

Diseño y Montaje de un Sistema Fotovoltaico para la Propulsión de una Embarcación Pesquera de 14 Pies de Eslora

Design and Assembly of a Photovoltaic System
for the Propulsion of a 14-foot Fishing Boat

Projeto e Instalação de um Sistema Fotovoltaico
para a Propulsão de um Barco de Pesca de 14 Pés

Víctor Alberto López Gutiérrez^a

Orlando Díaz Parra^b

Yolanda Torres Pérez^c

^a Maestría en Energías Renovables, Universidad
Pedagógica y Tecnológica de Colombia,

Facultad Seccional Duitama, E- mail:
victoralberto.lopez@uptc.edu.co

^b Escuela de Ingeniería Electromecánica,
Universidad Pedagógica y Tecnológica de
Colombia Facultad Seccional Duitama,
E- mail: orlando.diaz@uptc.edu.co

^c Maestría en Energías Renovables,
Universidad Pedagógica y Tecnológica de
Colombia Facultad Seccional Duitama,
E- mail:yolanda.torres01@uptc.edu.co

Resumen— El lago de Tota es un punto de confluencia para el turismo creciente en el departamento de Boyacá y la región, las actividades de pesca deportiva ocupan un lugar relevante dentro de la oferta turística de la región. El cambio climático y la demanda por la implementación de energías más limpias que reduzcan la emisión de CO2 es la realidad social y productiva a nivel mundial. En consecuencia, se plantea el diseño, construcción e implementación de un sistema fotovoltaico para la propulsión de una embarcación pesquera de 14 pies de eslora en aluminio con motor eléctrico. Para lo cual se ejecutaron los estudios de parámetros hidrodinámicos, económicos, financieros y de beneficios ambientales, los cuales contaron también con los cálculos electromecánicos y solares correspondientes. Se estableció un diseño funcional de una embarcación con un sistema fotovoltaico con autonomía diurna de 2 horas y 48 minutos, y en la noche de únicamente 38 minutos. En Colombia se requiere de mayores estudios que aporten soluciones sostenibles para las actividades donde se requiera el uso de embarcaciones ya que se cuenta con la radiación solar suficiente para la implementación de proyectos similares.

Palabras clave— Barco de pesca, Energía limpia, Motor eléctrico, Sistema fotovoltaico, Sustentabilidad.

Abstract— Lake Tota is a point of confluence for the growing tourism in the department of Boyacá and the region; sport fishing activities occupy a relevant place in the region's tourism offer. Climate change and the demand for the implementation of cleaner energies that reduce CO2 emissions is the social and productive reality worldwide. Consequently, the design, construction and implementation of a photovoltaic system for the propulsion of a 14-foot aluminum fishing boat with an electric motor is proposed. For this purpose, hydrodynamic, economic, financial and environmental benefit studies were carried out, which also included the corresponding electromechanical and solar calculations. A functional design was established for a boat with a photovoltaic system with daytime autonomy of 2 hours and 48 minutes, and nighttime autonomy of only 38 minutes. In Colombia, further studies are required to provide sustainable solutions for activities that require the use of boats, since there is sufficient solar radiation for the implementation of similar projects.

Keywords— Fishing vessel, Clean energy, Electric motor, Photovoltaic system, Sustainability.

Resumo— O Lago Tota é um ponto focal para o crescente turismo na região, e as atividades de pesca esportiva ocupam um lugar importante na oferta turística da região. Em diferentes partes do mundo, eles já estão disponíveis como uma solução e, apesar de usarem fontes de energia renováveis, ainda apresentam dificuldades em seu projeto. Consequentemente, é proposto um projeto de pesquisa para projetar e construir um sistema fotovoltaico para a propulsão de um barco de pesca de alumínio de 14 pés com um motor elétrico. Para isso, foram realizados estudos de parâmetros hidrodinâmicos, econômicos, financeiros e de benefícios ambientais, que incluíram os cálculos correspondentes para o caso contextualizado sob investigação. Foi estabelecido um projeto funcional com uma autonomia diurna de 2 horas e 48 minutos e noturna de apenas 38 minutos.

Palavras chave— Embarcação de pesca, Energia limpa, Motor elétrico, Sistema fotovoltaico, Sustentabilidade.

I. INTRODUCCION

La movilidad eléctrica marítima y fluvial solo aparece a finales del siglo XX en pequeñas embarcaciones y a principios del siglo XXI se incorpora la energía fotovoltaica para contribuir en forma parcial o total a la recarga de baterías. La tecnología para la gestión de la energía eléctrica ha mejorado sustancialmente con sistemas PWM Pulse Width Modulation (Modulación por ancho de pulso) y MPPT (Maximum Power Point Tracking, o seguidor del punto de máxima potencia) (De la Llana, 2011; Zagarra, 2021).

Ahora bien, la movilidad fluvial con el uso de sistemas fotovoltaicos inició con el transporte por medio de pequeñas embarcaciones, las cuales solo pueden soportar cargas reducidas de materiales y pasajeros. No obstante, cada vez hay más estudios que señalan avances importantes para garantizar el uso de energías limpias en la industria naval pesquera y de transporte (Campillo et al., 2019; Nugraha et al., 2022; Yüksel et al., 2023). Esta realidad ha logrado demostrar que existen alternativas diferentes al uso de combustibles tradicionales y que además son usados de manera sostenible en la actualidad, como se muestra en la Fig. 1, la cual identifica que hay cambios en el uso del tipo de fuente de energía en los distintos tipos de uso de las embarcaciones tanto de carga como de pasajeros.

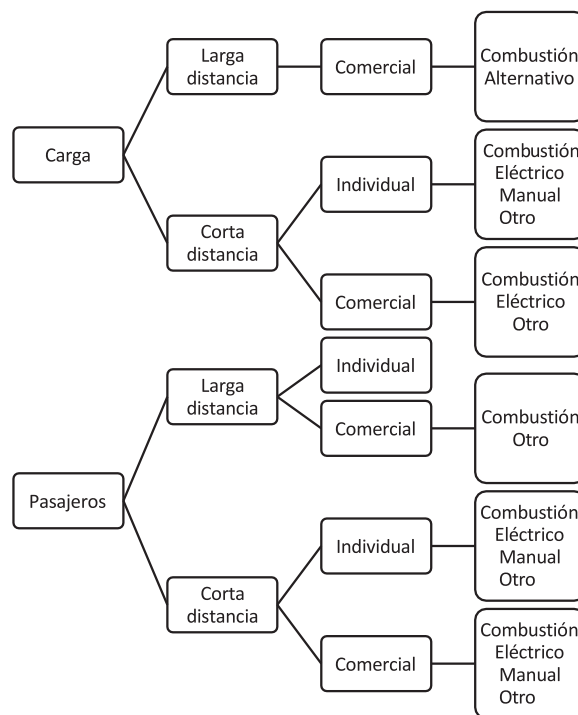


Fig. 1. Dimensiones de la navegación según movilidad fluvial. Fuente: (Ciacciarelli et al., 2020, p. 24).

A lo anterior se suma que en el presente hay mayores esfuerzos porque el uso de las energías alternativas para el transporte con embarcaciones sea mayor, esto a fin de mitigar los factores que aceleran el cambio climático y consolidar actividades sostenibles, incluso en el mejoramiento del tráfico interno de las ciudades, como un tipo de alternativa para mejorar la movilidad, reducir el impacto de contaminación medio ambiental y propiciar actividades turísticas (Petkovic et al., 2020).

En el estudio de Campillo et al., (2019) se analizan diferentes alternativas para el transporte de pasajeros con botes. Allí se presentan algunos casos de éxito en Ecuador, Bangladesh e India con capacidades de 15 pasajeros y 72 pasajeros, además de velocidades

medias de 3 y 5,5 nudos. Asimismo, en el trabajo de Petkovic et al., (2020) son estudiadas algunas embarcaciones con velocidades de entre 5 a 30 Nudos, contruidos para su funcionamiento con sistemas fotovoltaicos, lo cual generó en el diseño de una embarcación con características óptimas para su uso en Split, Croacia, para el transporte de pasajeros desde el aeropuerto, con una velocidad de 16 y 30 nudos y capacidad de 70 y 400 sillas, siendo opciones viables para la ciudad.

De otro lado, López (2021) diseñó la adaptación de un sistema solar fotovoltaico para una embarcación de 8 m de eslora, se hicieron los respectivos cálculos y se pudo demostrar que la adaptación es mucho más eficiente que el uso de un sistema Diesel, lo cual obedece a la calidad de las nuevas tecnologías y el retorno de la inversión en el tiempo. Por otro lado, el trabajo realizado por Puig (2022) se centró en una embarcación de 5,98 m de eslora y con una capacidad máxima de 9 pasajeros, el cual se diseñó con una velocidad máxima de 6,5 nudos y resultó ser eficiente, cumpliendo con las expectativas de reducción de la contaminación.

También, se han realizado investigaciones en donde se busca la máxima eficiencia de los sistemas de energía solar fotovoltaica, como es el caso de la investigación elaborada por Ghenai et al., (2019) quienes propusieron un sistema híbrido para un ferry ubicado en Dubai. En el estudio implementaron el uso de celdas de energía y un generador de

Diesel, combinados con el sistema fotovoltaico. El experimento y las mediciones arrojó que, a pesar de un pequeño incremento en el costo global de compra y funcionamiento del vehículo, se obtuvo una reducción de emisiones del CO₂ en promedio del 15%. Este hallazgo también sirvió para evidenciar que las energías limpias pueden ser híbridas para magnificar su eficiencia, incluso proponen estudios posteriores con el uso de la electrólisis de hidrógeno para reducir aún más los costes y las emisiones de CO₂.

En el marco de las consideraciones hasta aquí expuestas se ha encontrado la oportunidad de aprovechar el diseño de embarcaciones con el uso de sistemas fotovoltaicos en zonas de posible impacto turístico y productivo, como lo es el caso del lago de Tota. Con lo cual se plantó como objetivo principal el de diseñar un sistema fotovoltaico para la propulsión de una embarcación pesquera de 14 pies de eslora en aluminio con motor eléctrico fuera de borda para el Lago de Tota.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Se planteó una investigación de enfoque cuantitativo y de tipo aplicada, en donde se aplicaron conocimientos específicos y cálculos comprobados para explicar un diseño novedoso con aplicabilidad práctica real (Hernández et al., 2014). El trabajo de investigación se ejecutó con los diferentes elementos técnicos necesario para el desarrollo integral de la embarcación.

A continuación, se presentan algunos parámetros y características de diseño para el proyecto:

A) Parámetros hidrodinámicos

Fueron definidos uno a uno los parámetros navales de casco, eslora, manga, puntal, francobordo, calado, asiento, desplazamiento en agua dulce, número de Froude, resistencia hidrodinámica.

$$\text{Número de Froude } Fr = \frac{u}{\sqrt{\frac{g \cdot A}{T}}} \quad (1)$$

Donde:

Fr: Número adimensional de Froude

g: Aceleración de la gravedad: m/s²

u: Velocidad media de la sección del canal: m/s

A: Área de la sección transversal del flujo: m²

T: Ancho de la lámina libre: m

Coeficiente total de resistencia "CTS"

$$C_{TS} = \frac{R_{TS}}{\frac{1}{2} \rho V_S^2 S_s} \quad (2)$$

Donde

R_{TS}: Es la resistencia total de la embarcación

ρ: Es la densidad del fluido

V_S: Es la velocidad de la embarcación

S_s: Es el área de la superficie mojada del casco.

En la Tabla 1 se presenta la descomposición de la resistencia para diferentes tipos de embarcaciones operando a diferentes números de Froude. Aquí también se observa cómo va cambiando el coeficiente total de resistencia para cada una de las embarcaciones (CTS).

Tabla 1. Coeficiente total de resistencia para diferentes tipos de embarcación.

Quantity	Tanker	Containership	Fishing Vessel	Planing Boat
Lengh LWL (m)	316	248	23	22,5
Beam B (m)	56	30	7	-
Drafft T (m)	20	9,5	2,5	-
Speed V _s (knots)	16	23	10	40
Froude number Fr	0,15	0,24	0,34	1,4
Reynolds number Rn x 10 ⁻⁹	2,6	2,9	0,12	0,46
Total, resistance coefficient C _{TS} x 10 ³	2,2	2,3	8,1	5,4

Fuente: (Kim et al., 2017).

Se estableció la resistencia viscosa en función del coeficiente total de resistencia para diferentes embarcaciones y números de Froude (Kim et al., 2017). Para C_{TS} pequeños por ejemplo 2.2 x 10⁻³ la resistencia para romper las olas es del 5%; la resistencia al patrón de las olas es del 2,5%; la resistencia por efecto de la forma del casco en la densidad de líneas de flujo y por ende en la presión es del 15%; el efecto de la forma del casco en la fricción representa un 5%; el efecto de la rugosidad del casco representa un 7,5%; el efecto de la fricción de placa plana representa la mayor parte de la resistencia hidrodinámica 65%. En cambio, para C_{TS} mayores, por ejemplo 2,2 x 10⁻³ la sola resistencia al patrón de las olas representa más de la mitad (57.5%) de la resistencia hidrodinámica.

B) Características físicas de la embarcación

Tipo de embarcación = Bote casco en "V" profunda

Eslora máxima = 4.2 m

Manga máxima = 1,5 m
 Puntal = 0,5 m
 Francobordo = 0,30 m
 Calado = 0,1 m
 Peso sin carga = 70 Kg
 Material = Aluminio Naval calibre 2 mm.

El casco en V, es el más usado entre las embarcaciones de recreo. Dentro de este tipo de cascos, se encuentra la V profunda. La V profunda tiende a tener una entrada más suave en el agua, se enfrenta mejor a las olas y proporciona una navegación más suave en aguas agitadas.

C) Pruebas de la resistencia hidrodinámica

Se hicieron pruebas de laboratorio para la resistencia hidrodinámica. En la Fig. 2 se muestra un diagrama de la embarcación con las fuerzas externas que actúan, análogicamente la resistencia hidrodinámica mediante un coeficiente de rozamiento global μ_H . Aunque no es totalmente proporcional a la fuerza normal, en el caso de la aplicación de la ley de la conservación de la energía puede evaluarse una resistencia hidrodinámica global.

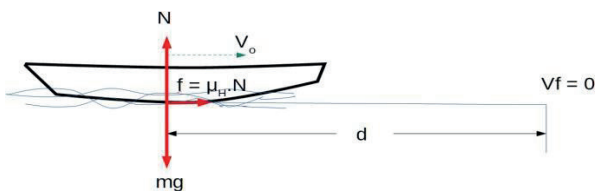


Fig. 2. Diagrama de cuerpo libre de la embarcación
 Fuente: Autor.

La embarcación tiene una velocidad inicial V_0 que ha adquirido por propulsión propia. Luego se deja deslizar libremente

la embarcación, con el motor apagado, esperando que se detenga, esto mientras se mide el tiempo durante el deslizamiento, y se realizan los siguientes cálculos:

$$\frac{1}{2} m V_o^2 = \mu_H m g d \quad (3)$$

Donde:

m: masa de la embarcación (Kg).

V_0 : Es la velocidad inicial.

μ_H : Coeficiente hidrodinámico global de rozamiento

mgd: Masa de la embarcación (Kg). Aceleración de la gravedad (9,8m/s²). distancia recorrida (m)

Simplificando la ecuación (3) se obtiene:

$$\frac{1}{2} V_o^2 = \mu_H g d \quad (4)$$

Si se aplican las ecuaciones básicas de cinemática:

$$0 = V_o^2 - 2 \cdot a \cdot d \quad (5)$$

$$0 = V_o - a \cdot t \quad (6)$$

Donde:

a: Aceleración de la embarcación (m/s²)

V_0 : Es la velocidad inicial.

d: Distancia recorrida (m)

t: Tiempo transcurrido (s).

Reemplazando las ecuaciones (5) y (6) en la ecuación (4) se obtiene:

$$\mu = \frac{V_o}{g \cdot t} \quad (7)$$

De esta manera se puede hallar la fuerza hidrodinámica promedio de una embarcación:

$$F_H = \mu_H m \cdot g \quad (8)$$

Con el valor de μ_H , se halló la resistencia hidrodinámica en forma global. Las condiciones adecuadas de las pruebas fueron: viento y aguas en calma, velocidades típicas de la actividad de pesca deportiva (Tabla 2).

A continuación, en la tabla 2 se presenta los cálculos para el coeficiente total de resistencia según diferentes velocidades iniciales y tiempo empleado para detenerse.

Tabla 2. Coeficiente total de resistencia para la embarcación propuesta.

Prueba	V0 (m/s)	t (s)	μ_H (V0/(gt))	FH
1	0	0	N/A	N/A
2	0,514	10	0,0052	3,56
3	0,823	17	0,0049	3,36
4	1,1	22	0,0051	3,49
5	1,38	35	0,0040	2,74
6	3,05	62	0,0050	3,43
Promedio				3,316 Nw

Fuente: Autor.

D) Selección del motor

Para la selección del motor de la embarcación, se tuvieron en cuenta los parámetros hasta ahora calculados y las características del lago, sin corrientes naturales de agua. Con lo cual se seleccionó un motor con empuje de 33 Lbs equivalentes a 14,97 Kgf, además puede desarrollar una velocidad de 10 Km/h (Torqueedo, 2020) (Fig. 3).



Fig. 3. Motor Torqueedo® Ultra light 403 A/AC 1103 AC Fuente: (Torqueedo, 2020).

E) Dimensionamiento del generador solar fotovoltaico

Con base en la ficha técnica del motor seleccionado se consideró que la batería óptima para el funcionamiento es de Litio de 320 Wh, aclarado este punto se debe tener en cuenta la radiación solar del Lago de Tota, la cual es en un promedio de 5,109 KWh/m² (Global Solar Atlas, 2022). Ahora bien, a fin de garantizar la mayor eficiencia posible del sistema se tomó el promedio mínimo de irradiación solar plurianuales con un valor de 99,5 kWh/m² (Global Solar Atlas, 2022). Luego, se calculó el valor diario de irradiación con la siguiente fórmula:

$$Promedio = \frac{99,5 \frac{kWh}{m^2 \cdot mes}}{30 \frac{días}{mes}} = 3,31 \frac{kWh}{m^2 \cdot día} \quad (9)$$

Las unidades del valor de irradiación solar se pueden tomar como Horas Sol Pico (H.S.P.) debido a que todos los módulos solares vienen referenciados con base en condiciones standard de prueba (STC) de 1000 W/m². Entonces, la potencia fotovoltaica mínima requerida se calcula de la siguiente manera:

$$Potencia = \frac{320Wh/día}{3,31h/día \times 0,7} = 138,1W_{FV} \quad (10)$$

Donde 0,7 es una eficiencia global típica de una planta solar autónoma.

Para la selección del panel solar se tuvo en cuenta que ocupará poca área con buena eficiencia, siendo la referencia UNISUN 200.24 M la adecuada (UNITECK, 2022) (Tabla 3). A continuación, en la tabla 3 se pueden observar las características técnicas del panel solar seleccionado para la embarcación:

Tabla 3. Características del panel solar UNISUN 200.24 M.

Potencia máxima (Pm)	200 W
Tolerancia de potencia	0/+3 %
Potencia de servicio	24 V
Tecnología	mono
Tensión a la potencia máxima (Vmp)	35,6 V
Intensidad a la potencia máxima (Imp)	5,62 A
Tensión en vacío (Voc)	42,7 V
Intensidad en cortocircuito (Icc/Isc)	6,07 A
Eficiencia de las células	20,60%
Eficiencia de los módulos	15,8%

Fuente: (UNITECK, 2022).

La energía generada en un día por el panel solar como mínimo se calculó de la siguiente manera:

$$Energía\ mínima = 200W \times 3,31 \frac{h}{día} \times 0,7 = 463,4 \frac{Wh}{día} \quad (11)$$

Como el tiempo de recarga es inversamente proporcional a la potencia fotovoltaica del módulo, entonces el tiempo máximo de recarga es:

$$Tiempo\ máx = \frac{320Wh \times 12 \frac{h}{día}}{463,4 \frac{Wh}{día}} = 8,28h = 8h17min11,6s \quad (12)$$

Debido a que este tiempo puede ser muy grande en la práctica tendría que sacrificarse un día completo de trabajo de la embarcación. Por este motivo se debe potenciar más la cantidad de módulos solares siempre que el área de la embarcación así lo permita. Para que el generador fotovoltaico sea equilibrado y tenga el voltaje de Maximum Power Point Tracker MPPT, que traducido al español es "Seguidor del punto de máxima potencia" adecuado se instalan dos módulos de 200 Watts/24VDC con las especificaciones de la tabla 3. El espacio disponible en la embarcación permite como máximo 2 módulos solares de 200 Watts.

Tiempo máximo de carga. La potencia generada con los módulos solares en condiciones de cielos nublados de acuerdo a la experiencia docente y datos tomados del laboratorio del Centro de Entrenamiento en Energías Renovables FUNCENER es del orden del 20% de su potencia nominal. (Autor material: Luis Gabriel Becerra R), se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Cielos nublados} = 200W \times 2 \times 0,2 \times 0,7 = 56W \quad (13)$$

Como el tiempo de recarga es inversamente proporcional a la potencia fotovoltaica total, entonces el tiempo máximo de recarga es:

$$\text{Cielos nublados} = \frac{320Wh}{56W} = 5,714h = 5h = 2min51,4s \quad (14)$$

Tiempo mínimo de recarga. Se tiene en cuenta que existen condiciones de irradiancia solar de $1000W/m^2$ y los módulos solares están generando su potencia nominal.

$$\text{Potencia máx} = 200W \times 2 \times 0,7 = 280W \quad (15)$$

Para calcular el tiempo mínimo de recarga, se divide la energía máxima de la batería entre la potencia máxima de generación fotovoltaica:

$$\text{T tiempo mínimo} = \frac{320Wh/día}{280W} = 1,14h = 1h8min34,3s \quad (16)$$

Este tiempo de recarga es el requerido en el caso de cielos totalmente despejados e irradiancias solares de $1000W/m^2$.

Tiempo máximo de autonomía nocturna. Para esto se evaluó la autonomía neta cuando no existe radiación solar y solo se dispone de la energía reservada en las baterías. Según la ficha técnica del motor seleccionado, la potencia de consumo es de $400W$ y la energía máxima que pueden almacenar se puede calcular teniendo en cuenta que este tipo de baterías no se deben

descargar al 100% porque su vida útil se reduce. Normalmente la profundidad de descarga no debe superar el 80%. Entonces el tiempo de autonomía nocturna es:

$$\text{T tiempo nocturno} = \frac{320Wh \times 0,8}{400W} = 0,64h = 38min24s \quad (17)$$

Tiempo mínimo de autonomía diurna. En este caso se tuvo en cuenta que los módulos solares están captando radiación solar en condiciones de tiempo nublado. Estas condiciones son muy variables, pero se toma el parámetro de un 20% de la irradiancia solar nominal, es decir que de los $1000W/m^2$, solamente se interceptan $200W/m^2$. La potencia fotovoltaica de generación es:

$$\text{Potencia cielos nublados} = 400W \times 0,2 = 80W \quad (18)$$

En las condiciones en que las baterías están suministrando su carga y a su vez, los módulos solares están generando $80W$ con cielos nublados, el tiempo mínimo de autonomía diurna se calcula de la siguiente manera: solar al potencial de carga nominal de las baterías de Litio. El valor de esta corriente se calcula así:

$$\text{T tiempo mín diurna} = \frac{320Wh \times 0,8}{400W - 80W} = 0,8h = 48min \quad (19)$$

Tiempo máximo de autonomía diurna. Los módulos fotovoltaicos están generando a su potencia nominal debido a que se consideran condiciones de cielos despejados,

$$Tiempo\ máx\ diurna = \frac{320Wh \times 0,8}{400W - 400W \times 0,7} = 2,133h = 2h8min \quad (20)$$

Por lo anterior, el tiempo de autonomía es el máximo cuando existen condiciones de cielos despejados.

F) Dimensionamiento del controlador solar

Esta corriente está determinada por la potencia del módulo solar al potencial de carga nominal de las baterías de Litio. El valor de esta corriente se calcula así:

$$Corriente\ máxima\ de\ regulador = \frac{400W}{29,6V} = 13,51A \quad (21)$$

El voltaje de circuito abierto de cada módulo solar es de 42,7V; conectando los dos módulos en serie el voltaje máximo de circuito abierto es de 85,4V. De esta manera se pueden reducir las pérdidas en los conductores porque el voltaje de transmisión es más alto. De acuerdo a este voltaje y a la corriente máxima de la ecuación (20) se seleccionó el controlador más eficiente. El controlador más adecuado es el controlador MPPT 100/30 de la marca VICTRON (Victron Energy, 2022). La especificación 100 se refiere al voltaje máximo admisible en la entrada donde se conectan los paneles solares. La especificación 30 se refiere a la corriente máxima de carga que puede suministrarse hacia las baterías.

G) Dimensionamiento de componentes auxiliares

Para el dimensionamiento de los componentes auxiliares como conductores, ductos y protecciones contra sobre voltajes y contra sobre corrientes, se realizó de acuerdo a la norma RETIE Literal j), el cálculo económico de conductores, se desarrolló teniendo en cuenta todos los factores de pérdidas, de la sección 10.1.1 de la norma.

En la tabla 4, se muestran los valores base para el cálculo de la sección de los conductores que conectan los paneles solares del arreglo fotovoltaico con la entrada MPPT del inversor solar. La distancia se obtiene de los planos.

Tabla 4. Cálculo de sección de conductor por método de caída de tensión entre los módulos solares y el controlador solar

Tramo	Módulos fotovoltaicos al controlador solar
Distancia (m)	8
Carga (VA)	400
Corriente (A)	5,62
Momento eléctrico (V.A.m)	3200
Material conductor (Cu)	X
Factor de ajuste NTC 2050	1.0

Fuente: Autor.

Regulación de voltaje máxima: 3%
 Factor de corrección por temperatura NTC 2050: 1.0
 Voltaje máximo "Vm": 71,2 V
 Corriente máxima por línea con factor de corrección: 5,62 ADC
 ΔVoltaje: 2,136 VDC
 Longitud máxima desde paneles hasta el controlador solar: 8m.

$$Seccmínima = \frac{2 \times 5,62A \times 0,0171\Omega mm^2 / m \times 8m}{2,136V} = 0,7199mm^2 \quad (22)$$

Según este método de cálculo, el conductor comercial adecuado es el de sección de 0,75 mm² de acuerdo con la Tabla 4. Sin embargo, hay que verificar la capacidad de este conductor mediante el método del calentamiento. En la Tabla 5 se muestran los valores base para el cálculo de la sección de los conductores que conectan el controlador solar con las baterías de litio de la embarcación. La distancia se obtiene de los planos.

Tabla 5. Cálculo de sección de conductor por método de caída de tensión entre el controlador solar y las baterías de la embarcación

Tramo	Controlador solar a las baterías de la embarcación
Distancia (m)	2
Carga (VA)	400
Corriente (A)	13,51
Momento eléctrico (V.A.m)	800
Material conductor (Cu)	X
Factor de ajuste NTC 2050	1.0

Fuente: Autor.

Regulación de voltaje máxima: 3%
 Factor de corrección por temperatura NTC 2050: 1.0
 Voltaje máximo "Vm": 29,6 V
 Corriente máxima por línea con factor de corrección: 13,51 ADC
 ΔVoltaje: 0,888 VDC
 Longitud máxima desde el controlador solar hasta las baterías: 2 m.

$$Sección\ mín = \frac{2 \times 13,51 A \times 0,0171 \Omega mm^2 / m \times 2 m}{0,888 V} = 1,04 mm^2 \quad (23)$$

Según este método de cálculo, el conductor comercial adecuado es el AWG16 de sección de 1,31 mm². Sin embargo, hay que verificar la capacidad de este conductor mediante el método del calentamiento.

Por el método de calentamiento. En la práctica por razones de resistencia mecánica y disponibilidad comercial se seleccionó el conductor AWG10 de 5,25 mm² y puede soportar una corriente hasta de 30A. Esta selección mejora significativamente el factor de caída de tensión. Por razones de exposición al medio ambiente, este conductor se debe canalizar mediante ductos adecuados. También, se puede utilizar el cable tipo encauchetado AWG 3x10. Incluso se puede recurrir al cable foto-voltaico equivalente en 6 mm².

Cálculo de la capacidad del Breaker Br1. De acuerdo a los planos la corriente máxima de circulación es de 5,02 A. De acuerdo a la norma RETIE (Colombia. Ministerio de Minas y Energía, 2013), la capacidad del Breaker debe ser del orden del 125% de la corriente máxima de circulación:

$$I_{Br} = 5,02 A \times 1,25 = 6,28 A \quad (24)$$

Comercialmente se puede aproximar esta protección a corriente de 8A/250Vdc

Cálculo de la capacidad del Fusible F1. Se utilizó fusible debido a que el controlador no se debe desenergizar manualmente de la unidad de carga porque se pueden generar fallos de configuración e incluso daños en el sistema. De acuerdo a los planos, la corriente máxima de circulación es de 13,51A. De acuerdo a la norma RETIE, la capacidad del Breaker debe ser del orden del 125% de la corriente máxima de circulación:

$$I_{Br} = 13,51A \times 1,25 = 6,28A = 16,89A \quad (25)$$

Comercialmente se puede aproximar esta protección a corriente de 20A/250Vdc

Cálculo del protector contra sobre voltajes DPS1. El voltaje de pico es la sumatoria de los voltajes de circuito abierto de los dos módulos solares en serie, por lo que se tiene:

$$V_p = 2V_{oc} = 2 \times 42,7V = 85,4V$$

Tipo de tensión = DC.

Selección de tensión U0:

$$U_0 = 1,1 \times 85,4V = 93,94V \quad (26)$$

Se puede aproximar a estándares comerciales de 150V/20 - 40kA

En el caso de la zona del Lago de Tota en Boyacá el nivel isoceráunicos es de 20 – 30, descargas eléctricas/año.Km.

H) Caídas de tensión

Regulación de voltaje entre los paneles solares y el controlador solar. Para este caso la caída de tensión real se calculó con base en la sección de los conductores seleccionados de la siguiente manera:

$$Caída\ máx = \frac{2 \times I_{máx} \times Resistividad \times Distancia}{Área\ de\ sección\ del\ conductor} \quad (27)$$

$$Caída\ máx = \frac{2 \times 5,62A \times 0,0171 \Omega mm^2 / m \times 8m}{4mm^2} = 0,384V$$

$$Caída\ máx = \frac{0,384V}{71,2V} \times 100\% = 0,54\% \quad (28)$$

La caída máxima de voltaje es menor al 1%

Regulación de voltaje entre el controlador solar y la unidad de carga. Para este caso la caída de tensión real se calculó con base en la sección de los conductores seleccionados de la siguiente manera:

$$Sección\ mín = \frac{2 \times 13,51A \times 0,0171 \Omega mm^2 / m \times 2m}{5,25mm^2} = 0,176V \quad (29)$$

$$Caída\ máx = \frac{0,176V}{29,6V} \times 100\% = 0,59\% \quad (30)$$

En este caso la caída máxima de voltaje es menor al 1%

I) Batería de almacenamiento

Se seleccionó la batería de LiFePO4 de 100Ah/24V con BMS incluido (LiTime, 2022).

Tabla 6. Batería seleccionada para sistema de almacenamiento de planta

Marca	LiTime
Tipo de servicio	RV
Talla	24V100Ah
Voltaje	24 voltios
Composición celdas	Fosfato de litio
Peso	48 libras
Dimensiones	21 x 8,2 x 8,5 pulgadas
Número de celdas	1
Terminal	M8

Fuente: (LiTime, 2022).

A continuación, se presenta un resumen de los diferentes componentes seleccionados para el sistema fotovoltaico.

Tabla 6. Componentes de la planta solar que ya están dimensionados

Componente	Distancia máxima de cableado	Valor calculado	Caída máxima de tensión
Conductores entre los módulos solares y el controlador	8 m	Conductor fotovoltaico de 4mm	0,384V
Conductores entre el controlador y la unidad de carga	2 m	Conductor AWG10 XLPE	0,1760V
Conductores entre la unidad de carga y el motor Torqueado Ultra light 403A/AC	2 m	Cable original Torqueado 1920-00	N/A
Breaker entre los paneles solares y el controlador (Br1)	N/A	2 x 8 A / 250Vdc	N/A
D.P.S. de protección a la entrada el controlador (DPS1)	N/A	2 x 150 A dc / 40kA	N/A
Fusible entre el controlador y la unidad de carga (F1)	N/A	2 x 20 A / 2580Vdc	N/A

Fuente: Autor.

III. RESULTADOS

A continuación, en la Figura 4, se evidencia la disposición del sistema fotovoltaico con sus componentes. En la Figura 5 se muestra la disposición de los paneles solares en la embarcación.

El sistema fotovoltaico consta de dos módulos solares monocristalinos de 200 W a 24 VDC, un Controlador solar inteligente MPPT 100/30, una Batería de LiFePO4 de 100 Ah/24VDC, un Motor fueraborda Ultralight 403A/AC, además de protecciones y accesorios. Autonomía de 8.28 horas.

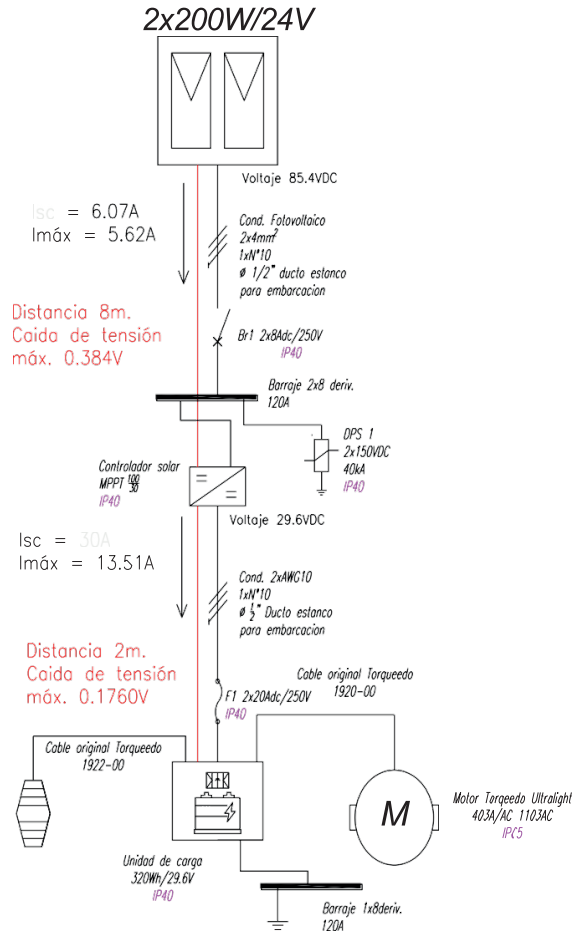


Fig. 4. Unifilar para motor eléctrico convencional fuera de borda Fuente: Autor.

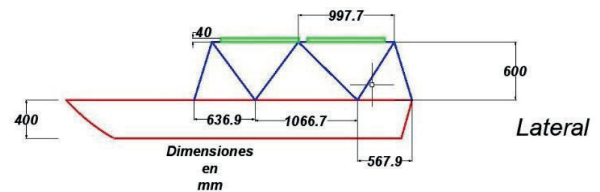


Fig. 5. Disposición de los paneles solares en la embarcación Fuente: Autor.

También, se presentan los resultados de los cálculos de beneficios económicos y ambientales de la implementación del Sistema Fotovoltaico para la Propulsión de una Embarcación Pesquera de 14 Pies de Eslora:

A) Estudio económico y financiero

Se tomaron los costos de la construcción del sistema fotovoltaico y funcionamiento de la misma para establecer el retorno de la inversión, TIR y el factor de viabilidad. A continuación, en las Tablas 7 y 8 se presentan desglosados los costos de inversión y el ahorro en combustible, respectivamente.

Tabla 7. Precotización de la inversión inicial en la implementación de sistema de propulsión con motor eléctrico fuera de borda alimentado con energía solar fotovoltaica

Descripción	Cantidad	Valor/ Unit	V/Parcial
Módulo solar fotovoltaico monocristalino, cubierta de vidrio templado antirreflectivo, sustrato de EVA, marco de aluminio, 200W 24VDC. A todo costo	2	\$800.100	\$1.600.200
Controlador solar inteligente Victron MPPT 100/30. A todo costo	1	\$1.543.500	\$1.543.500
Equipo Torqeedo Ultralight 403A/AC – con unidad de carga y unidad de control incluidos. A todo costo	1	\$13.629.000	\$13.629.000
Accesorios para la planta solar a todo costo.	Gbl	\$8.604.330	\$8.604.330
Total			\$25.377.030

Fuente: Autor.

Tabla 8. Consolidado de ahorros económicos y de combustibles en el proyecto

Equivalencia del motor eléctrico Torqeedo fuera de borda al motor de gasolina	1 HP	Costo diario de combustible evitado en día soleado (\$2.600/L)	5.233,8 /día
Combustible evitado diariamente en condiciones de cielo despejado (6 Gal/2 Hp/12 h)	2.013 L/día	Costo diario de combustible evitado en día nublado (\$2.600/L)	\$811,20 /día
Combustible evitado diariamente en condiciones de cielo nublado (6 Gal/2 Hp/12 h)	0.756 L/día	Costo promedio evitado anualmente (\$2.600/L)	\$1.309.620 /año
Combustible promedio evitado diariamente (6 Gal/2 Hp/12 h)	1,38 L/día	CO2 evitado anualmente (1,97 KgCO2/L)	1,07303 Ton/año

Fuente: Autor.

Tiempo máximo de retorno de la inversión. Aquí se comparó básicamente la

inversión inicial con los ahorros promedio de combustibles:

$$Tiempo\ máx = \frac{\$25'377.030.00}{\$1'309.620.00/año} = 19,37años \quad (31)$$

El tiempo de retorno máximo es un poco alto, sin embargo, si se tiene en cuenta la inflación, los altos costos de los combustibles, la baja en costos de mantenimiento, mayores ingresos de alquiler debido a la novedad y sostenibilidad ambiental se puede llegar a valores de retorno aceptables. Si solo se vieran estos indicadores, todas las inversiones en energías renovables no serían viables y esto frenaría significativamente la transición hacia energías más limpias.

Tasa interna de retorno (TIR). Se calculó dividiendo el 100% entre el tiempo máximo de retorno:

$$TIR = \frac{100\%}{19,37años} = 5,16\%anual \quad (32)$$

Comparando el anterior valor con el Depósito a Término Fijo (DTF) en Colombia para el año 2021 que es del 3,08% resulta más atractiva la inversión en energías renovables que depositar los recursos en entidades bancarias.

Factor de viabilidad. Se comparó la tasa interna de retorno con el DTF de tal manera que el resultado debe ser mayor que 1:

$$Factordeviabilidad = \frac{5,16\%}{3,08\%años} = 1,67 \quad (33)$$

Se puede ver que el factor de viabilidad supera la unidad, lo cual significa que la inversión en este proyecto es mucho más rentable que el depósito de los recursos en una entidad bancaria bajo la figura de depósito a término fijo

B) Estudio de beneficios ambientales

En la Tabla 9 se muestran los factores de emisiones para la gasolina, el ACPM y el gas natural (Incombustion, 2016), se verifica que los coeficientes de emisiones son bastante cercanos según la metodología empleada por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y según la relación estequiométrica ideal.

Tabla 9. Comparativo de factores de emisiones según metodologías utilizadas

Metodología	FECOC (Kg CO ₂ /Kg Comb.)		
	Gasolina	ACP	Gas natural
UPME (Brandt)	3,1328	3,1625	2,7496
Relación estequiométrica ideal	3,08	3,1	2,75

Fuente: (Incombustion, 2016).

En síntesis, se estableció que el ahorro diario promedio de gasolina es de 1,38 L/día (Tabla 8), de acuerdo con este dato y con la densidad promedio de la gasolina se puede calcular la masa de combustible quemada anualmente, según la metodología Brand de la UPME las emisiones anuales de CO₂ (Incombustion, 2016). Esto se puede interpretar como el ahorro anual de emisiones de CO₂ es de 1,07303 Ton CO₂/año.



Fig. 6. Embarcación construida
Fuente: Autor.

IV. CONCLUSIONES

Se concluye que desde el punto de vista técnico es viable la implementación del sistema fotovoltaico como fuente de alimentación para el tipo de embarcación propuesta. Con respecto a los cálculos realizados, el tiempo de autonomía varía desde un mínimo de 38 minutos y 24 segundos en modo nocturno hasta un máximo de 2 horas 48 minutos en modo diurno con cielos despejados. Si se desea más tiempo de autonomía se puede ampliar la unidad original Torqeedo de carga con más baterías. Desde el punto de vista ambiental, la implementación de este proyecto traerá consigo un ahorro sustancial de emisiones de CO₂ del orden de 1 Ton CO₂/año.

Es importante resaltar que los proyectos de implementación de energías limpias pueden tener algunos costos mayores de implementación comparativamente con las embarcaciones tradicionales, lo cual indica que este factor es importante pero no determinante en

la elección de sistemas con el uso de energía solar fotovoltaica. La adopción de embarcaciones de diferente tamaño y función, se han convertido en una alternativa para sectores económicos y productivo que en el pasado eran altamente contaminantes (Campillo et al., 2019; Nugraha et al., 2022; Petkovic et al., 2020), con lo cual este trabajo es un aporte a estas iniciativas de uso eficiente de las energías renovables, que es acorde a las tendencias de desarrollos tecnológicos amigables con el medio ambiente.

En Colombia se requiere de mayores estudios que aporten soluciones sostenibles para las actividades donde se requiera el uso de embarcaciones ya que se cuenta con la radiación solar suficiente para la implementación de proyectos similares. Asimismo, las tendencias del mercado han posibilitado el acceso a mayor cantidad de productos con mejor calidad, eficiencia y bajo costo para tal fin. En consecuencia, se requiere un vínculo interinstitucional de mayor envergadura para garantizar que los inversionistas privados y las instituciones de educación superior generen proyectos de inversión con los fundamentos técnicos necesarios para su éxito.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por darnos la vida, salud y sabiduría, a nuestra familia por apoyarnos en todo momento, a la empresa náutica Aqualago SAS Bic

por facilitarnos los equipos para la realización de pruebas en el lago y a los docentes de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por sus valiosos aportes.

VI. REFERENCIAS

- [1] Campillo, J. y Domínguez-Jiménez, J. A. y Cabrera, J. (2019). Sustainable Boat Transportation Throughout Electrification of Propulsion Systems: Challenges and Opportunities. 2019 2nd Latin American Conference on Intelligent Transportation Systems (ITS LATAM), 1-6. <https://doi.org/10.1109/ITSLATAM.2019.8721330>
- [2] Ciacciarelli, J. y Wilmsmeier, G. y Sáenz, J. E. y Schuschny, A. (2020). Análisis de sustitución de combustibles del sistema de transporte fluvial de la Hidrovía Paraguay - Paraná. Organización Latinoamericana de Energía. <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0451.pdf>
- [3] Colombia. Ministerio de Minas y Energía. (2013). Resolución 90708 - Por la cual se expide el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE. Diario Oficial No. 48.904. https://www.cancilleria.gov.co/sites/default/files/Normograma/docs/resolucion_minminas_90708_2013.htm
- [4] De la Llana, I. (2011). Nuevo sistema de propulsión naval. [Tesis de Doctorado]. Universidad del País Vasco. <http://hdl.handle.net/10810/12273>

- [5] Ghenai, C. y Al-Ani, I. y Khalifeh, F. y Alamaari, T. y Hamid, A. K. (2019). Design of Solar PV/Fuel Cell/Diesel Generator Energy System for Dubai Ferry. 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICASET.2019.8714292>
- [6] Global Solar Atlas. (2022). Irradiación solar en el Lago de Tota Boyacá.
- [7] Hernández, R. y Fernández, C. y Baptista, M. del P. (2014). Metodología de la investigación (6a). McGraw- Hill.
- [8] Incombustion. (2016). Consultoría técnica para el fortalecimiento y mejora de la base de datos de factores de emisión de los combustibles colombianos. FECOC. Incombustion. http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/Informe_Final_FECOC.pdf
- [9] Kim, M. y Hizir, O. y Turan, O. y Day, S. y Incecik, A. (2017). Estimation of added resistance and ship speed loss in a seaway. Ocean Engineering, 141, 465-476. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.06.051>
- [10] LiTime. (2022). LiTime 24V 100Ah LiFePO4 Lithium Battery, Build-In 100A BMS, 2560Wh Energy. <https://www.litime.com/products/litime-24v-100ah-lifepo4-lithium-battery>
- [11] López, J. M. (2021). Electrificación de Buques. [Tesis de Maestría]. Universidad del País Vasco. <http://hdl.handle.net/10810/52686>
- [12] Nugraha, I. M. A. y Luthfiani, F. y Sot'yaramadhani, G. y Widagdo, A. y Desnanjaya, I. G. M. N. (2022). Technical-economical assessment of solar PV systems on small-scale fishing vessels. International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS), 13(2), 1150. <https://doi.org/10.11591/ijped.v13.i2.pp1150-1157>
- [13] Petkovic, M. y Zubčić, M. y Krčum, M. y Vujovic, I. (2020). Maritime Green Solution for Traffic Congestion. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 14(1), 97-103. <https://doi.org/10.12716/1001.14.01.11>
- [14] Puig, S. (2022). Movilidad sostenible marítima. Los barcos solares. Universidad Pontificia de Comillas. <http://hdl.handle.net/11531/63388>
- [15] Torqueedo. (2020). Travel Outboards. Products. Outboards. Travel. <https://www.torqueedo.com/en/products/outboards/travel>
- [16] UNITECK. (2022). Paneles solares rígidos UNISUN M & BC. <https://cdn.ensolar.com/z/pp/t57kfu0k0wx9/panneau-solaire-unisun-100-12-m-0446-es-wGRCZwcrF.pdf>

- [17] Victron Energy. (2022). Controladores de carga BlueSolar MPPT 100/30 & 100/50. <https://www.victronenergy.com.es/upload/documents/Datasheet-BlueSolar-charge-controller-MPPT-100-30-&-100-50-ES.pdf>
- [18] Yüksel, O. y Göksu, B. y Bayraktar, M. (2023). Propulsion and photovoltaic charging system parameter computation for an all-electric boat. Ships and Offshore Structures, 1-14. <https://doi.org/10.1080/17445302.2023.2195239>
- [19] Zagarra, J. C. (2021). Análisis técnico-económico de casos de electrificación de la propulsión de buques de gran eslora. [Tesis de Maestría]. Universidad Politécnica de Cataluña. <http://hdl.handle.net/2117/350786>