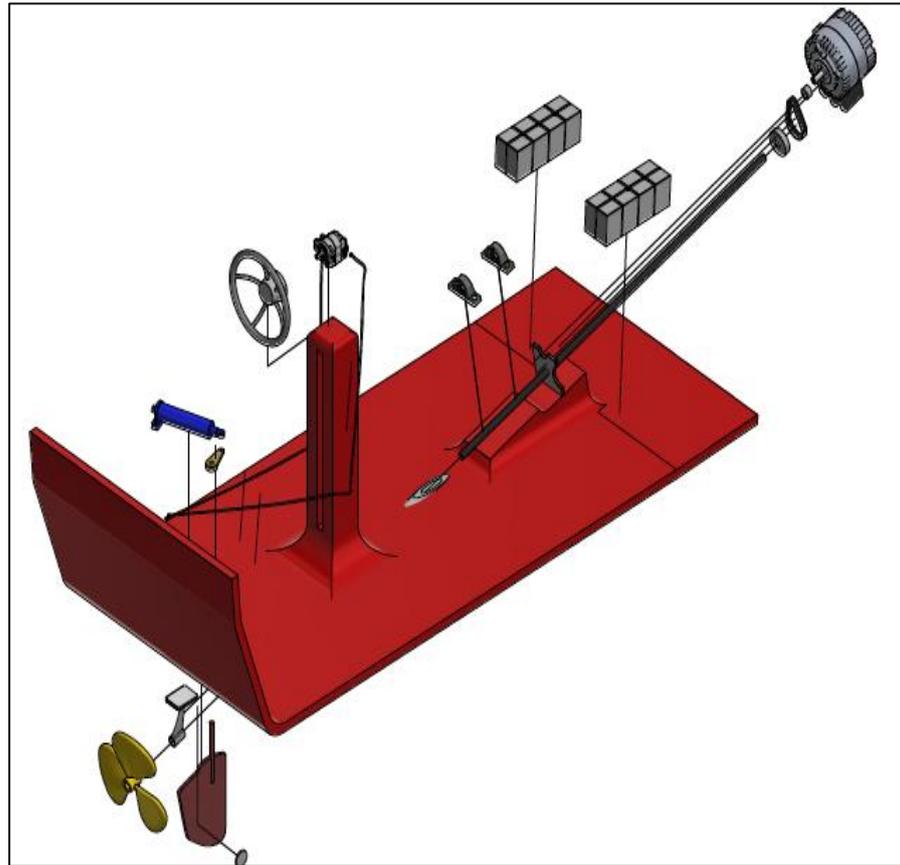


Figura 2.16. Vista en explosión del sistema de propulsión

2.6.3 Sistema eléctrico

Para el sistema eléctrico se conectarán las baterías, de 6V y 600 AH en serie para obtener dos bancos de 48V y 600 Ah cada uno, después estos se conectarán el paralelo para obtener así 48V y 1200 Ah como banco general. Esta capacidad es la requerida para la autonomía de diseño. Por otra parte, el controlador de aceleración y sentido de giro se conectará al motor de acuerdo diagrama de conexión que provee el fabricante. Y finalmente se conectará el controlador de carga MPPT en conjunto con el motor, banco de baterías y paneles solares como se muestra en la figura 2.17.

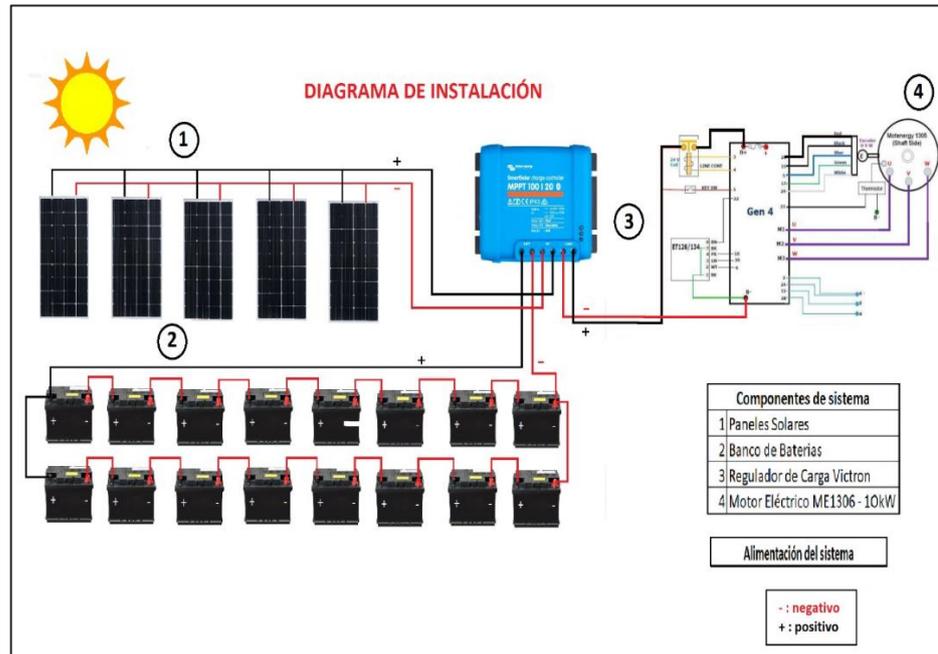


Figura 2.17 Esquema general de la conexión eléctrico

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Resultados

3.1.1 Potencia y consumo energético del motor

Del software MAXSURF con el casco modelado en 3D, tomando en cuenta varios parámetros hidrostáticos y definiendo el calado de diseño se generó la tabla 3.1 y se estableció la potencia total de 5.121 [kW] para lograr vencer la resistencia del agua de acuerdo con la velocidad de la embarcación en nudos.

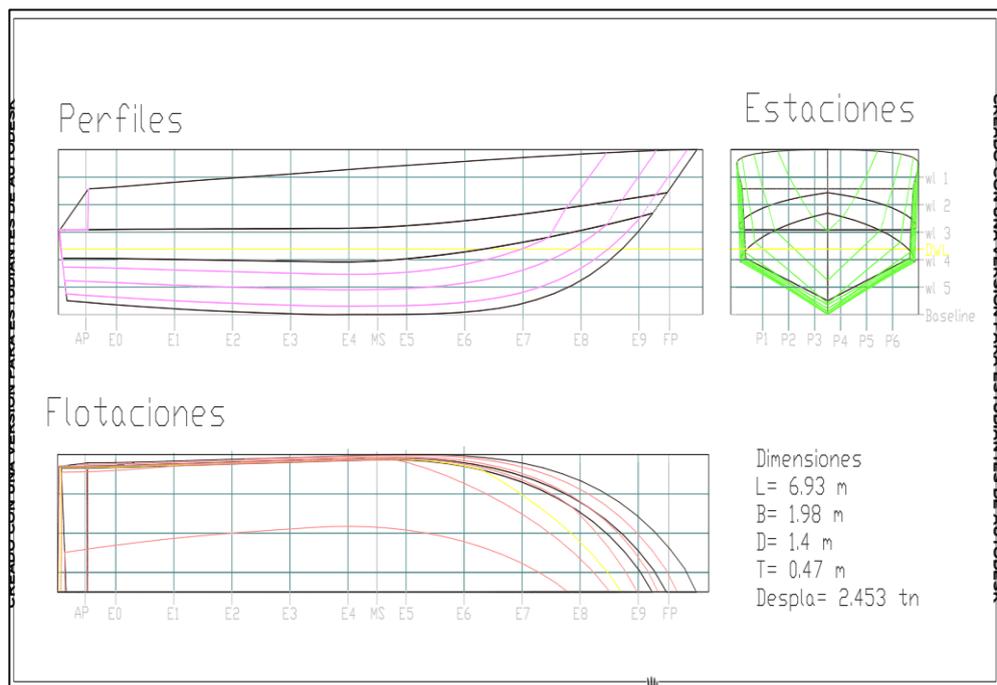


Figura 3.1 Dimensiones finales de la embarcación y su desplazamiento

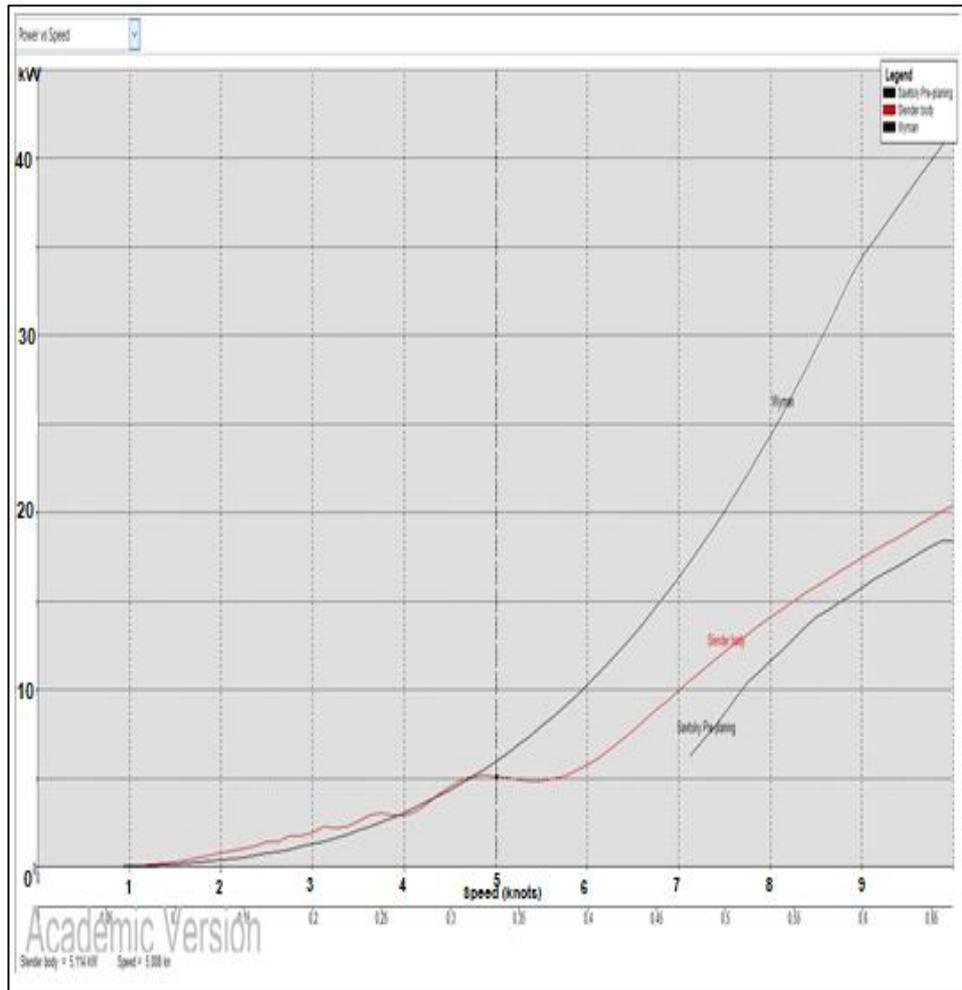


Figura 3.2 Curva de Potencia EHP [kW] vs velocidad [kn] del bote

Tabla 3.1 Potencia EHP y Resistencia calculada a varias velocidades

Datos		Resistencia		Potencia EHP	
Velocidad[kn]	Nº Froude	Slender Body[kN]	Wyman[kN]	Slender Body[kW]	Wyman[kW]
0	0	--	--	--	--
0,25	0,017	0	0	0	0,001
0,5	0,033	0	0	0	0,006
0,75	0,05	0	0,1	0,002	0,02
1	0,067	0	0,1	0,018	0,048
1,25	0,083	0,2	0,1	0,1	0,093
1,5	0,1	0,3	0,2	0,268	0,161
1,75	0,117	0,6	0,3	0,502	0,255
2	0,133	0,7	0,4	0,771	0,381
2,25	0,15	0,9	0,5	1,042	0,542
2,5	0,166	1,1	0,6	1,41	0,744
2,75	0,183	1,2	0,7	1,741	0,99
3	0,2	1,3	0,8	1,96	1,285
3,25	0,216	1,3	1	2,215	1,634
3,5	0,233	1,4	1,1	2,609	2,041
3,75	0,25	1,6	1,3	3,009	2,51
4	0,266	1,4	1,5	2,891	3,046
4,25	0,283	1,6	1,7	3,521	3,654
4,5	0,3	2	1,9	4,549	4,337
4,75	0,316	2,1	2,1	5,123	5,101
5	0,333	2	2,3	5,121	5,95

Para obtener el valor SHP se usó la ecuación 2.1 y por consiguiente la potencia BHP con la que se seleccionó el motor. Para la eficiencia propulsiva se consideró el rendimiento rotativo - relativo para embarcaciones de una sola hélice de 1.07 ya que esta eficiencia suele ser beneficiosa dado que se navega en aguas libres, llegando a obtener valores de rendimiento que oscilan entre un rango de 1 a 1,07 (Castañé, 2018, pp 54). En el caso de la eficiencia del sistema de poleas se asumió 0.92, y por último la eficiencia del propulsor o hélice se asumió un 75%. Con estos valores se pudo obtener finalmente una eficiencia propulsiva del 74% y por consiguiente una potencia para selección del motor de 6.9 [kW].

También se obtuvo el par que se entrega en el eje de la hélice usando la ec. 2.2.

$$T_{eje-hélice} = 2 * 197 = 394 lb - in = 46 Nm$$

Posteriormente, se hace uso de la ecuación 2.3 para hallar el consumo energético del motor ya conocida su potencia y el tiempo de autonomía de 8 horas.

$$E = P_{motor} * t = (6.9 kw)(8h) = 55.2 kw - h$$

Este consumo energético es el principal factor de diseño para la selección de los siguientes elementos del sistema ya que nos permitirá calcular la capacidad energética del banco general de baterías.

En cuanto al análisis de estabilidad de la embarcación se analizó el equilibrio longitudinal de ésta asumiendo la condición de carga con la distribución de las baterías en la ubicación de la sección media hacia popa, mientras que los paneles solares ubicados a lo largo del techo, obteniendo un ángulo máximo de trimado de 3.3° aproximadamente, es decir, el ángulo que forma la embarcación en su línea de flotación con respecto a la superficie del agua cuando este se encuentre en movimiento lo cual se puede observar en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Resultados obtenidos con la condición de carga establecida

Draft Amidships m	0,616
Displacement t	2,45
Heel deg	0,0
Draft at FP m	0,799
Draft at AP m	0,432
Draft at LCF m	0,588
Trim (+ve by stern) m	-0,366
WL Length m	6,492
Beam max extents on WL m	1,922
Wetted Area m ²	13,621
Waterpl. Area m ²	10,819
Prismatic coeff. (Cp)	0,676
Block coeff. (Cb)	0,440
Max Sect. area coeff. (Cm)	0,665
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,867
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	-0,244
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	-0,473
KB m	0,405
KG solid m	0,354
BMt m	0,800
BML m	8,841
GMt corrected m	0,851
GML m	8,892
KMt m	1,204
KML m	9,231
Immersion (TPc) tonne/cm	0,111
MTc tonne.m	0,052
RM at 1 deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	0,054
Max deck inclination deg	3,3112
Trim angle (+ve by stern) deg	-3,3112

Se estimó también la estabilidad a grandes ángulos para conocer si la embarcación tiende a escorarse con la carga aplicada como se muestra en la figura 3.2 donde se tiene el brazo adrizante (GZ) frente al ángulo de escora. Se obtuvo un máximo de 50° estando dentro del rango que establece la norma IMO para embarcaciones pequeñas menos de 24 m de eslora.

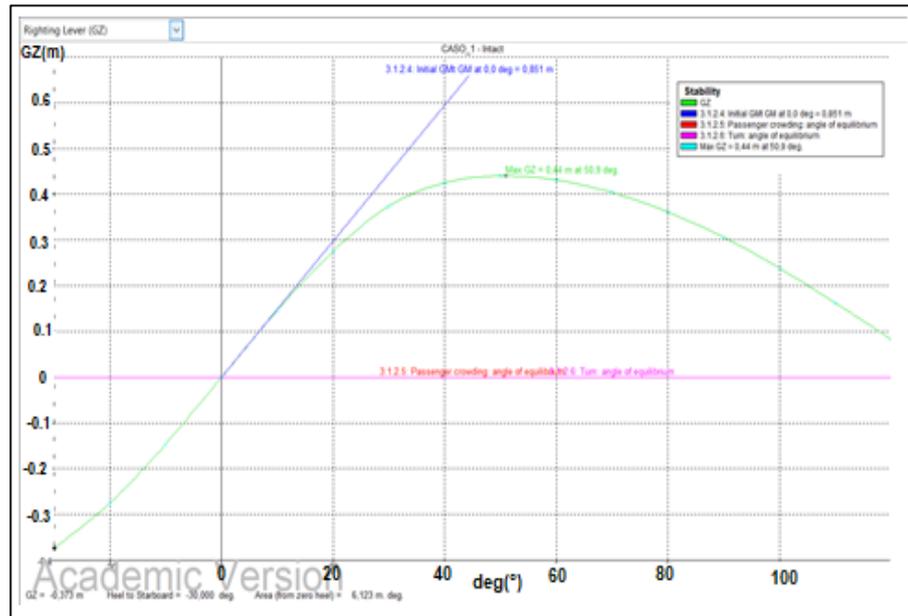


Figura 3.3 Brazo adrizante (GZ) con respecto al ángulo

Los resultados mostrados en la tabla 3.3 reafirman el cumplimiento con las normas establecidas por la Organización Marítima Internacional con respecto a embarcaciones de las dimensiones expuestas en este caso.

Tabla 3.3. Criterio IMO para embarcaciones menores de 24 m de eslora

Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
A.749(18) Ch3 - Design criteria applicable to all ships	3.1.2.1: Area 30 to 40	1,7189	m.deg	4,0315	Pass	+134,54
A.749(18) Ch3 - Design criteria applicable to all ships	3.1.2.2: Max GZ at 30 or greater	0,200	m	0,440	Pass	+120,00
A.749(18) Ch3 - Design criteria applicable to all ships	3.1.2.3: Angle of maximum GZ	25,0	deg	50,9	Pass	+103,64
A.749(18) Ch3 - Design criteria applicable to all ships	3.1.2.4: Initial GMt	0,150	m	0,851	Pass	+467,33
A.749(18) Ch3 - Design criteria applicable to all ships	3.1.2.5: Passenger crowding: angle of equilibrium	10,0	deg	0,0	Pass	+100,09

Por último, se obtuvo un diagrama (figura 3.4) donde se especifican los parámetros más relevantes de la estabilidad, donde se puede observar el centro de gravedad y el centro de boyantez de la embarcación.

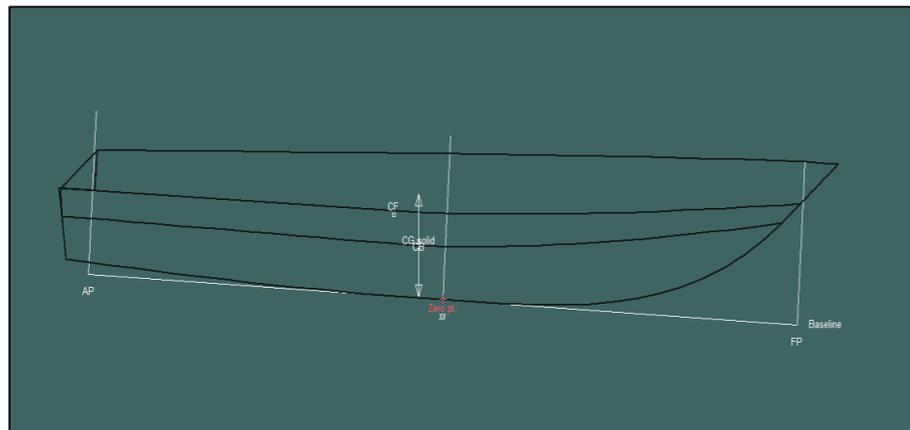


Figura 3.4 Equilibrio entre el centro de gravedad y el centro de boyantez

3.1.2 Diámetro del eje

Es importante que el eje sea diseñado para poder transmitir el torque generado, y de tal forma que no supere la resistencia a torsión del material. Por medio de la ecuación 2.4 se calculó el diámetro aproximado del eje en pulgadas.

$$D = \sqrt[3]{\frac{60 * SHP}{RPM}} = \sqrt[3]{\frac{60 * 9.2}{1750}} = 0.68''$$

Se recomienda escoger un diámetro superior de 7/8". Esta medida se encuentra disponible en acero AISI 304 en el mercado nacional. Cabe recalcar que la formula antes expuesta ya involucra un factor de seguridad implícito, por si se llegara a dar una falla en el material (Fonseca, 2014).

3.1.3 Cálculo del diámetro y paso de la hélice del motor

Se estimo el diámetro por medio de la ecuación 2.5 de 11" y el paso mediante la figura 2.5 el cual es aproximadamente de 12".

$$D = \frac{632.7 * 9.2^{0.2}}{1750^{0.6}}$$

$$D = 11''$$

Para la selección de la hélice se tomó en cuenta estos parámetros, y se consideró también el costo de la helice en relación con el número de aspas.

3.1.4 Número de paneles solares

Obtenido el valor de radiación en la península de Santa Elena en el mes más desfavorable (agosto) que es de $120,72 \text{ kw} \frac{\text{h}}{\text{m}^2}$ se puede establecer el valor de HSP (Horas de pico solar) por medio de la ecuación 2.6.

$$HSP = \frac{120,72 \text{ kw} * \frac{\text{h}}{\text{m}^2}}{1 \frac{\text{kw}}{\text{m}^2} * 31 \text{ días}} = 3,89 \text{ h}$$

Y se calculó el número de paneles solares por medio de la ecuación 2.7:

$$\# \text{ de paneles} = \frac{\text{Consumo energético}}{\text{Potencia del panel} * HSP} = \frac{\frac{\text{Wh}}{\text{día}} * \text{días}}{HSP * W}$$

$$\frac{6.9 \text{ kW} * \frac{8\text{h}}{\text{día}} * \frac{3}{7} \text{ días}}{3,89\text{h} * 500\text{W}} = \frac{23.65 \text{ kWh}}{1,95 \text{ kWh}} = 12.10 = \mathbf{13 \text{ Paneles}}$$

A continuación, se procedió a calcular la flexión para conocer el número adecuado de paneles que la estructura podría soportar teniendo en cuenta

la restricción geométrica que ofrece el techo de la embarcación lo que limitó el número de paneles a colocar. Se comenzó con el cálculo de las reacciones por medio de la ecuación 2.8. La estructura de fibra de vidrio tiene un largo de 5.9 metros con la carga distribuida que representan los paneles, pero en este caso se tomó la mitad de la estructura dado que es simétrica por lo que para 2 paneles de 27.5 kg y por los 2.95 metros de largo de la sección se obtiene una fuerza distribuida de 179.6 kN/m con dos apoyos.



Figura 3.5 Dimensiones del techo

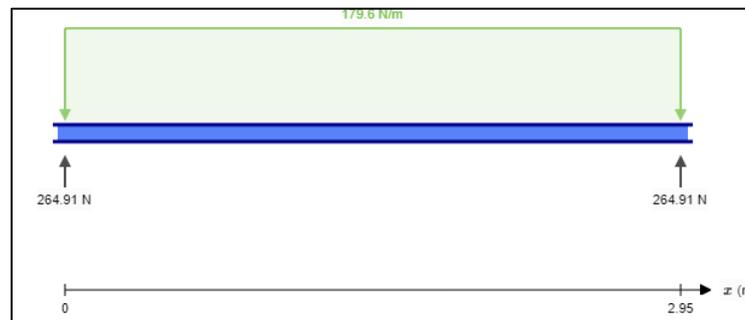


Figura 3.6 Fuerza distribuida sobre el techo

$$R = \frac{PL}{2} = \frac{179.6(2.95)}{2} = 264.91 \text{ N}$$

Obtenidas estas fuerzas que actúan sobre la estructura se puede establecer los diagramas de fuerza cortante y momento flector donde se puede observar un momento máximo de 195.37 Nm de acuerdo con la figura 3.8.

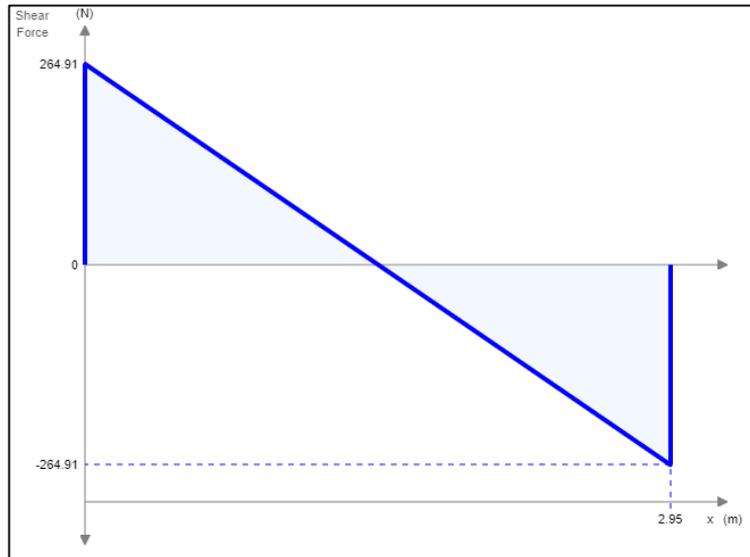


Figura 3.7 Diagrama de Fuerza cortante

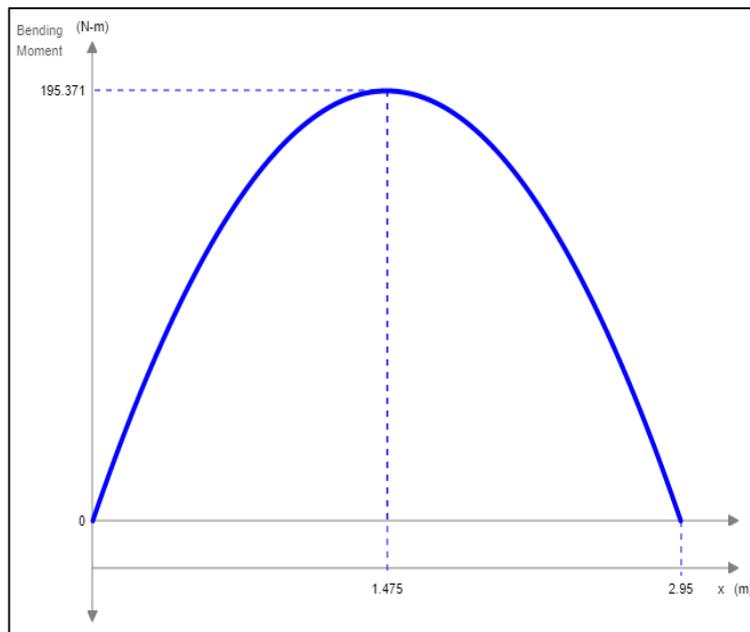


Figura 3.8 Diagrama de momento

Mediante la ecuación 2.9 se obtuvo un esfuerzo de fluencia máximo (σ_{max}) de 2.93 MPa.

$$\sigma_{max} = \frac{M}{S} = \frac{6M}{bh^2} = \frac{6 * 195.37 Nm}{2m * (1 * 10^{-2} m)^2}$$

$$\sigma_{max} = \frac{1172.22}{0.0004} = 2.93 \text{ MPa}$$

De acuerdo con resultados obtenidos para las propiedades mecánicas de la fibra de vidrio se obtiene una resistencia a la flexión de 106.62 MPa el mismo que se elevará en caso de incrementar el volumen de fibra en el material compuesto. (Taborda, Cañas, 2016)

La comparación entre el valor obtenido y la resistencia a la fluencia del material indica que la estructura puede soportar esa carga sin fallar por flexión en lo absoluto y se pudo concluir que es viable colocar la mayor cantidad de paneles solares donde la limitante a considerar fue solo la superficie del techo como se puede apreciar en la figura 3.9.

Al definir el número de paneles igual a cuatro paneles grandes y uno de menor tamaño se calculó la energía aportada por dichos paneles al sistema:

$$\text{Energía dada por paneles} = 3,89h * 500W * 4 + 230W * 3.89h = 8.7 \text{ kWh}$$



Figura 3.9 Ubicación de los paneles en el techo de la embarcación

3.1.5 Número de baterías

A través de la ecuación 2.11 se establece la capacidad de la batería a cubrir que resulta 1199 [A-H]. Para este consumo es importante tener en cuenta otros factores que intervienen en el desempeño de la batería que va a tener en un día de autonomía como lo es un porcentaje máximo de descarga en una batería de ciclo profundo del 85% y un 5% de pérdidas por temperatura y factores diversos.

$$CB = \frac{1 * (55.2 - 8.7)kWh}{0.85 * 48 * 0.95}$$

$$CB = 1199A - h$$

Se utilizó un total de 16 baterías de 6 V y 600 Ah cada una y para alcanzar los requerimientos se conectó en dos grupos 8 baterías en serie y cada grupo se conectó en paralelo donde se obtuvo un total de 1200 Ah en un sistema que funciona a una tensión de 48V.

Al tener esta cantidad de baterías se obtuvo un aproximado de energía aportada de 57.6 [kW-h] lo cual si se añade a la energía aportada por los paneles se obtiene un total de 66.3 [kW-h] que cubre eficientemente el consumo energético del motor por una autonomía de 8 horas.

3.1.6 Rendimiento global de la instalación fotovoltaica

El rendimiento global del sistema obtenido con la ecuación 2.12 es de un aproximado de 0.795 o 80%.

$$R = (1 - 0.05 - 0 - 0.1 - 0.05) \left(1 - 0.005 \frac{1}{0.8}\right) = 0.795 \cong 0.80$$

Este valor se considera aceptable para el rendimiento en una instalación fotovoltaica dado que supera los 75% de referencia para un sistema eficiente.

3.1.7 Corriente requerida para la selección del regulador de carga MPPT

Se obtuvo finalmente una corriente total máxima de los paneles de 50.62 [A].

Tabla 3.4 Intensidad corriente máxima de paneles

Tensión	Corriente máxima de paneles
48 V	$10,27 \text{ A} * 4 + 9,54\text{A} \cong 50.62 \text{ A}$

Con este valor se encontró la intensidad mínima del regulador con la ayuda de la ecuación 2.13.

$$50.62 \text{ A} + 10\% I_{max} = 55.7 \text{ A}$$

Teniendo en cuenta este parámetro se procedió a seleccionar un regulador con capacidad de 85 [A] que trabaja a una tensión de 48 [V] como es requerido para el correcto funcionamiento del sistema.

3.1.8 Capacidad del cargador de baterías

Mediante la ecuación 2.14 se puede obtener finalmente una capacidad a cubrir de 240 [A-h].

$$C_{cargador} = (1200 - 1200 * 0.80) = 240 \text{ A} - \text{H}$$

Este valor está dentro del rango de trabajo en A-h del cargador de baterías dado que fue seleccionado un cargador de baterías que trabaja en un rango entre 125 y 250 [Ah] a una tensión de 48 [V] como es requerido para el sistema y con este cargador las baterías estarán cargadas nuevamente en un periodo de ocho horas.

3.2 Análisis de costos

3.2.1 Costo de materiales

Algunos elementos como el arbotante, limera, o timón utilizados en la construcción del sistema de propulsión se pueden mecanizar en un taller nacional, y de esta forma se puede economizar gastos. En cuanto al motor, servo hidráulico, cilindro hidráulico, y los equipos que se utilizó para la aportación y gestión de energía se los encontró en el exterior por lo que se tendrían que importar. El precio total de los equipos es de \$ 14754 como se muestra en la tabla 3.5, cabe recalcar que también se tomaron en cuenta los costos de importación.

Tabla 3.5 Costo de los materiales

Descripción	Cantidad	Costo Unitario \$	Costo total \$
Volante	1	50	50
Bomba hidráulica SEASTAR II HH5272	1	640	640
Cilindro hidráulico SEASTAR BA150-7TM	1	600	600
Limera	1	50	50
Brazo para dirección del timón	1	40	40
Pala de timón	1	200	200
Ánodo de sacrificio	2	30	60
Kit de motor eléctrico 10 kW PMSM	1	2300	2300
Kit de soporte del motor	1	160	160
Sistema de reducción con poleas	1	90	90
Eje de transmisión	1	250	250
Prese estopero	1	60	60
Bocín del eje,	1	50	50
Arbotante	1	350	350
Hélice de bronce de tres aspas de 11" de diámetro por 12" de paso.	1	250	250
Banco de baterías 600Ah 48V Ultracell UZS600	2	3837	7674
Panel solar 500W 48V	4	180	720
Panel solar 230 W 48 V	1	170	170
Regulador de carga MPPT solar 250/85	1	1040	1040
Total			\$14754

3.2.2 Costo total de la implementación del sistema y viabilidad.

Para la instalación del sistema se tomó en cuenta el ensamblaje de todos los elementos en la parte mecánica y las conexiones en general de la parte eléctrica lo cual se estimó un valor de mano de obra de aproximadamente 650 dólares.

Tabla 3.6 Costo total

Descripción	Valor USD
Costo de equipos	\$14754
Costo mano de obra	\$650
Costo total	\$15404

En total se puede establecer un costo final del proyecto de aproximadamente \$15404 dólares. Se debe tener en cuenta que el mayor costo se debe a las baterías, debido a que son de ciclo profundo, lo que implica mayores ciclos de descarga. Para nuestro diseño se han estimado 2500 ciclos lo que significa una vida útil de alrededor de 5 años si se mantiene el debido cuidado y se respeta el porcentaje de descarga de diseño. Se menciona esto porque independientemente de las ganancias obtenidas de la embarcación, se puede decir que se tendrá un ahorro de \$ 5000 dólares anuales como mínimo en combustible artesanal según el consumo de una embarcación de la misma capacidad de pasajeros. Cabe recalcar que se tendrá una desventaja con respecto al costo de la implementación, ya que si comparamos se tiene un valor estimado de \$ 9500 en la instalación de un sistema de motor de combustión interna y los componentes necesarios para operar. Pero tomando en cuenta el ahorro mínimo anual de combustible y la duración de las baterías se tiene que el sistema es viable. Además de disminuir también los costos de mantenimiento del motor de combustión como lo son bujías, lubricantes, aceites entre otros. Además, se tendrá una reducción de 65% de ruido lo que mejora la comodidad de las personas a bordo, entre otros beneficios que llamará la atención tanto del propietario de la embarcación como del turista.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- De acuerdo con los resultados obtenidos en la tabla 3.1 se concluye que la embarcación alcanzará 5 nudos de velocidad para realizar los recorridos turísticos consumiendo 6.9 [kW] de potencia con 9 personas a bordo.
- Se concluye también que los componentes eléctricos y mecánicos para los sistemas de propulsión y gobierno cumplirán satisfactoriamente los requerimientos para que la operación de la embarcación sea segura.
- Se concluye también que la capacidad energética instalada a bordo de 66.3 [kW-h] cumplirá con la autonomía de la embarcación de 8 horas de trabajo de la embarcación.
- De los resultados de la simulación de estabilidad de la embarcación se concluye que el peso total de carga no afectará las condiciones de seguridad de la embarcación, esto teniendo en cuenta la distribución de carga ya establecida para equipos y personas a bordo.
- Con respecto al costo-beneficio de la instalación del sistema se tendrá un ahorro como mínimo de alrededor de \$5000 dólares anuales en gasolina artesanal, considerando una embarcación de igual capacidad de pasajeros, además de que el sistema en cuestión promueve la reducción de la huella ecológica y genera más confortabilidad para el turista al no existir contaminación auditiva a causa del ruido emitido como se da en embarcaciones con motores de combustión interna.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda mantener el casco de la embarcación, así como eje y hélice libre de broma, de lo contrario podría afectar la velocidad de la embarcación y también la autonomía de esta.

- También se recomienda incluir al menos un extractor de aire para poder mantener la temperatura adecuada del motor y controlador debido al trabajo continuo de estos equipos.
- Mantener las superficies de los paneles solares limpias ya que de lo contrario la eficiencia de estos puede disminuir un pequeño porcentaje.
- Se recomienda realizar un mantenimiento preventivo de los equipos y conexiones para mantener la eficiencia óptima de la instalación fotovoltaica.

BIBLIOGRAFÍA

Mikel Abasolo, Santiago Navalpotro. (s.f.). Diseño de máquinas, Transmisión por correas

Emsley J. (2001). Nature's Building Blocks. Recuperado 30 de agosto de 2020, de <https://www.lennotech.es/periodica/elementos/al.htm#Nombre>

Jara W. (2006). Apuntes de materiales en medios marinos. 10.

Fonseca A. (2014). Rename. Reconstrucción nacional de motores eléctricos S - Relación entre potencia y tamaño del eje.

Fernandez L. (2013). Dimensionamiento de una hélice para un buque tanque (7860kw) utilizando la serie b de wageningen calculada por expresiones polinómicas y cálculo dimensional de su eje de propulsión. 25.

Gerr D. (1989). Propeller handbook. The complete reference for choosing, installing, and understanding boat propellers.

Guerrero B. (2011). Equilibrio de los cuerpos flotantes. 4.

July, A. T. R., & Luz, A. C. M. (2017). Estudio comparativo de las propiedades mecánicas de la resina poliéster reforzada con fibra de bambú, como material sustituto de la fibra de vidrio. Recuperado 30 de agosto de 2020, de <https://www.redalyc.org/jatsRepo/496/49655539004/html/index.html>

Vilariño J. (2016). Índices de comportamiento del sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica y teoría de errores. vol. XXXVI.

Castañé C. (2018). Estudio y diseño de una hélice para el yate Viudes 45. 54.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Características y modelado de la embarcación

Tabla A-1 Dimensiones de la embarcación del proyecto

Eslora [m]	6.93
Manga [m]	1.98
Puntal [m]	0.9
Calado [m]	0.47
Desplazamiento [lbs]	5400

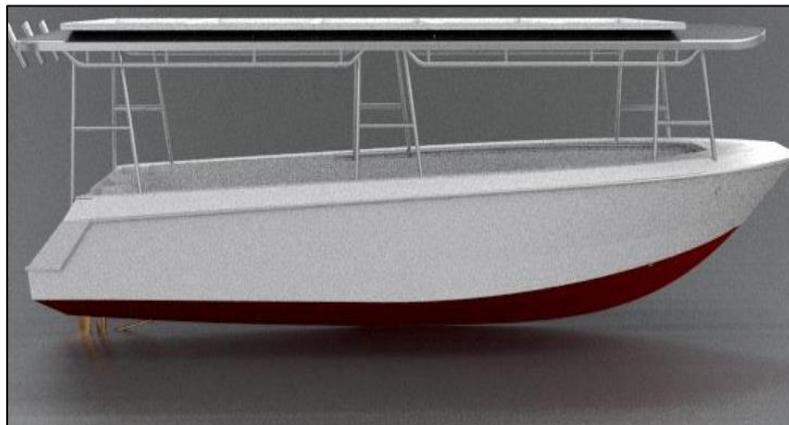


Figura A-1 Vista lateral de la embarcación

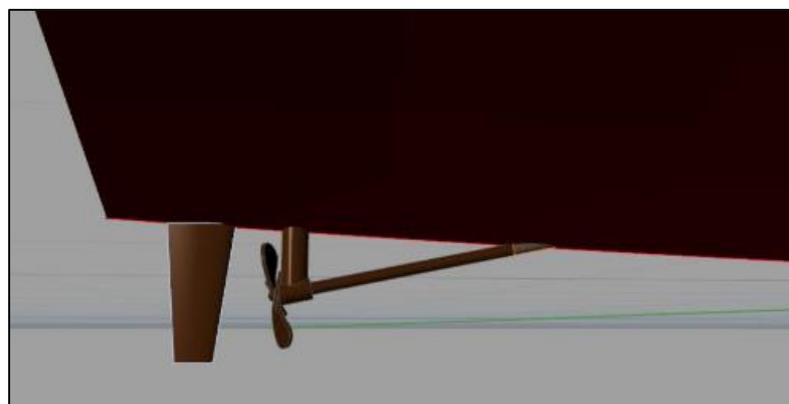


Figura A-2 Sistema de eje, hélice y timón

APÉNDICE B

Especificaciones de equipos

Tabla B-1 Especificaciones del motor eléctrico

Modelo	ME1306 PMSM
Potencia continua de salida	10 kW
Número de polos	4 (8 imanes)
Máxima velocidad del rotor	5000 RPM
Voltajes de entrada	24,48 y 96 V
Constante de torque	0.16 Nm/Amp
Peso	36 lb
Torque máximo de bloqueo	90 Nm
Inercia de la armadura	45kg*cm ²

Tabla B-2 Especificaciones de la batería a utilizar en los bancos

Modelo	Batería Estacionaria Ultracell UZS600
Voltaje	48 V
Energía útil almacenada	50%
Medidas de la batería	295 x 440 x 175 mm
Amperios - hora	600 A-h
Peso	52 kg

Tabla B-3 Especificaciones de panel de 500W

Modelo	ETM 450-500 W
Voltaje	48 V
Número de celdas	96
Material	Silicio monocristalino
Potencia	500 W
Dimensiones	1956*1310*40mm
Peso	27.5 kg

Tabla B-4 Especificaciones de panel 230W

Modelo	HFP-230
Voltaje	48 V
Número de celdas	44
Material	Silicio monocristalino
Potencia	230 W
Dimensiones	1970*670*3,5mm
Peso	4.3 kg

Tabla B-5 Especificaciones del controlador de carga MPPT

Modelo	Victron MPPT Smart Solar 250/85
Tensión	48 V
Corriente de carga nominal	85 Amp
Tipo	Mppt
Tensión sola máxima	250 V
Peso	5 kg

Tabla B-6 Especificaciones del cargador de baterías

Modelo	Victron Skylla TG 25A IP21
Tensión	48 V
Capacidad de carga	125 – 250 Ah
Peso	6 kg
Dimensiones	365 x 250 x 147 mm