

Diseño de una microrred para la alimentación de embarcaciones fluviales eléctricas en
el río Atrato

Javier Andrés Santiago Ortega y Luis Fernando Romero Rojas

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista e Ingeniero Electrónico.

Director

Juan Manuel Rey López

Doctor en Ingeniería Electrónica

Codirector

Leonardo Bohórquez Maldonado

Ingeniero Electricista

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico–Mecánicas

Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica – Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2026

Dedicatoria.

Dedico este proyecto, en primer lugar, a Dios, quien ha sido mi guía y fuente de fortaleza para alcanzar esta meta; a mi familia, cuyo amor incondicional me sostuvo en cada etapa, especialmente a mi mamá Martha Santiago por sus enseñanzas y apoyo incansable, así como a mi hermano, mi tía y mi papá; a mi pareja, que llegó en el momento preciso para darme el impulso que necesitaba para finalizar; y a mis docentes y asesores, por compartir sus conocimientos y contribuir a mi formación académica y personal. Este logro también pertenece a todas las personas que confiaron en mí y me acompañaron en el camino, pues su motivación y confianza fueron esenciales para superar cada desafío y convertir este sueño en realidad.

Javier Andrés Santiago Ortega

Con gran gratitud y respeto, dedico este trabajo primeramente a Dios, por brindarme la sabiduría, la fortaleza y la perseverancia necesarias para alcanzar esta importante meta. A mi familia, por su amor, apoyo y confianza a lo largo de este camino; en especial a mi padre, a mi tía Rosa y a mi tío Álvaro, quienes fueron un pilar fundamental y un apoyo incondicional para superar cada desafío de mi formación profesional. A mi pareja, por ser una fuente constante de motivación, por acompañarme en los momentos de mayor dificultad y por impulsarme a seguir adelante cuando el camino parecía más difícil. Finalmente, a mis profesores y compañeros de universidad, quienes, con sus enseñanzas, conocimientos y experiencias compartidas, contribuyeron de manera significativa a mi crecimiento académico y profesional.

Luis Fernando Romero Rojas

Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivo.....	12
1.1. Objetivo general.....	12
1.2. Objetivos específicos	12
2. Identificación de la disponibilidad de recursos en sitio	12
2.1. Ubicación del puerto de Turbo, Antioquia.....	12
2.2. Obtención de datos	13
2.2.1. Potencial solar en el puerto de Turbo.....	14
2.2.2. Potencial eólico en el puerto de Turbo	15
2.2.3. Datos climatológicos del puerto de Turbo (Puerto Pisisi).....	15
3. Perfil de operación de dos embarcaciones fluviales eléctricas	16
3.1. Perfil técnico de las embarcaciones	16
3.1.1. Embarcación pequeña ECOTEA.....	16
3.1.2. Embarcación grande	16
3.1.3. Curva de tránsito de una embarcación fluvial	17
3.1.4. Rutas transitables desde el puerto de Turbo (Puerto Pisisi)	18
3.2. Limitaciones operativas y selección de rutas.....	19
3.2.1. Información de la población.....	19
3.2.2. Capacidad de las EFE.....	20
4. Cálculos de potencia y energía	21
4.1. Disponibilidad de red en puertos	21
4.2. Cargadores	22
4.3. Itinerario de viajes	22
4.4. Estado de carga de las embarcaciones tras un viaje.....	23
4.5. Consumo en cada puerto	25
4.5.1. Consumo en puerto de Nueva Colonia.....	26
4.5.2. Consumo en puerto de Bocas del Atrato	26
4.5.3. Consumo en puerto de Playa Tie	26
4.5.4. Consumo en puerto de Punta de Piedra.....	26
4.5.5. Consumo en puerto Pisisi en Turbo/Antioquia.....	26
5. Dimensionamiento en puerto Pisisi, Turbo, Antioquia	27
5.1. Dimensionamiento de la microrred	27
5.1.1. Dimensionamiento de paneles	27
5.1.2. Dimensionamiento de inversor	29
5.2. Cálculo de potencias generadas y consumidas.....	29
6. Validación del sistema mediante simulación en Simulink (Matlab)	31
6.1. Cálculo de corrientes	31
6.1.1. Corriente entregada por el inversor	31
6.1.2. Corriente RMS de red	33
6.2. Simulación en Simulink	36

6.2.1. Cálculo de resistencia como modelado de carga consumida	36
6.2.2. Modelo de simulación en Matlab	36
7. Resultados	37
Conclusiones	41
Referencias.....	42
Apéndices	44

Figuras

	Pag.
Figura 1 <i>Ubicación del puerto de Turbo</i>	13
Figura 2 <i>Ubicación del puerto Pisisi mediante Google Earth</i>	13
Figura 3 <i>Irradiancia promedio por hora del día en 2023 y 2024</i>	14
Figura 4 <i>Velocidad promedio del viento por hora del día entre 2020 y 2024</i>	15
Figura 5 <i>Velocidad de navegación en función del porcentaje de tiempo</i>	17
Figura 6 <i>Potencia requerida en función del porcentaje de tiempo</i>	17
Figura 7 <i>Mapa de las rutas cortas y medias disponibles desde Puerto Pisisi</i>	18
Figura 8 <i>Consumo energético y estado de carga final de las embarcaciones según la ruta</i> 24	
Figura 9 <i>Organigrama de los viajes realizados por los dos perfiles de embarcaciones</i>	25
Figura 10 <i>Curva de generación de un panel fotovoltaico en el puerto de Turbo</i>	28
Figura 11 <i>Consumo energético en Puerto Pisisi según el grupo de días</i>	29
Figura 12 <i>Energía generada y consumida en Puerto Pisisi según el grupo de días</i>	29
Figura 13 <i>Energía importada y exportada de la red en función de la hora del día</i>	30
Figura 14 <i>Diagrama unifilar de la microrred propuesta</i>	31
Figura 15 <i>Corriente de línea entregada por el inversor fotovoltaico</i>	32
Figura 16 <i>Corriente consumida según la embarcación y el día de operación</i>	33
Figura 17 <i>Energía exportada según la hora del día</i>	34
Figura 18 <i>Energía importada según la hora del día</i>	35
Figura 19 <i>Corriente RMS de la red eléctrica</i>	35
Figura 20 <i>Modelo de simulación desarrollado en MATLAB/Simulink</i>	36
Figura 21 <i>Código utilizado para la recopilación de datos de la simulación</i>	37
Figura 22 <i>Corriente RMS suministrada por el inversor fotovoltaico durante la simulación de 24 horas</i>	37
Figura 23 <i>Corriente RMS intercambiada con la red eléctrica durante la operación del sistema: lunes, miércoles y viernes</i>	38
Figura 24 <i>Corriente RMS demandada por los cargadores de 22 kW y 12 kW durante la recarga: lunes, miércoles y viernes</i>	38
Figura 25 <i>Corriente RMS intercambiada con la red eléctrica durante la operación del sistema: martes, jueves y sábado</i>	38
Figura 26 <i>Corriente RMS demandada por los cargadores de 22 kW y 12 kW durante la recarga: martes, jueves y sábado</i>	39
Figura 27 <i>Porcentaje de error corriente RMS teórica vs simulada del cargador de 22 kW</i> .	39
Figura 28 <i>Porcentaje de error corriente RMS teórica vs simulada del cargador de 12 kW</i> .	40
Figura 29 <i>Porcentaje de error de la corriente RMS intercambiada con la red eléctrica durante la simulación</i>	40

Tablas

	Pag.
Tabla 1 Resistencia al avance, velocidad y potencia de la embarcación pequeña.....	16
Tabla 2 Resistencia al avance, velocidad y potencia de la embarcación grande	17
Tabla 3 Rutas disponibles para viajes cortos y medios desde Puerto Pisisi.....	18
Tabla 4 Población residente en las localidades establecidas como destinos	19
Tabla 5 Rutas técnicamente viables según las limitaciones operativas	21
Tabla 6 Disponibilidad de la red eléctrica en los puertos	21
Tabla 7 Itinerario diario de viajes de cada embarcación	23
Tabla 8 Estado de carga de las embarcaciones después de recorrer las rutas.....	24
Tabla 9 Consumo horario en Puerto Pisisi.....	27
Tabla 10 Datos de placa del panel, consumo y disponibilidad	28
Tabla 11 Balance energético diario.....	30
Tabla 12 Energía importada y exportada según el grupo de días	30
Tabla 13 Balance entre energía importada y exportada.....	30
Tabla 14 Corriente consumida por los cargadores durante la recarga de las embarcaciones	33
Tabla 15 Estado de los equipos y horarios de operación.....	33
Tabla 16 Energía exportada según el grupo de días	34
Tabla 17 Energía importada según el grupo de días	35
Tabla 18 Resistencias calculadas para el modelo de simulación	36

Apéndices

	Pag.
Apéndice A Datos de placa del transformador disponible en el puerto	44
Apéndice B Sistema de propulsión estándar Deep Blue de Torqeedo	44
Apéndice C Curva de resistencia al avance ECOTEA	44
Apéndice D Sistema de propulsión estándar Deep Blue de 200 kW de Torqeedo	45
Apéndice E Curva de resistencia al avance grande	45
Apéndice F Datos correspondientes a las EFE	45
Apéndice G Ficha técnica de los cargadores	46
Apéndice H Consumo en puerto Nueva Colonia	47
Apéndice I Consumo en puerto Bocas del Atrato	47
Apéndice J Consumo en puerto Playa Tie	47
Apéndice K Consumo en puerto Punta de piedra	47
Apéndice L Consumo en puerto Pisisi	48

Glosario

AM1.5.	Condición estándar utilizada para caracterizar el desempeño de paneles fotovoltaicos bajo una masa de aire específica, Air Mass 1.5.
DOD.	Profundidad de descarga de una batería expresada en porcentaje respecto a su capacidad total.
ECOTEA.	Embarcación eléctrica eco-amigable utilizada como perfil de embarcación pequeña dentro del estudio.
EFE.	Embarcación fluvial eléctrica.
EPM.	Empresas Públicas de Medellín.
FNCER.	Fuentes No Convencionales de Energía Renovable.
HSP.	Horas Sol Pico, número de horas en las cuales la irradiancia solar alcanza 1000 W/m ² .
IDEAM.	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.
IPSE.	Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las zonas no interconectadas.
MATLAB.	Software de programación y cálculo numérico utilizado para modelado y simulación.
Microrred.	Sistema eléctrico local compuesto por cargas y fuentes de generación distribuida que puede operar conectado o desconectado de la red eléctrica principal.
On-grid.	Configuración de un sistema eléctrico conectado directamente a la red eléctrica convencional.
PV.	Término utilizado para referirse a sistemas de generación solar fotovoltaica.
PWM.	Modulación por ancho de pulso, técnica de modulación por ancho de pulso utilizada en sistemas electrónicos de potencia y control.
SIN.	Sistema Interconectado Nacional.
Simulink.	Entorno gráfico de simulación integrado en MATLAB utilizado para modelado dinámico de sistemas.
SOC.	Estado de carga de una batería, expresado en porcentaje respecto a su capacidad total.
STC.	Condiciones estándar de prueba para caracterización de paneles solares: irradiancia de 1000 W/m ² , temperatura de célula de 25 °C y espectro AM1.5.
SDL	Sistema de distribución local

Unidades

Ah.	Amperio-hora.
°C.	Grado Celsius.
kPa.	Kilopascal.
kW.	Kilovatio.
kWh.	Kilovatio-hora.
kn.	Nudo.
km.	Kilómetro.
VDC.	Voltaje en corriente continua.
Wh/m ² .	Vatios-hora por metro cuadrado.

Resumen

Título. Diseño de una microrred para la alimentación de embarcaciones fluviales eléctricas en el río Atrato ¹

Autores. Javier Andrés Santiago Ortega, Luis Fernando Romero Rojas ²

Palabras clave: Microrred; Energías renovables; Embarcaciones eléctricas.

Resumen. Este proyecto aborda la necesidad de implementar alternativas de movilidad sostenible mediante la electrificación del transporte fluvial en la región del río Atrato, Colombia; el cual, constituye uno de los principales corredores de movilidad para comunidades con acceso terrestre limitado y desempeña un papel fundamental en el transporte de pasajeros, ya que permite la conectividad social y económica de la región. En la actualidad, países como Noruega y Finlandia han avanzado en la implementación de embarcaciones eléctricas, infraestructura portuaria electrificada y sistemas de carga basados en energías renovables como estrategia para reducir emisiones y fortalecer la transición energética del sector fluvial.

En este contexto, la integración de embarcaciones fluviales eléctricas e infraestructura de carga basada en fuentes no convencionales de energía renovable surge como una alternativa para reducir los impactos ambientales asociados al uso de combustibles fósiles y así fortalecer la sostenibilidad energética del transporte fluvial. El objetivo de este trabajo consiste en diseñar una microrred eléctrica conectada a la red, basada en generación solar fotovoltaica, para abastecer la demanda de carga de dos perfiles operacionales de embarcaciones fluviales eléctricas que transitan unas rutas establecidas desde el puerto de Turbo, Antioquia. La microrred propuesta se encuentra conectada al SDL, permitiendo la exportación de energía durante periodos de alta generación solar y la importación de energía durante los periodos de carga de las embarcaciones.

La metodología desarrollada incluye la caracterización del recurso solar disponible en Turbo mediante datos históricos meteorológicos y de irradiancia obtenidos de IDEAM y NASA POWER, la definición de perfiles operacionales y de consumo energético para dos configuraciones de embarcaciones eléctricas, y el dimensionamiento de los componentes de la microrred de acuerdo con los requerimientos de cargadores de 12 kW y 22 kW. Adicionalmente, se realizaron simulaciones en Simulink (Matlab) para evaluar el flujo energético horario, el perfil de generación fotovoltaica, la demanda de carga y el intercambio de potencia con la red eléctrica. Los resultados de simulación fueron validados mediante la comparación entre valores de corriente simulados y calculados analíticamente, obteniéndose porcentajes de error bajos.

El sistema propuesto contribuye al desarrollo de estrategias de movilidad fluvial sostenible y a la integración de FNCER en infraestructura de carga para transporte fluvial eléctrico. Asimismo, el proyecto constituye una referencia técnica para la implementación de microrredes fotovoltaicas conectadas a red en regiones con necesidades de transporte fluvial.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físico–mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Juan Manuel Rey López. Doctor en Ingeniería Electrónica. Codirector: Leonardo Bohórquez Maldonado. Ingeniero Electricista.

Abstract

Title. Microgrid to Supply Electric Riverboats on the Atrato River ¹

Authors. Javier Andrés Santiago Ortega, Luis Fernando Romero Rojas ²

Key Words: Microgrid; Renewable energy; Electric boats.

Abstract. This project addresses the need to implement sustainable mobility alternatives through the electrification of river transport in the Atrato River region, Colombia. The Atrato River constitutes one of the main mobility corridors for communities with limited land access and plays a fundamental role in passenger transportation, enabling the social and economic connectivity of the region. Currently, several countries such as Norway and Finland have made progress in the implementation of electric vessels, electrified port infrastructure, and renewable energy-based charging systems as a strategy to reduce emissions and strengthen the energy transition of the river transport sector.

In this context, the integration of electric river vessels and charging infrastructure based on non-conventional renewable energy sources emerges as a viable alternative to reduce the environmental impacts associated with the use of fossil fuels and strengthen the energy sustainability of river transportation. The objective of this work is to design a grid-connected electrical microgrid based on solar photovoltaic generation to supply the charging demand of two operational profiles of electric river vessels operating on established routes from the port of Turbo, Antioquia. The proposed microgrid is connected to the local electrical system, allowing energy export during periods of high solar generation and energy import during vessel charging periods.

The developed methodology includes the characterization of the solar resource available in Turbo through historical meteorological and irradiance data obtained from IDEAM and NASA POWER, the definition of operational and energy consumption profiles for two configurations of electric vessels, and the sizing of the microgrid components according to the requirements of 12 kW and 22 kW chargers. Additionally, simulations were carried out in Simulink (Matlab) to evaluate hourly energy flow, photovoltaic generation profiles, charging demand, and power exchange with the electrical grid. The simulation results were validated through comparisons between simulated current values and analytically calculated values, obtaining low error percentages.

The proposed system contributes to the development of sustainable river mobility strategies and the integration of non-conventional renewable energy sources into charging infrastructure for electric river transport. Furthermore, the project serves as a technical reference for the implementation of grid-connected photovoltaic microgrids in regions with river transportation needs.

¹ Thesis

² Faculty of Physical–Mechanical Sciences. School of Electrical, Electronic, and Telecommunications Engineering. Advisor: Juan Manuel Rey López, Ph.D. in Electronic Engineering. Co-advisor: Leonardo Bohórquez Maldonado, Electrical Engineer.

Introducción

La transición hacia sistemas de transporte sostenibles se ha convertido en uno de los principales retos energéticos y ambientales a nivel mundial. El crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al uso de combustibles fósiles ha impulsado estrategias de electromovilidad en diferentes sectores, incluyendo aplicaciones terrestres, marítimas y fluviales (Ministerio de Transporte, 2020). En Suramérica, países como Brasil y Chile han incorporado tecnologías de transporte eléctrico e infraestructura energética basada en fuentes renovables (Organización Latinoamericana y Caribeña de Energía [OLADE], 2025), buscando disminuir el impacto ambiental y mejorar la eficiencia energética (DANE, 2021).

En Colombia, el transporte fluvial representa una alternativa estratégica para la conectividad de regiones con acceso terrestre limitado (Ministerio de Transporte, 2021). El río Atrato, con una longitud aproximada de 750 km, constituye uno de los principales corredores fluviales del país y desempeña un papel fundamental en la movilidad y conectividad de comunidades del Chocó y el Urabá antioqueño (Urabá Caribe, 2022). Sin embargo, gran parte de las embarcaciones utiliza sistemas de propulsión basados en combustibles fósiles, generando emisiones contaminantes y dependencia energética (IDEAM, 2021).

Frente a esta problemática, la electrificación del transporte fluvial surge como una alternativa para promover modelos de movilidad sostenibles y eficientes (Gobernación de Antioquia, 2023). Su implementación requiere infraestructura energética capaz de garantizar el abastecimiento de los sistemas de carga. En este contexto, las microrredes eléctricas conectadas a red y basadas en fuentes no convencionales de energía renovable (FNCR) permiten integrar generación distribuida e infraestructura de carga para embarcaciones eléctricas.

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar una microrred eléctrica conectada a la red, basada en generación solar fotovoltaica, para abastecer la demanda energética de dos perfiles operacionales de embarcaciones fluviales eléctricas que transitan siete rutas desde el puerto de Turbo, Antioquia. Para ello, se caracteriza el recurso solar y eólico disponible en la zona (Dirección General Marítima [DIMAR] & Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe [CIOH], s. f.), se definen los perfiles de operación y consumo y se valida el dimensionamiento de los principales elementos de la microrred mediante simulaciones en Matlab/Simulink.

La propuesta busca aportar una referencia técnica para implementar infraestructura energética orientada a la movilidad fluvial eléctrica en Colombia, promoviendo la integración de energías renovables en sistemas de transporte sostenibles para regiones con necesidades de conectividad fluvial.

1. Objetivo

1.1. Objetivo general

Diseñar una microrred para abastecer de energía a dos perfiles de operación de embarcaciones fluviales eléctricas, por medio de simulaciones en el software Matlab, teniendo en cuenta el uso de fuentes no convencionales de energía renovable disponibles en el puerto de Turbo, Antioquia

1.2. Objetivos específicos

1. Identificar y caracterizar la disponibilidad de recursos energéticos renovables en el puerto ubicado en Turbo Antioquia, para el aprovechamiento mediante FNCER.
2. Definir el perfil de operación de dos EFE, que transitan siete rutas establecidas por el río Atrato.
3. Dimensionar los elementos de una microrred que integre FNCER disponibles en el puerto de Turbo y el perfil de carga de dos EFE teniendo en cuenta las siete rutas establecidas y, la capacidad de carga de las baterías en las embarcaciones.
4. Validar el dimensionamiento de la microrred por medio de simulaciones en el software Matlab, considerando las características de 2 perfiles de EFE y las rutas que transiten.

2. Identificación de la disponibilidad de recursos en sitio

Este capítulo presenta la caracterización geográfica, climática y energética de la zona de estudio, tomando como referencia el puerto de Turbo y el área de influencia del Río Atrato. Asimismo, se analiza la información obtenida de la base de datos “NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER)” para evaluar el potencial solar, eólico y las condiciones climatológicas de la región, estableciendo las bases técnicas para el desarrollo de la microrred propuesta.

2.1. Ubicación del puerto de Turbo, Antioquia

Para el desarrollo del proyecto, se inició con la identificación del lugar en el cual se ubica el puerto de Turbo, denominado puerto Pisisi; para este propósito se utilizó la herramienta geoespacial “Google Earth Pro”, la cual permite visualizar imágenes satelitales y verificar las coordenadas del sitio de interés.

Turbo es un municipio ubicado en el noroccidente del departamento de Antioquia. Su posición estratégica lo convierte en un punto de conexión natural entre Antioquia y el océano, así como en una zona de transición entre la región andina y la zona selvática del Chocó. Se encuentra en la región del Urabá antioqueño, sobre la costa del Golfo de Urabá, en el mar

Caribe. Con una elevación mínima de 4 m s. n. m., cuenta con una importante actividad portuaria, comercial y agrícola, representando una puerta de acceso hacia las rutas fluviales y marítimas del Caribe colombiano. Las coordenadas del sitio donde se realiza el estudio, es decir el puerto de Turbo, son $8^{\circ}05'28''\text{N}$ y $76^{\circ}43'45''\text{W}$.

Figura 1

Ubicación del puerto de Turbo

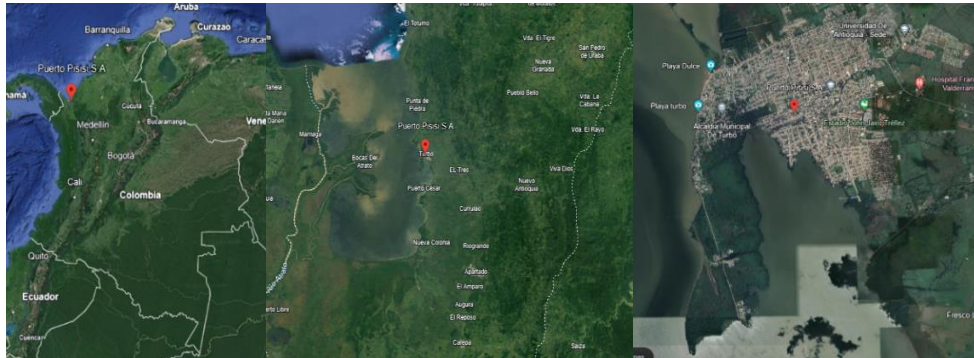


Figura 2

Ubicación del puerto Pisisi mediante Google Earth



En el puerto de Turbo, se cuenta con servicio de red continuo, el transformador más cercano a la ubicación es el 400215, cuya relación de transformación entre primario y secundario es de 7600/240[V] con una potencia nominal de 75 [kW], (ver Apéndice A. Datos de placa del transformador disponible en el puerto).

2.2. Obtención de datos

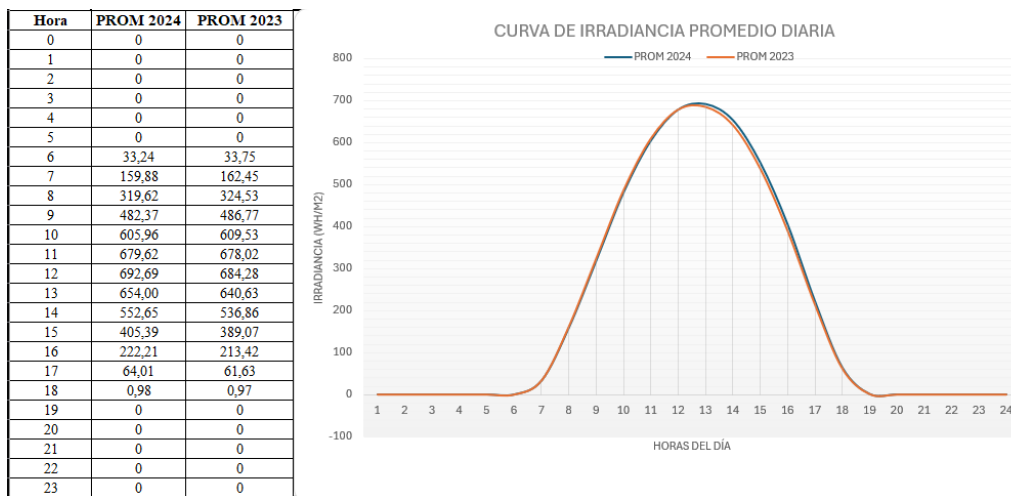
Mediante el uso de la base de datos NASA POWER, se identificaron las variables “Surface Shortwave Downward Irradiance (kWh/m²/day)”, correspondiente a la irradiancia descendente de onda corta en superficie bajo cielo real, utilizada para calcular las Horas Sol Pico (HSP) del sitio, y “Wind Speed at 10 Meters (m/s)”, correspondiente a la velocidad del viento a 10 metros de altura, empleada para estimar la potencia eólica disponible. Adicionalmente, se recopilieron datos climatológicos complementarios del sitio, tales como presión atmosférica, temperaturas máxima y mínima, y humedad relativa.

2.2.1. Potencial solar en el puerto de Turbo

Para estimar el potencial solar disponible en el puerto, se recopilaron los datos de irradiancia descendente de onda corta en superficie bajo cielo real correspondientes a los últimos dos años. Este parámetro permite cuantificar la energía solar diaria que llega al nivel del suelo considerando las condiciones atmosféricas reales, ya que incorpora los efectos de la nubosidad, los aerosoles y la dispersión de la radiación. De esta manera, se obtiene una medida que integra tanto la componente directa como la difusa, permitiendo una caracterización más precisa del recurso solar disponible en la zona.

Figura 3

Irradiancia promedio por hora del día en 2023 y 2024



De acuerdo con la gráfica obtenemos que la irradiancia promedio aumenta progresivamente desde el amanecer, alcanza un máximo alrededor del mediodía solar (cuando el sol está más alto en el cielo) y luego disminuye hacia el atardecer, para este caso específico contamos con un valor de hora sol pico (HSP) de 4,82, este se obtuvo mediante la ecuación (1).

$$HSP = \frac{\Sigma G(t) * \Delta t}{1000 [Wh/m^2]} = \frac{4821,91}{1000} = 4,82 [h] \quad (1)$$

$G(t)$ = Irradiancia W/m^2

Δt = 1 hora

Se divide entre 1000 para así obtener la cantidad de horas sol pico en un día. Se calculó la energía disponible por metro cuadrado dividiendo la irradiancia total de un día en 24h como se ve en la ecuación (2).

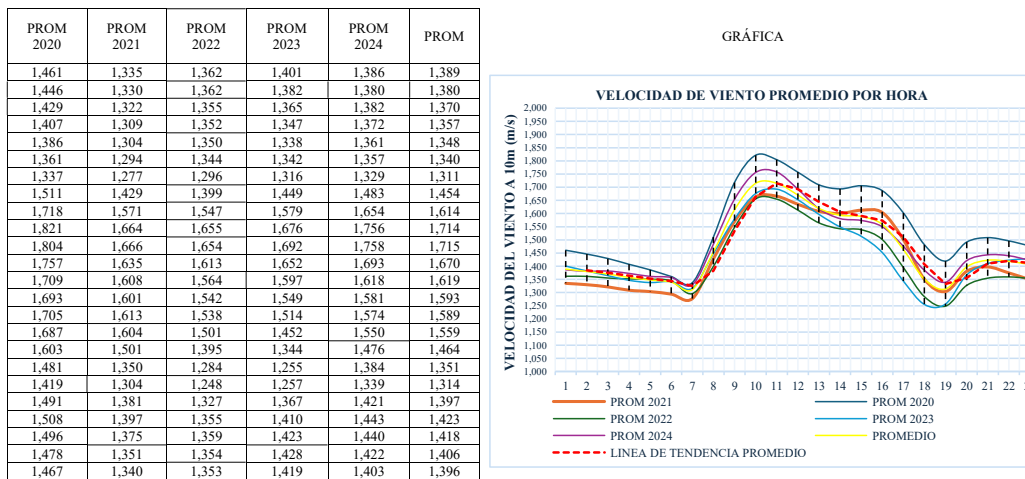
$$E = \frac{\Sigma G(t) * \Delta t}{24 h} = \frac{4821,91}{24} = 200,91 [Wh/m^2] \quad (2)$$

2.2.2. Potencial eólico en el puerto de Turbo

Para estimar el potencial eólico disponible en el puerto, se recopilaron los registros de velocidad del viento correspondientes a los últimos cinco años. Este parámetro constituye la base para cuantificar la energía que puede ser transformada por una turbina, ya que refleja el comportamiento real del viento en el sitio de estudio, incluyendo variaciones por factores climáticos, estacionales y geográficos. A partir de estos datos es posible caracterizar la distribución de velocidades, identificar los periodos de mayor aprovechamiento y evaluar la estabilidad del recurso, lo cual permite obtener una representación más precisa del potencial eólico disponible en la zona. La Figura 4 presenta el comportamiento de la velocidad promedio del viento por hora durante el periodo comprendido entre 2020 y 2024.

Figura 4

Velocidad promedio del viento por hora del día entre 2020 y 2024



De acuerdo con la gráfica, la velocidad del viento durante los últimos años presenta un comportamiento similar, con tendencias cercanas a la curva promedio. Por ello, se emplea el promedio horario de la velocidad del viento a 10 m de altura (WS10M), calculado mediante la Ecuación (5), la cual permite obtener un valor representativo del recurso eólico para el dimensionamiento del sistema.

$$WS10M = \frac{\sum W(t) * \Delta t}{24 h} = 1.47 [m/s] \quad (3)$$

$WS10M$ = Velocidad del viento promedio a 10 metros de la superficie

$W(t)$ = Velocidad del viento instantánea

Δt = 1 hora

2.2.3. Datos climatológicos del puerto de Turbo (Puerto Pisisi)

Las condiciones climatológicas típicas del municipio de Turbo se caracterizan por una altitud aproximada de 2 m s. n. m., la cual se considera equivalente al nivel del mar para efectos de análisis. Bajo estas condiciones, la densidad del aire aproximada es de 1,17 kg/m³, valor representativo de ambientes a nivel del mar. La temperatura máxima diurna alcanza los 30,8 °C, mientras que la temperatura mínima nocturna desciende hasta los 23,3 °C,

registrándose una temperatura promedio de 27,2 °C, característica de un clima cálido tropical. La presión atmosférica promedio es de 100,93 kPa, ajustada según la altitud local, lo que resulta relevante para cálculos asociados a la densidad del aire y al aprovechamiento de la energía eólica. Adicionalmente, la humedad relativa presenta un valor elevado del 89,27%, reflejando condiciones de alta humedad ambiental, y la velocidad promedio del viento es de 1,47 m/s, lo cual indica un régimen de vientos suaves predominantes en la zona (National Aeronautics and Space Administration [NASA], s. f.).

3. Perfil de operación de dos embarcaciones fluviales eléctricas

3.1. Perfil técnico de las embarcaciones

3.1.1. Embarcación pequeña ECOTEA

El bote está diseñado para realizar labores de transporte de personal y material dentro de la zona de aguas interiores del río Atrato, la embarcación puede transportar entre 2 a 8 pasajeros realizando entre 30 y 50 [km] de operación con una sola recarga (Proyecto ECOTEA, 2023), teniendo en cuenta un perfil de velocidad que oscila entre los 5 a 18 nudos al 100%. Cuenta con dos motores fuera de borda de 50 [kW] modelo Deep blue estándar de Torqeedo, (ver Apéndice B. Sistema de propulsión estándar Deep Blue de Torqeedo). Este tipo de embarcación cuenta con la siguiente tabla de datos que contiene la resistencia al avance, velocidad y potencia:

Tabla 1

Resistencia al avance, velocidad y potencia de la embarcación pequeña

RES TOTAL [kN]	0,47	0,86	1,22	1,41	1,95	2,94	3,63	3,72	3,77	3,85	4,21	4,41	4,05	4,12	4,22	4,27	4,31
Velocidad [km/h]	7,41	9,26	10,74	11,11	12,96	14,82	16,67	18,52	20,37	22,22	27,78	33,34	38,89	40,74	42,60	46,30	50,00
P TOTAL [kW]	1,90	4,30	7,10	8,50	13,60	23,50	32,60	37,20	41,50	46,20	63,20	79,30	85,00	90,60	97,00	106,7	116,4

Nota. Datos obtenidos a partir del Proyecto ECOTEA (2023).

A partir de estos datos, se calculó la curva de tendencia con función polinómica de grado 2 obteniendo como resultado una línea de tendencia creciente, proporcional entre la potencia y la velocidad, (ver Apéndice C. Curva de resistencia al avance ECOTEA).

3.1.2. Embarcación grande

La embarcación tiene como finalidad el transporte de personal y material en aguas interiores del río Atrato, contando con una capacidad máxima de 27 personas. Su diseño contempla un rango operativo de velocidades entre 12 y 25 nudos, bajo condiciones de funcionamiento continuo al 100 % de su capacidad, en correspondencia con los requerimientos de navegación fluvial de la zona. Esta embarcación cuenta con dos motores fuera de borda de 93 [kW] modelo Deep blue estándar de Torqeedo, (ver Apéndice D. Sistema

de propulsión estándar Deep Blue de 200 kW de Torquedo). Los siguientes son los datos de potencia calculada para distintas velocidades de maniobra en nudos:

Tabla 2

Resistencia al avance, velocidad y potencia de la embarcación grande

RES TOTAL [kN]	0,59	1,08	1,53	1,76	2,44	3,68	4,54	4,65	4,71	4,81	5,26	5,51	5,06	5,15	5,28	5,34	5,39
Velocidad [km/h]	6,30	7,87	9,13	9,45	11,02	12,59	14,17	15,74	17,32	18,89	23,61	28,34	33,06	34,63	36,21	39,36	42,50
P TOTAL [kW]	2,38	5,38	8,88	10,63	17,00	29,38	40,75	46,50	51,88	57,75	79,00	99,13	106,25	113,25	121,25	133,38	145,50

Se creó una curva de potencia vs velocidad y se calculó la curva de tendencia con función polinómica de grado 2, cuyo comportamiento fue el de una función creciente, proporcional entre la potencia y la velocidad, (ver Apéndice E. Curva de resistencia al avance grande).

3.1.3. Curva de tránsito de una embarcación fluvial

Para analizar adecuadamente la potencia consumida por cada EFE durante el cumplimiento de una ruta, es necesario identificar la curva de tiempo y las etapas que componen el viaje de las embarcaciones fluviales en Colombia. Dichas etapas se distribuyen de la siguiente manera:

- Arranque: corresponde aproximadamente al 8% del tiempo total del viaje.
- Transición a planeo: ocupa cerca del 7% del recorrido.
- Planeo: etapa en la que la velocidad se mantiene prácticamente constante y que representa alrededor del 75% del viaje.
- Maniobra: comprende aproximadamente el 10% del tiempo total.

Lo anterior permite proponer la siguiente grafica como la operación promedio de las embarcaciones en cualquier viaje.

Figura 5

Velocidad de navegación en función del porcentaje de tiempo

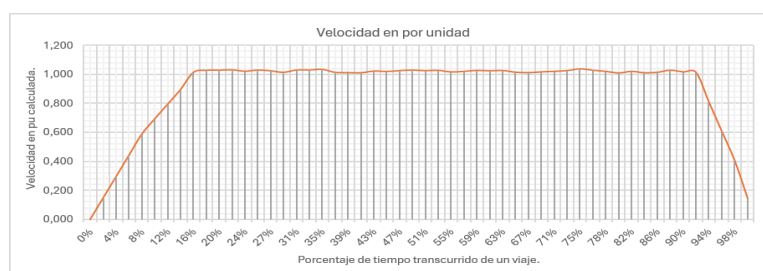


Figura 6

Potencia requerida en función del porcentaje de tiempo



3.1.4. Rutas transitables desde el puerto de Turbo (Puerto Pisisi)

A continuación, se presentan las 10 rutas que se evaluaron para la utilización de las embarcaciones eléctricas definidas.

Tabla 3

Rutas disponibles para viajes cortos y medios desde Puerto Pisisi

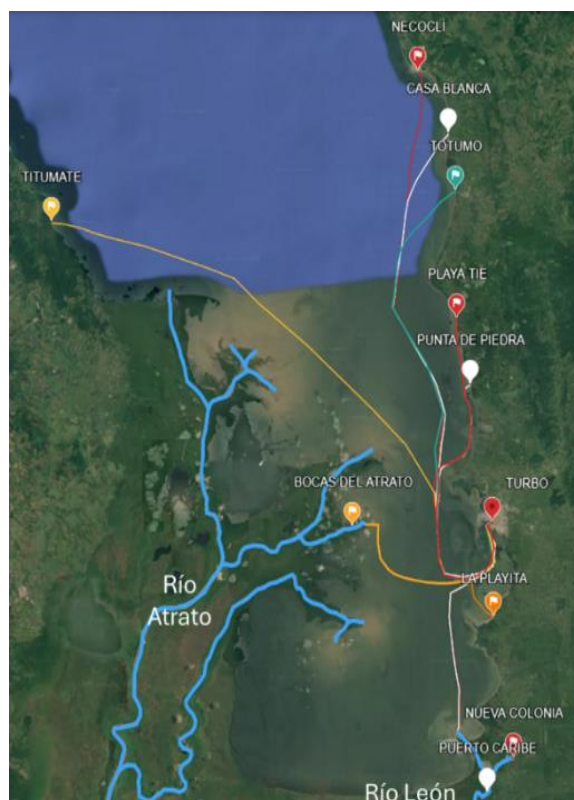
RUTA	SALIDA	DESTINO	km
1	P PISISI	Nueva Colonia	25,07
2	P PISISI	Bocas del Atrato	19,19
3	P PISISI	Playa Tié (Tié)	29,96
4	P PISISI	Punta de Piedra	24,74
5	P PISISI	Titumate (Unguía — Chocó)	55,55
6	P PISISI	Necoclí	50,06
7	P PISISI	Casablanca (Necoclí)	45,86
8	P PISISI	El Totumo (Necoclí)	42,04
9	P PISISI	La playita	25,07
10	P PISISI	Puerto Caribe	19,19

Se determinó que Puerto Caribe y Bocas del Atrato son las poblaciones más cercanas y Titumate (Chocó) la más alejada. Debido a las limitaciones de potencia propias de las embarcaciones, no todas las rutas inicialmente propuestas pueden ser cubiertas por las EFE, por lo que fue necesario reducir el número de rutas.

La Figura 7 presenta la ubicación geográfica de las rutas seleccionadas y los puertos de destino considerados en el estudio.

Figura 7

Mapa de las rutas cortas y medias disponibles desde Puerto Pisisi



3.2. Limitaciones operativas y selección de rutas

La selección de las rutas operativamente viables para los recorridos de las dos embarcaciones se basa en la consideración de diversos factores. Entre estos la potencia de los motores, la distancia de cada ruta en kilómetros y el tiempo de viaje estimado en horas y minutos. Asimismo, se tiene en cuenta el estado de carga (SOC) con el que la embarcación arriba al puerto de destino, junto con la necesidad de instalar puertos de carga y definir las características técnicas de dichos cargadores, de acuerdo con las especificaciones de las baterías de las embarcaciones. De igual manera, se considera la usabilidad de las rutas según los registros poblacionales, con el propósito de identificar las rutas prioritarias.

3.2.1. Información de la población

La información poblacional de los lugares incluidos en el área de estudio fue recopilada a partir de diferentes fuentes institucionales y registros oficiales. Estos datos permiten comprender las características de cada comunidad y constituyen un insumo para el análisis de la usabilidad y priorización de las rutas evaluadas (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2018; Gobernación de Antioquia, s. f.; Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas [IPSE], 2016).

Tabla 4

Población residente en las localidades establecidas como destinos

LUGAR	Lugar	Tipo	Población (reporte)
1	Turbo (cabecera municipal)	Municipio / Área urbana	132.552
2	Nueva Colonia	Corregimiento	19.587
3	Bocas del Atrato	Vereda / Centro poblado	135
4	Playa Tié (Tié)	Vereda / Corregimiento	2.983
5	Punta de Piedra	Corregimiento	2.840
6	Titumate (Unguía — Chocó)	Corregimiento / localidad	600
7	Necoclí	Municipio	45.530
8	Casablanca (Necoclí)	Vereda	615
9	El Totumo (Necoclí)	Corregimiento	2.803
10	La Playita	Vereda	DESCONOCIDA
11	Puerto Caribe	Corregimiento / Centro poblado	DESCONOCIDA

Nota. Datos obtenidos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2018), registros del SISBÉN, Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE), proyecciones oficiales de población y PGIRS de Necoclí (2016–2027).

En esta primera instancia se deben desclasificar los destinos de La playita y Puerto Caribe, puesto que no se encontraron registros de la población que reside el lugar, por ende, quedan como opciones 8 rutas, siendo Necoclí y Nueva Colonia los principales destinos partiendo desde puerto Pisisi.

3.2.2. Capacidad de las EFE

La capacidad en potencia de las embarcaciones constituye un factor determinante para la operación de las rutas consideradas. Esta define los límites asociados a la duración de los recorridos y a la distancia que puede ser cubierta por cada embarcación bajo condiciones operativas. En este sentido, se realiza un análisis para identificar aquellas rutas que, debido a sus requerimientos de distancia y tiempo de navegación, no pueden ser cubiertas por las embarcaciones, lo que conlleva a la eliminación de ciertas rutas del análisis operativo.

Se establecieron los parámetros de potencia total en motores, capacidad de baterías y velocidad de planeo de la ficha técnica de la embarcación, y de acuerdo con las curvas de potencia vs velocidad se calculó la potencia a velocidad de planeo, posterior a esto con la distancia de cada ruta y la potencia que se obtuvo, se calculó el tiempo y el consumo de energía de la embarcación para cada viaje. Una vez calculado el consumo, se comparó con la capacidad de las baterías de acuerdo con el DOD del 90% en ambos casos, de lo cual se pudo concluir que ambas embarcaciones debido a su capacidad son capaces de realizar un viaje a los puertos de destino en Nueva Colonia, Bocas del Atrato, Playa Tie y Punta de Piedra, resaltando que el comportamiento de la embarcación grande es de el de mayor holgura en cada ruta, Lo anterior permite establecer las rutas que puede transitar cada embarcación, (ver Apéndice F. Datos correspondientes a las EFE).

La potencia a velocidad de planeo se estimó a partir de los datos obtenidos en Excel mediante un ajuste por interpolación polinómica cuadrática. Este ajuste permitió aproximar la relación entre la potencia requerida y la velocidad para cada embarcación, obteniéndose las siguientes expresiones:

$$\text{Embarcación pequeña: } P(v) = -0,01816v^2 + 3,7382v - 28,1498 \quad (4)$$

$$\text{Embarcación grande: } P(v) = -0,03143v^2 + 5,49738v - 35,1889 \quad (5)$$

Las ecuaciones (4) y (5) corresponden a una aproximación mediante interpolación polinómica cuadrática. Para velocidades inferiores a 7,41 km/h (ec. 4) y 6,30 km/h (ec. 5), el modelo predice potencias negativas, por lo que se recomienda su uso únicamente para velocidades superiores a dichos valores.

Posteriormente, el tiempo de viaje a velocidad de planeo se calculó dividiendo la distancia recorrida entre la velocidad promedio del viaje, considerando en esta última los diferentes estados operativos de la embarcación durante el trayecto:

$$\text{Tiempo de viaje [h]} = \frac{\text{Distancia [km]}}{\text{Velocidad promedio [km/h]}} \quad (6)$$

Para estimar el consumo energético se consideró el escenario de mayor demanda, correspondiente a la velocidad de planeo. La energía consumida en cada recorrido se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$\text{Consumo [kWh]} = \frac{\text{Distancia [km]}}{\text{Velocidad de planeo} \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right]} * \text{Potencia a velocidad de planeo [kW]} \quad (7)$$

De lo anterior, se obtiene que únicamente 4 rutas de las enlistadas pueden ser transitadas por las EFE debido a las limitaciones poblacionales y a la capacidad de las embarcaciones, y dichas rutas son.

Tabla 5

Rutas técnicamente viables según las limitaciones operativas

Ruta	Salida	Destino	Km	EFE 1	EFE 2
				Consumo [kwh]	Consumo [kwh]
1	P Pisisi	Nueva Colonia	25,1	54,11	85,05
2	P Pisisi	Bocas del Atrato	19,2	41,42	65,10
3	P Pisisi	Playa Tie (Tie)	30	64,66	101,64
4	P Pisisi	Punta de Piedra	24,7	53,39	83,93

4. Cálculos de potencia y energía

4.1. Disponibilidad de red en puertos

Una vez se determinaron las rutas transitables, se procedió a analizar la disponibilidad de red en los puertos, obteniendo que de los 5 involucrados únicamente 1 no cuenta con acceso al SIN, y no se logró encontrar su respectivo informe de telemetría, según el IPSE a enero del 2026 es de los pocos lugares donde no se tiene información. Dado que todas las poblaciones involucradas cuentan con un sistema eléctrico pequeño, compuesto se considera necesario el uso de cargadores de baja potencia y carga lenta.

Tabla 6

Disponibilidad de la red eléctrica en los puertos

No	Lugar	Clasificación política	Proveedor	Suministro	Disponibilidad de recurso
1	Turbo (cabecera municipal)	Municipio / área urbana	EPM	SIN	Red 24h
2	Nueva colonia	Corregimiento	EPM	SIN	Red 24h
3	Bocas del Atrato	Vereda / centro poblado	Independiente	Paneles /Plantas	Sin telemetría
4	Playa Tie (Tie)	Vereda / corregimiento	Independiente	SIN	Red 24h
5	Punta de piedra	Corregimiento	Independiente	SIN	Red 24h

Nota. Datos obtenidos de Esri y del Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE, 2026).

4.2. Cargadores

Para el caso de estudio, ambas embarcaciones utilizan baterías de referencia Deep Blue Battery 40, con una capacidad nominal de 60 Ah y una energía aproximada de 42 kWh por unidad. La embarcación pequeña dispone de un banco conformado por dos baterías, con una energía utilizable total de 75,6 kWh, mientras que la embarcación grande cuenta con cuatro baterías, alcanzando una capacidad utilizable de 151,2 kWh (Torqeedo GmbH, s. f.). A partir de la ficha técnica de la batería Deep Blue Battery 40, se obtuvieron los valores de tensión y potencia necesarios para determinar la corriente máxima de carga admisible, empleando la relación entre potencia, tensión y corriente dada por la Ecuación (10).

$$I = \frac{P}{V} \quad (8)$$

A continuación, se calculan las corrientes de carga correspondientes a las diferentes condiciones de operación especificadas por el fabricante.

Corriente pico (máxima absoluta)

$$I = \frac{95\,000}{352} \approx 270\,A \quad (9)$$

Corriente alta (30 s)

$$I = \frac{87\,000}{352} \approx 247\,A \quad (10)$$

Corriente continua de carga

$$I = \frac{52\,000}{352} \approx 148\,A \quad (11)$$

Los resultados indican que la corriente nominal de carga continua es de 148 A, valor que permite la implementación de cargadores de carga lenta y moderada. Con base en este criterio, se seleccionaron dos cargadores comerciales, de 12 kW (220 V) y 22 kW (380 V), con corrientes máximas de salida de 50 A y 73,3 A, respectivamente, y un rango de tensión de operación entre 350 y 500 Vdc (CELSA S. A. S., 2025). Estas características garantizan la compatibilidad con las especificaciones eléctricas del banco de baterías y permiten establecer tiempos de carga adecuados para la operación de las embarcaciones. (Ver Apéndice G. Fichas técnicas de los cargadores).

4.3. Itinerario de viajes

Para efectos del presente proyecto, se define el término viaje como un traslado entre dos puntos. En este sentido, un desplazamiento de ida constituye un viaje independiente, al igual

que el trayecto de regreso se considera un viaje distinto. Se considera el caso en que las embarcaciones realizarán 1 ruta durante el día, es decir 2 viajes, un viaje en la mañana y uno en la tarde, esto debido al tiempo de carga estimado en los puestos de destino, dada la potencia de los cargadores propuestos como respuesta al suministro de red discontinuo y desconectado del SIN en dichos puertos.

Tabla 7

Itinerario diario de viajes de cada embarcación

Horarios De Salida	Viaje	EFE	Tiempo De Viaje	Hora De Llegada
lunes – miércoles - viernes				
7:00 a. m.	Turbo - Nueva Colonia	2	0 h 51 min	7:51 a. m.
7:00 a. m.	Turbo - Bocas Del Atrato	1	0 h 55 min	7:55 a. m.
1:00 p. m.	Nueva Colonia - Turbo	2	0 h 51 min	1:51 p. m.
1:00 p. m.	Bocas Del Atrato - Turbo	1	0 h 55 min	1:55 p. m.
martes – jueves - sábados				
7:00 a. m.	Turbo - Playa Tie	2	1 h 01 min	8:01 a. m.
7:00 a. m.	Turbo - Punta De Piedra	1	1 h 10 min	8:10 a. m.
1:00 p. m.	Playa Tie - Turbo	2	1 h 01 min	2:01 p. m.
1:00 p. m.	Punta De Piedra - Turbo	1	1 h 10 min	2:10 p. m.

Cada embarcación partirá desde Puerto Pisisi y realizará un viaje hasta el puerto de destino. Una vez arribe, iniciará el proceso de carga hasta alcanzar nuevamente el 100 % de la capacidad de las baterías de las EFE. Al completarse la carga, la embarcación quedará habilitada para efectuar el viaje de retorno hacia Turbo.

4.4. Estado de carga de las embarcaciones tras un viaje

Tras realizar un viaje las embarcaciones han consumido una cantidad de energía, esta se calculó anteriormente, al restar ese valor a la capacidad de las baterías, obtenemos la carga restante, y a su vez, con estos datos usando la siguiente ecuación hallamos el SOC final de las baterías. El SOC final se calculó de la siguiente forma (Castillo-Ocaña, 2021).

$$SOC [\%] = \frac{Carga\ inicial\ [kWh] - Consumo\ [kWh]}{Carga\ inicial\ [kWh]} * 100\% \quad (12)$$

Calculamos el SOC al finalizar cada viaje y obtenemos que, para la embarcación pequeña, la ruta 3 (P. Pisisi – Playa Tie) llega casi al límite del DOD, lo que podría ocasionar una sobre descarga de las baterías, reduciendo su vida útil, afectando su capacidad de almacenamiento y aumentando el riesgo de daños permanentes en los equipos. Por su parte, para la embarcación grande, todas las rutas le dejan por encima de un SOC del 30%, lo que permite afirmar que ninguna de ellas le lleva al límite. Se calculó la potencia a cargar, que debido al objetivo de llegar al 100% de la carga, es igual a la energía consumida durante el trayecto, dato que se calculó anteriormente. Al dividir la potencia a cargar sobre la potencia

de cada cargador, obtenemos el tiempo en horas que le toma a la embarcación cargarse al 100%. A continuación, se muestra una tabla con estos datos registrados y calculados para cada embarcación por cada ruta.

Tabla 8

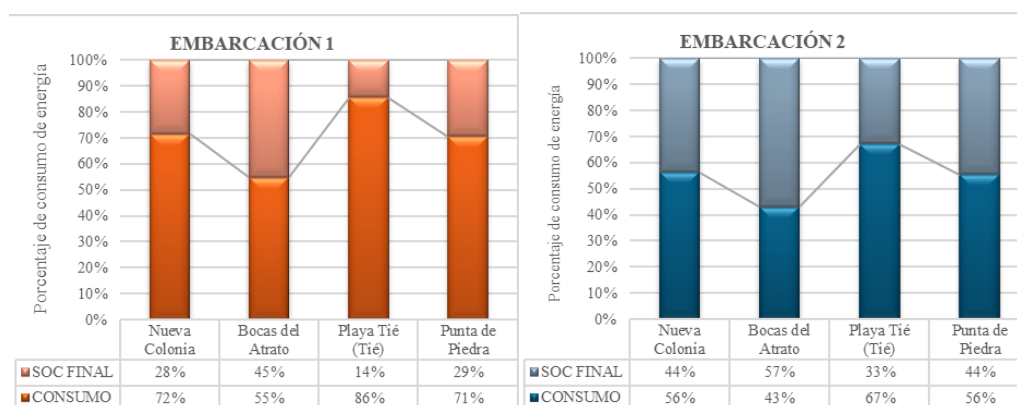
Estado de carga de las embarcaciones después de recorrer las rutas

EMBARCACIÓN PEQUEÑA										
RUTA	DESTINO	km	CAPACIDAD BATERIAS [kWh]	CONSUMO [kWh]	CARGA RESTANTE [kWh]	SOC FINAL [%]	POTENCIA A CARGAR [kW]	POTENCIA DEL CARGADOR [kW]	EFICIENCIA DEL CARGADOR [%]	TIEMPO DE CARGA [h]
1	Nueva Colonia	25,07	75,6	54,11	21,49	28%	54,11	12,00	95%	4,7462
2	Bocas del Atrato	19,19	75,6	41,42	34,18	45%	41,42	12,00	95%	3,6330
3	Playa Tié (Tié)	29,96	75,6	64,66	10,94	14%	64,66	12,00	95%	5,6719
4	Punta de Piedra	24,74	75,6	53,39	22,21	29%	53,39	12,00	95%	4,6837
EMBARCACIÓN GRANDE										
RUTA	DESTINO	km	CAPACIDAD BATERIAS [kWh]	CONSUMO [kWh]	CARGA RESTANTE [kWh]	SOC FINAL [%]	POTENCIA A CARGAR [kW]	POTENCIA DEL CARGADOR [kW]	EFICIENCIA DEL CARGADOR [%]	TIEMPO DE CARGA [h]
1	Nueva Colonia	25,07	151,2	85,05	66,15	44%	85,05	22,00	95%	4,0695
2	Bocas del Atrato	19,19	151,2	65,10	86,10	57%	65,10	22,00	95%	3,1151
3	Playa Tié (Tié)	29,96	151,2	101,64	49,56	33%	101,64	22,00	95%	4,8633
4	Punta de Piedra	24,74	151,2	83,93	67,27	44%	83,93	22,00	95%	4,0160

La Figura 8 compara el consumo energético y el estado de carga (SOC) final de ambas embarcaciones para las rutas evaluadas.

Figura 8

Consumo energético y estado de carga final de las embarcaciones según la ruta



El análisis revela que la embarcación 2 destaca por su eficiencia energética, logrando una reducción constante del consumo entre un 15 y un 20 % en todas las rutas evaluadas. Por el contrario, la embarcación 1 opera en varios trayectos cerca de su límite energético, especialmente en la ruta hacia Playa Tie, donde el bajo SOC final compromete la autonomía disponible. Por esta razón, se establece que la embarcación pequeña operará únicamente en las rutas hacia Nueva Colonia y Punta de Piedra, mientras que la embarcación grande atenderá las rutas hacia Bocas del Atrato y Playa Tie, con el fin de evitar que cualquiera de

las dos alcance valores bajos de estado de carga (SOC) y garantizar una operación segura y confiable.

Figura 9

Organigrama de los viajes realizados por los dos perfiles de embarcaciones

PUERTOS		CH - Puerto	CARGANDO
T	TURBO (P PISISI)	Origen - Destino	VIAJE
NC	NUEVA COLONIA		
BA	BOCAS DEL ATRATO		
PT	PLAYA TIE		
PP	PUNTA DE PIEDRA		

EMBARCACION GRANDE	LUN - MIER - VIER								MAR - JUEV - SAB							
	T	T - BA	BA	CH - BA	BA	BA - T	T	CH - T	T	T - PP	PP	CH - PP	PP	PP - T	T	CH - T
	0 h 55 min			3 h 38 min		0 h 57 min		3 h 38 min		1 h 10 min		4 h 42 min		1 h 13 min		4 h 42 min
Puerto de origen			puerto de destino	Embarcación cargando		Puerto de origen		puerto de destino	Puerto de origen			Embarcación cargando		Puerto de origen		puerto de destino
Viaje 1						Viaje 2		Embarcación cargando	Viaje 1					Viaje 2		Embarcación cargando

EMBARCACION PEQUEÑA	LUN - MIER - VIER								MAR - JUEV - SAB							
	T	T - NC	NC	CH - NC	NC	NC - T	T	CH - T	T	T - PT	PT	CH - PT	PT	PT - T	T	CH - T
	0 h 51 min			4 h 05 min		0 h 53 min		4 h 05 min		1 h 01 min		4 h 52 min		1 h 04 min		4 h 52 min
Puerto de origen			puerto de destino	Embarcación cargando		Puerto de origen		puerto de destino	Puerto de origen			Embarcación cargando		Puerto de origen		puerto de destino
Viaje 1						Viaje 2		Embarcación cargando	Viaje 1					Viaje 2		Embarcación cargando

Para comprender mejor el funcionamiento de las embarcaciones y los horarios en los que se transitan las diferentes rutas. En la Figura 9 se muestra el organigrama ilustrativo correspondiente. En el caso propuesto tenemos 5 puertos que serán nuestros puntos de partida y destino, en cada uno de ellos se hace desembarco de pasajeros, se espera a que la embarcación cargue por completo y nuevamente se carga con el cupo de la embarcación para retornar al puerto de Turbo. Las celdas negras con letras blancas hacen referencia al puerto en el que se encuentra la embarcación, las celdas en gris presentan el puerto de origen y el puerto de destino, haciendo referencia a un viaje, en la parte inferior encontramos el tiempo en horas y minutos estimado a velocidad de planeo, justo después se presenta la celda beige, en la cual se encuentra el indicador “CH” que significa cargando, junto a las letras correspondientes al puerto en el que se está realizando el proceso de carga.

4.5. Consumo en cada puerto

Dada la rutina de viajes establecida, es posible definir el perfil de consumo en cada puerto implicado, siendo que los 5 puertos implicados son Turbo (puerto Pisisi) Nueva Colonia, Bocas Del Atrato, Playa Tie y Punta De Piedra.

4.5.1. Consumo en puerto de Nueva Colonia

En este puerto únicamente opera la embarcación de mayor tamaño, la cual dispone de un cargador de 22 kW. Su llegada está prevista a las 7:51 a.m., iniciando inmediatamente el proceso de recarga, que tiene una duración aproximada de 4 horas y 5 minutos. De este modo, la embarcación estaría lista alrededor de las 11:56 a.m., dejando un margen cercano a una hora antes del siguiente viaje programado a la 1:00 p.m., tiempo suficiente para alistamiento y posibles contingencias, (ver Apéndice H. Consumo en puerto Nueva Colonia)

4.5.2. Consumo en puerto de Bocas del Atrato

La embarcación pequeña es la única que arriba a este puerto, utilizando un cargador de 12kW. El arribo ocurre a las 7:55 a.m. y el tiempo de carga es de 3 horas y 38 minutos, por lo que estará operativa a las 11:33 a.m. aproximadamente. El siguiente viaje está programado para la 1:00 p.m., (ver Apéndice I. Consumo en puerto Bocas del Atrato)

4.5.3. Consumo en puerto de Playa Tie

La embarcación de mayor tamaño es la única que opera en este puerto y cuenta con un cargador de 22 kW. Su llegada está programada a las 8:01 a.m., tras lo cual inicia un proceso de recarga con una duración aproximada de 4 horas y 52 minutos. En consecuencia, quedaría disponible alrededor de las 12:53 p.m., justo antes del siguiente viaje previsto para la 1:00 p.m. (Ver Apéndice J. Consumo en puerto Playa Tie)

4.5.4. Consumo en puerto de Punta de Piedra

Este puerto es visitado únicamente por la embarcación pequeña, cuyo cargador establecido es de 12kW, y realizará su proceso de arribo al puerto a las 8:10 a.m., su proceso de carga dura 4h y 42 minutos, para quedar disponible desde las 12:52 p.m. aproximadamente, sin embargo, el siguiente viaje se realizará a la 1:00 pm, (ver Apéndice K. Consumo en puerto Punta de Piedra)

4.5.5. Consumo en puerto Pisisi en Turbo/Antioquia

Puerto Pisisi es el principal puerto motivo de estudio, aquí iniciarán y finalizarán las rutas recorridas por las embarcaciones, zarparán a diario a las 7:00 a.m. y se espera que retornen al puerto aproximadamente a las 2:00 p.m., a través del cálculo realizado de los cargadores y el tiempo que tardará cada embarcación cargándose, se ha realizado la siguiente estimación de consumo.

Tabla 9*Consumo horario en Puerto Pisisi*

HORA	Lunes miércoles viernes	Martes jueves sábados
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	34000	22000
15	34000	34000
16	34000	34000
17	34000	34000
18	12000	34000
19	0	34000
20	0	0
TOTAL [Wh]	148000	192000
TOTAL [kWh]	148	192

Apreciamos que el pico de consumo se da para los lunes, miércoles y viernes, entre 2 y 5 pm, mientras que los martes, jueves y sábado se da entre 3 y 7 pm. La potencia instantánea máxima es de 34 kW, básicamente porque los cargadores de 12 y 22 kW están trabajando al tiempo. Así mismo se estiman 192 kWh como el máximo consumo diario por el conjunto de cargadores, (ver Apéndice L. Consumo en puerto Pisisi)

5. Dimensionamiento en puerto Pisisi, Turbo, Antioquia

5.1. Dimensionamiento de la microrred

Actualmente, el municipio de Turbo dispone de varios proyectos energéticos registrados ante la UPME, enfocados en fortalecer y modernizar su infraestructura eléctrica. El análisis del comportamiento de la red muestra que el suministro es confiable y las fallas en el servicio son poco frecuentes. Por ello, se decidió trabajar únicamente con paneles fotovoltaicos, ya que en Puerto Pisisi no se alcanza la velocidad mínima de arranque de las turbinas eólicas comerciales. Además, no se contempla el uso de almacenamiento, debido a que este puerto cuenta con un servicio eléctrico confiable y continuo. En consecuencia, se plantea implementar una microrred on-grid con generación fotovoltaica y sin respaldo de baterías.

5.1.1. Dimensionamiento de paneles

En el mercado actual se encuentran paneles con potencias comerciales de 525 Wp, 625 Wp y 710 Wp, para este caso usaremos paneles de 710 Wp. De la ficha técnica del panel TENSITE EM-710PH, tomado como referencia, obtenemos la tensión de circuito abierto, la corriente de corto circuito, la tensión y corriente de máxima potencia y las medidas de los

paneles en metros. Además, se sabe que la potencia pico indicada en la ficha técnica corresponde a condiciones estándar de ensayo (STC, Standard Test Conditions), las cuales consideran una irradiancia de 1000 W/m², una temperatura de célula de 25 °C y una masa de aire de 1.5 (AM1.5) (AutoSolar Colombia, s. f.).

Tabla 10

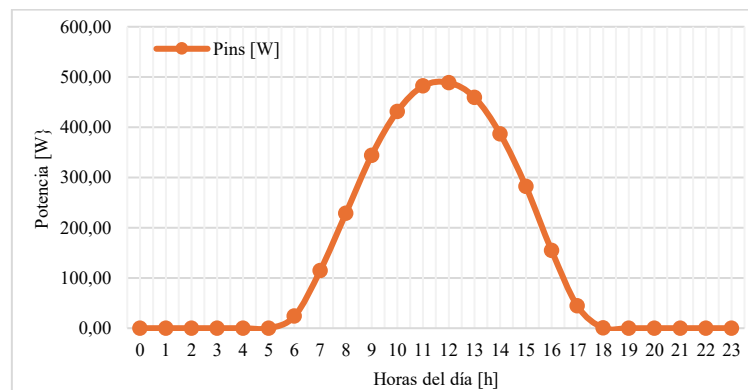
Datos de placa del panel, consumo y disponibilidad

Datos de placa		Calculado	
Voc [V]	48,94	Consumo [kWh]	192
Isc [A]	18,45	Potencia pico consumida [kW]	34
Vmp [V]	40,69	Número mínimo de paneles	48
Imp [A]	17,45	HSP [h]	4,85
Largo [m]	1,30		
Ancho [m]	2,40		
P pico [W]	710		

La Figura 10 muestra la curva de generación diaria estimada para un panel fotovoltaico de 710 Wp bajo las condiciones de irradiancia del puerto de Turbo (Ministerio de Energía de Chile, 2018).

Figura 10

Curva de generación de un panel fotovoltaico en el puerto de Turbo



La gráfica anterior muestra que la potencia pico real en el sitio de instalación es de 489 W, lo que indica que un panel genera aproximadamente 3442 Wh/día, es decir, 3.442 kWh/día. Con esta información se procede a calcular el número mínimo de paneles.

$$\#PANELES = \frac{E_{consumida} * 1.05}{E_{generada}} = \frac{192 * 1.05}{3.442} \approx 59 \quad (13)$$

Calculamos la Energía generada para 59 paneles.

$$E_{generada} = E_{generada} * \#PANELES = 3.442 * 59 = 203 \text{ kWh/día} \quad (14)$$

Observamos, que la energía generada es ligeramente superior a la energía requerida por el sistema para suplir la carga de las embarcaciones, sin embargo, se decide aproximar el número de paneles a 60, para tener una mejor distribución a la hora de armar los strings.

$$E_{generada} = E_{generada} * \#PANELES = 3.442 * 60 = 206 \text{ kWh/día} \quad (15)$$

Para finalmente obtener 206 [kWh/día] generados por el conjunto de paneles fotovoltaicos.

5.1.2. Dimensionamiento de inversor

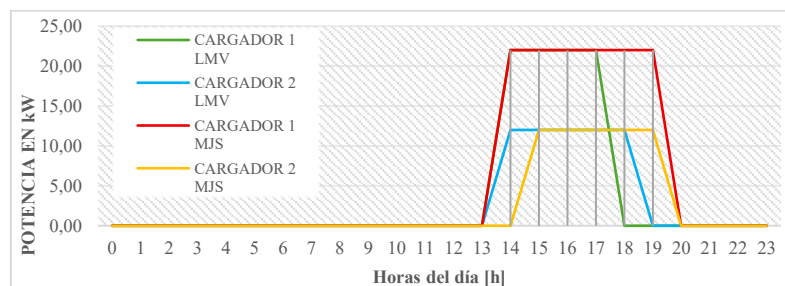
Dado que los cargadores son trifásicos, requieren tensiones de 220 V y 380 V. Actualmente, en el puerto de Turbo se dispone de una red de 240/120 V (Empresas Públicas de Medellín [EPM], s. f.). Para el cargador de 22 kW a 380 V, se plantea utilizar un transformador trifásico de 220/380 V. Para determinar la potencia del inversor, se toma como referencia la potencia máxima DC, que se calcula multiplicando los 59 paneles por la 710W que es la potencia pico por panel, obteniendo 41,89 kW. Para tener mayor holgura en la generación se aconseja un inversor de 35kW, lo que permitiría un sobredimensionamiento en la generación del 20% y mayor duración de del inversor en la potencia pico de generación.

5.2. Cálculo de potencias generadas y consumidas

Tras identificar la potencia consumida en puerto Pisisi se presenta el siguiente gráfico con el fin de comparar las curvas de cada cargador y consumo por grupo de días.

Figura 11

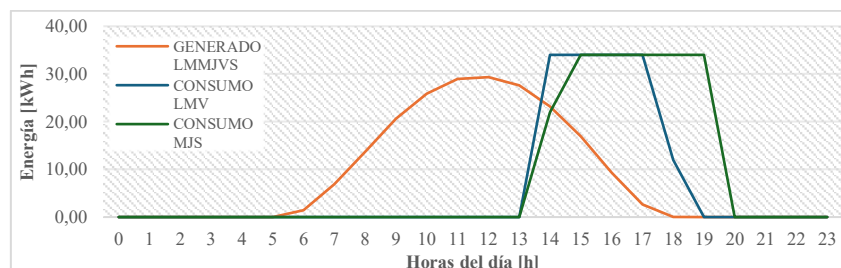
Consumo energético en Puerto Pisisi según el grupo de días



Se determinó el consumo total por días y se procedió a graficar de forma comparativa lo generado por el sistema fotovoltaico junto con la energía consumida por el sistema de cargadores.

Figura 12

Energía generada y consumida en Puerto Pisisi según el grupo de días



Se calculó también la energía en kWh que se requiere de la red a partir de la comparación de las curvas de consumo y generación PV, obteniendo así la curva de red.

Figura 13*Energía importada y exportada de la red en función de la hora del día*

Para validar la suficiencia del sistema para suplir la demanda se realiza el cálculo total para el balance energético entre generación y consumo.

Tabla 11*Balance energético diario*

Generado LMMJVS	Consumo LMV	Consumo MJS	Cargador 1 LMV	Cargador 2 LMV	Cargador 1 MJS	Cargador 2 MJS
206,49	148,00	192,00	88,00	60,00	132,00	60,00
kWh/día	kWh/día	kWh/día	kWh/día	kWh/día	kWh/día	kWh/día

Observamos que efectivamente la energía generada suple el consumo en cualquiera de los dos grupos de días, siendo esta 206.49 kWh/día, mientras los consumos son de 148 y 192 kWh/día. A su vez, se obtuvo la cantidad de energía exportada a la red, así como la cantidad de energía importada, a partir de esto se constata que en ambos casos se estará exportando.

Tabla 12*Energía importada y exportada según el grupo de días*

Exportado LMV	Exportado MJS	Importado LMV	Importado MJS
154,37	155,58	95,87	141,08
kWh/día	kWh/día	kWh/día	kWh/día

Tabla 13*Balance entre energía importada y exportada*

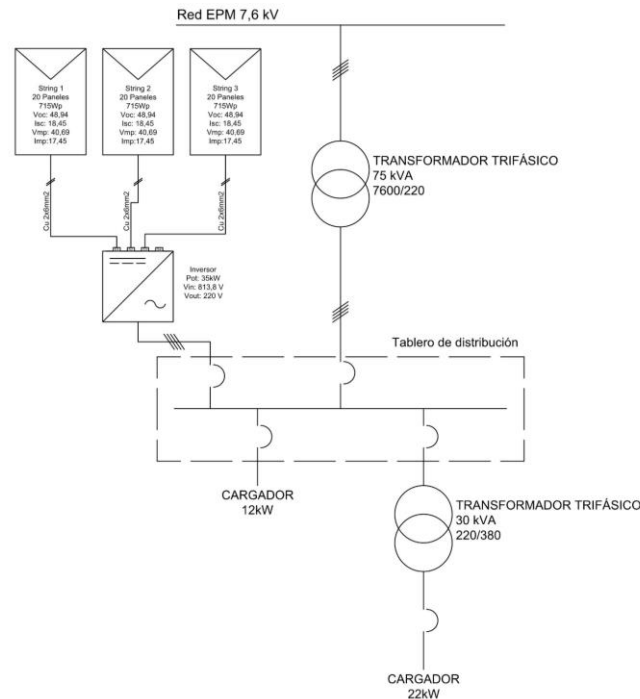
LMV	MJS
58,49	14,49
kWh/día	kWh/día

6. Validación del sistema mediante simulación en Simulink (Matlab)

Para realizar la validación del funcionamiento en Simulink es necesario plantear un modelo visual de la microrred.

Figura 14

Diagrama unifilar de la microrred propuesta



El modelo anterior, plantea el sistema conformado por la generación fotovoltaica, la conversión DC/AC trifásica y la repartición entre los dos cargadores que consumirán según lo calculado anteriormente.

6.1. Cálculo de corrientes

A partir de las potencias calculadas y las tensiones de funcionamiento, es posible calcular las corrientes del sistema.

6.1.1. Corriente entregada por el inversor

La corriente entregada por el inversor está dada por la potencia generada por los paneles, siendo esta la potencia trifásica usada para suministrarle energía a la carga y exportar los excedentes. Como medida de concordancia con los resultados esperados, se verificó que el comportamiento de la corriente calculada es proporcional a la curva de irradiancia en el sitio y se calculó de la siguiente manera.

$$I_L = \frac{P3F}{\sqrt{3}V_L} \quad (16)$$

I_L Corriente de línea

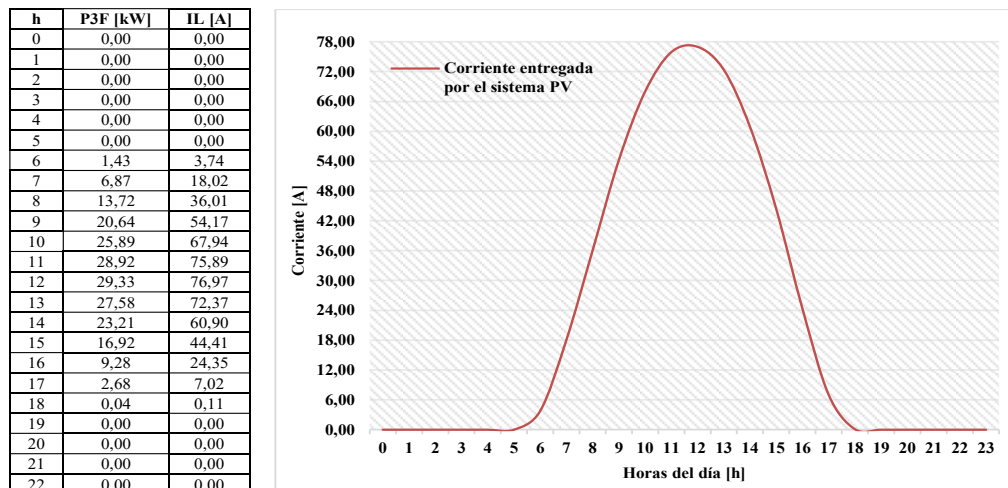
P_{3F} Potencia trifásica

V_L Tensión de línea

Dando como resultado lo siguiente.

Figura 15

Corriente de línea entregada por el inversor fotovoltaico



El cargador de la embarcación pequeña es de 12 kW, opera a 220V de línea y se le atribuye según la ficha técnica un factor de potencia aproximado de 1 (De Ángelo & Serra, 2021). El cargador de la embarcación grande es de 22kW, opera a 380V de línea, y al igual que el otro cargador su factor de potencia aproximado es 1. Pese a la tensión nominal a la que opera, se debe conectar un transformador 220V/380V de 25kVA para conectarlo a la tensión nominal del sistema que es 208V. Se tiene la potencia trifásica consumida por cada cargador, la tensión de línea a la que operan y el factor de potencia de operación, con lo cual se calcula la corriente.

$$I_{Ls} = \frac{P_s}{\sqrt{3}V_L * fp} \quad (17)$$

I_{Ls} Corriente de línea

P_s Potencia del cargador

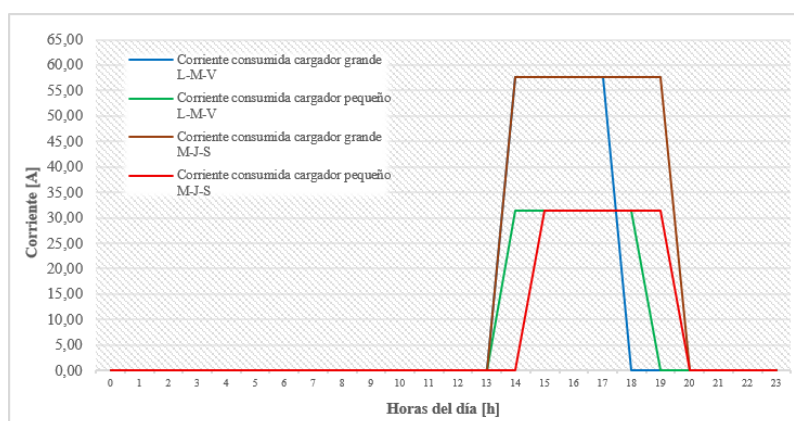
V_L Tensión de línea

fp factor de potencia o $\cos \cos (\theta_s)$

Obteniendo así la gráfica de intensidad RMS que al compararse con el comportamiento de la potencia es proporcional dado que el factor de la potencia se considera 1.

Tabla 14*Corriente consumida por los cargadores durante la recarga de las embarcaciones*

h	L-M-V				M-J-S			
	CHARG PEQ		CHARG GRAND		CHARG PEQ		CHARG GRAND	
	Ps [kW]	ILS [A]	Ps [kW]	ILS [A]	Ps [kW]	ILS [A]	Ps [kW]	ILS [A]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
...	...	...	...	...	...	...	...	...
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	12,00	31,49	22,00	57,74	0,00	0,00	22,00	57,74
15	12,00	31,49	22,00	57,74	12,00	31,49	22,00	57,74
16	12,00	31,49	22,00	57,74	12,00	31,49	22,00	57,74
17	12,00	31,49	22,00	57,74	12,00	31,49	22,00	57,74
18	12,00	31,49	0,00	0,00	12,00	31,49	22,00	57,74
19	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	31,49	22,00	57,74
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Figura 16*Corriente consumida según la embarcación y el día de operación*

Dada la condición de factor de potencia 1, el comportamiento del valor RMS de las corrientes es proporcional al comportamiento de sus respectivas curvas de potencia consumida.

6.1.2. Corriente RMS de red

La corriente que fluye por la acometida de la red a la microrred se divide en dos rangos de tiempo, cuando se está exportando energía y cuando se está consumiendo de la red.

Tabla 15*Estado de los equipos y horarios de operación*

Lunes – Miércoles – Viernes						
ETAPA	INICIO	FIN	MICRORRED	PANELES	CARGADOR 1 (12kW)	CARGADOR 2 (22kW)
1	6:00 a. m.	1:40 a. m.	EXPORTANDO	GENERANDO	STANDBY	STANDBY
2	1:40 p. m.	2:20 p. m.	EXPORTANDO	GENERANDO	CONSUMIENDO	CONSUMIENDO
3	2:20 p. m.	6:00 p. m.	IMPORTANDO	GENERANDO	CONSUMIENDO	CONSUMIENDO
4	6:00 p. m.	7:40 p. m.	IMPORTANDO	SIN GENERAR	CONSUMIENDO	CONSUMIENDO
5	7:40 p. m.	6:00 a. m.	STANDBY	SIN GENERAR	STANDBY	STANDBY
Martes – Jueves – Sábado						
ETAPA	INICIO	FIN	MICRORRED	PANELES	CARGADOR 1 (12kW)	CARGADOR 2 (22kW)
1	6:00 a. m.	1:40 a. m.	EXPORTANDO	GENERANDO	STANDBY	STANDBY
2	1:40 p. m.	2:00 p. m.	EXPORTANDO	GENERANDO	CONSUMIENDO	CONSUMIENDO
3	2:00 p. m.	6:00 p. m.	IMPORTANDO	GENERANDO	CONSUMIENDO	CONSUMIENDO
4	6:00 p. m.	6:20 p. m.	IMPORTANDO	SIN GENERAR	CONSUMIENDO	CONSUMIENDO
5	6:20 p. m.	6:00 a. m.	STANDBY	SIN GENERAR	STANDBY	STANDBY

- Zona de exportación

Según los datos recopilados la zona de exportación se encuentra en las etapas 1 y 2, que se dan entre las 6 am de todos los días y las 2:20 pm los lunes miércoles y viernes, y por su parte los martes jueves y sábados hasta las 2:00 pm. Se calculó la energía exportada haciendo la diferencia entre la energía generada y la energía consumida.

$$E_{exp} = |E_{gen} - E_{con}| \quad (18)$$

E_{exp} Energía exportada

E_{gen} Energía generada por el sistema fotovoltaico

E_{con} Energía consumida

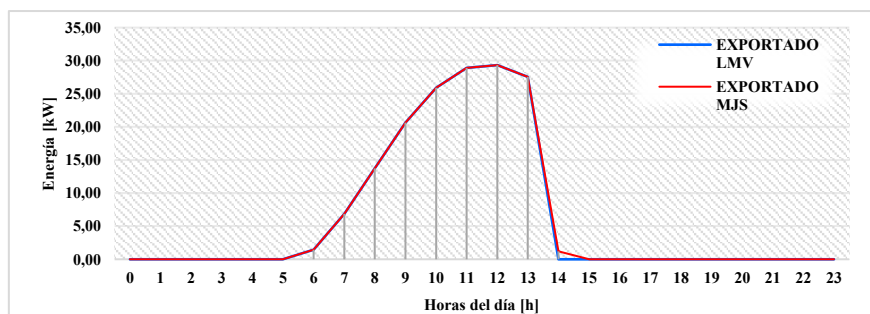
Tabla 16

Energía exportada según el grupo de días

Hora	<i>lun – mier – vier</i>			<i>mar – jue – sab</i>		
	E_{gen}	E_{con}	E_{imp}	E_{gen}	E_{con}	E_{imp}
6	1,43	0,00	1,43	1,43	0,00	1,43
7	6,87	0,00	6,87	6,87	0,00	6,87
8	13,72	0,00	13,72	13,72	0,00	13,72
9	20,64	0,00	20,64	20,64	0,00	20,64
10	25,89	0,00	25,89	25,89	0,00	25,89
11	28,92	0,00	28,92	28,92	0,00	28,92
12	29,33	0,00	29,33	29,33	0,00	29,33
13	27,58	0,00	27,58	27,58	0,00	27,58
14	23,21	34,00	0,00	23,21	22,00	1,21

Figura 17

Energía exportada según la hora del día



- Zona de importación

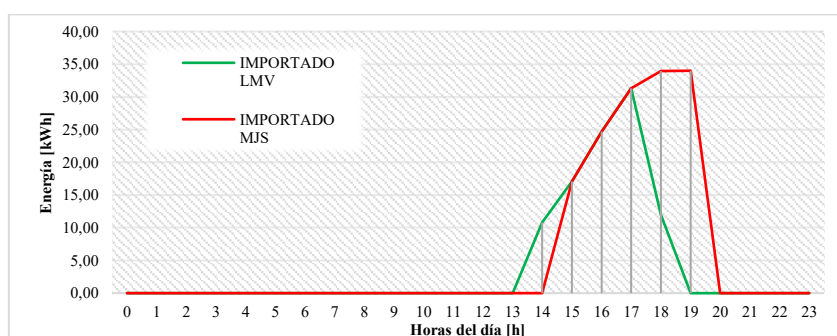
El estudio realizado de las etapas muestra que la zona de importación se da en las etapas 3 y 4, entre las 2:20 pm y las 7:40 pm los lunes miércoles y viernes, y por su parte los martes jueves y sábados entre las 2:00 pm y las 6:20 pm. Se calculó la energía importada de la misma forma que la energía exportada haciendo la diferencia entre la energía generada y la energía consumida.

Tabla 17*Energía importada según el grupo de días*

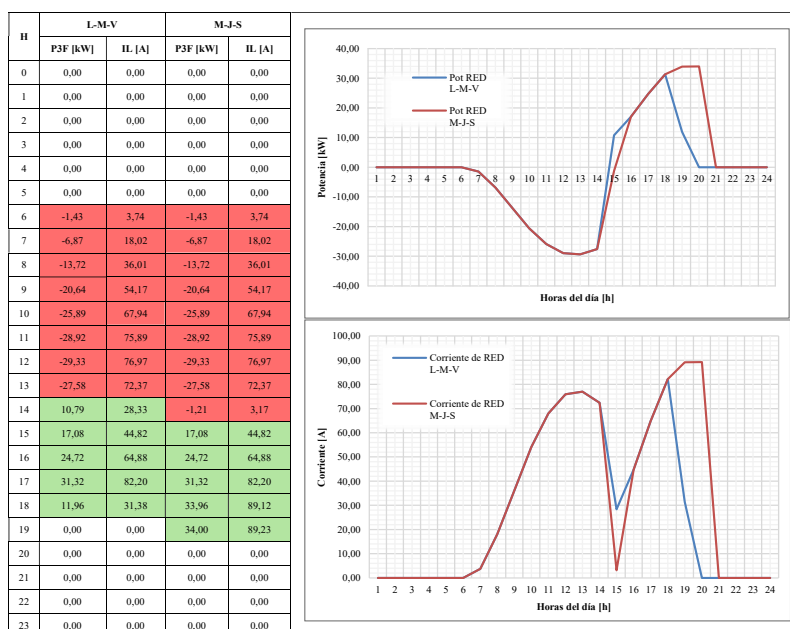
Hora	<i>lun – mier – vier</i>			<i>mar – jue – sab</i>		
	E_{gen}	E_{con}	E_{imp}	E_{gen}	E_{con}	E_{imp}
14	23,21	34,00	10,79	23,21	22,00	0,00
15	16,92	34,00	17,08	16,92	34,00	17,08
16	9,28	34,00	24,72	9,28	34,00	24,72
17	2,68	34,00	31,32	2,68	34,00	31,32
18	0,04	12,00	11,96	0,04	34,00	33,96
19	0,00	0,00	0,00	0,00	34,00	34,00

Figura 18

Energía importada según la hora del día



Partiendo de los datos calculados, y teniendo en cuenta que la red trabaja a 220V en el puerto de Turbo, se procede a calcular la corriente RMS de red.

Figura 19*Corriente RMS de la red eléctrica*

En rojo observamos la zona de exportación y en verde la zona de importación, notamos que depende directamente de la potencia que se consume en el lapso en que el sistema fotovoltaico esté generando y las embarcaciones se estén cargando.

6.2. Simulación en Simulink

6.2.1. Cálculo de resistencia como modelado de carga consumida

Se encontraron los siguientes valores de resistencia para cada cargador, donde “OC” hace referencia a circuito abierto (sin consumo), los demás se calcularon así:

$$R_L = \frac{V_L^2}{P_{3F}} \quad (19)$$

V_L Tensión de línea

P_{3F} Potencia trifásica

R_L Resistencia o carga

Tabla 18

Resistencias calculadas para el modelo de simulación

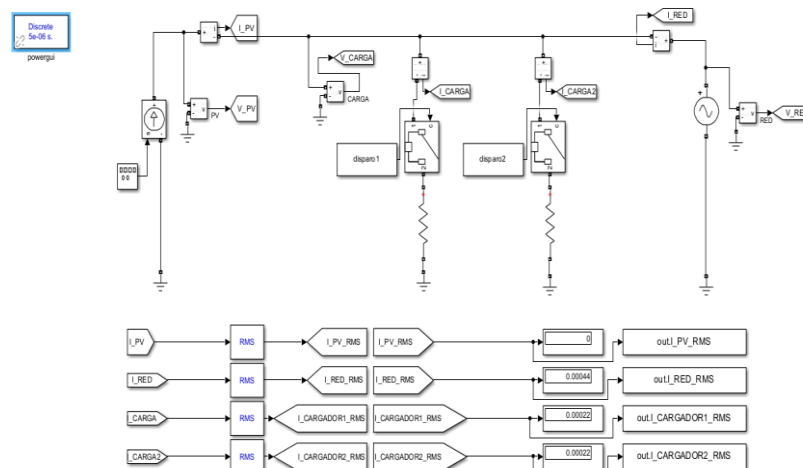
Hora	CARGADOR 1 LMV	CARGADOR 2 LMV	CARGADOR 1 MJS	CARGADOR 2 MJS
12	OC	OC	OC	OC
13	OC	OC	OC	OC
14	2,20	4,03	2,20	OC
15	2,20	4,03	2,20	4,03
16	2,20	4,03	2,20	4,03
17	2,20	4,03	2,20	4,03
18	OC	4,03	2,20	4,03
19	OC	OC	2,20	4,03
20	OC	OC	OC	OC

6.2.2. Modelo de simulación en Matlab

Con el objetivo de corroborar el funcionamiento y los cálculos realizados se propone el siguiente modelo de simulación. Se introdujeron los valores de corriente entregada por el sistema fotovoltaico en la fuente de corriente controlada, se simularon las cargas como resistencias dada su condición de factor de potencia como la unidad, los interruptores fueron la herramienta para controlar que la carga estuviera conectada o desconectada, y la fuente de tensión AC es la representación de la red.

Figura 20

Modelo de simulación desarrollado en MATLAB/Simulink



Se simularon cada uno de los valores de corriente entregada por el sistema PV, y las cargas conectadas y desconectadas según su horario, para lo cual se usó el siguiente código.

Figura 21

Código utilizado para la recopilación de datos de la simulación

```

1 clear all; clc; close all;
2 LMV = readmatrix('Perfiles_Base_Embarcaciones_ULTIMAVR.xlsx', 'Sheet', 'Hoja1', 'Range', 'B5:H28');
3 IPVV = LMV(:,2);
4 CHARG1 = LMV(:,3);
5 CHARG2 = LMV(:,4);
6 RED = LMV(:,5);
7 R11 = LMV(:,6);
8 R22 = LMV(:,7);
9 t = 0:1:23;
10
11 for k=1:24
12     disparo1 = 1;
13     disparo2 = 1;
14     IPV = IPVV(k,1);
15     R1 = R11(k,1);
16     R2 = R22(k,1);
17     if R1==0
18         disparo1 = 0;
19         R1 = 0.001;
20     end
21     if R2==0
22         disparo2 = 0;
23         R2 = 0.0001;
24     end
25     out = sim('untitled', 'StopTime', '0.5');
26     CORRIENTE_PV(k) = out.I_PV_RMS(100001);
27     CORRIENTE_RED(k) = out.I_RED_RMS(100001);
28     CORRIENTE_CARG1(k) = out.I_CARGADOR1_RMS(100001);
29     CORRIENTE_CARG2(k) = out.I_CARGADOR2_RMS(100001);
30
31 end

```

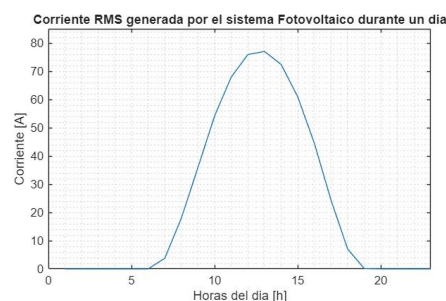
Por medio de la simulación se halló los valores de corrientes de los demás sectores del sistema, con el fin de ser comparados y así determinar la validez de lo calculado anteriormente.

7. Resultados

Con el fin de validar el funcionamiento de la microrred propuesta, se realizaron simulaciones durante un periodo de 24 horas en MATLAB/Simulink. A continuación, se presentan las principales variables eléctricas obtenidas para analizar el comportamiento del sistema bajo el perfil diario de operación de las embarcaciones. La Figura 22 presenta la corriente RMS suministrada por el inversor a partir de la generación fotovoltaica durante el periodo de simulación.

Figura 22

Corriente RMS suministrada por el inversor fotovoltaico durante la simulación de 24 horas



La Figura 23 muestra la corriente RMS intercambiada con la red eléctrica durante los días lunes, miércoles y viernes.

Figura 23

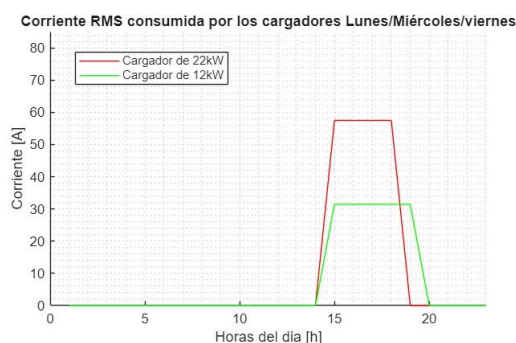
Corriente RMS intercambiada con la red eléctrica durante la operación del sistema: lunes, miércoles y viernes



La Figura 24 presenta la corriente RMS demandada por los cargadores de 22 kW y 12 kW durante el proceso de recarga de las embarcaciones lunes, miércoles y viernes.

Figura 24

Corriente RMS demandada por los cargadores de 22 kW y 12 kW durante la recarga: lunes, miércoles y viernes



La Figura 25 muestra la corriente RMS intercambiada con la red eléctrica durante los días martes, jueves y sábado.

Figura 25

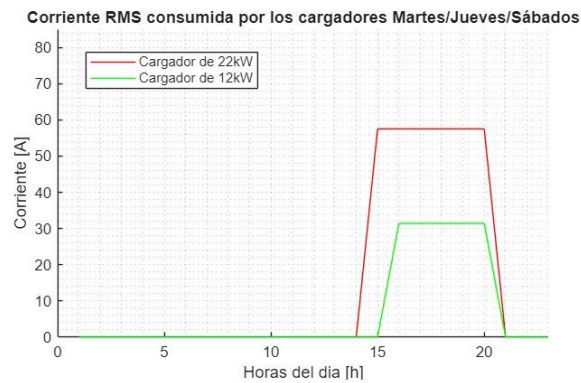
Corriente RMS intercambiada con la red eléctrica durante la operación del sistema: martes, jueves y sábado



La Figura 26 presenta la corriente RMS demandada por los cargadores de 22 kW y 12 kW durante el proceso de recarga de las embarcaciones durante los días martes, jueves y sábado.

Figura 26

Corriente RMS demandada por los cargadores de 22 kW y 12 kW durante la recarga: martes, jueves y sábado



Con el fin de validar los resultados obtenidos en la simulación, se compararon las corrientes RMS de los cargadores con los valores calculados analíticamente. A partir de esta comparación se determinó el porcentaje de error mediante la Ecuación (20).

$$Error = \frac{Teórico - Simulado}{Teórico} \quad (20)$$

La Figura 27 y la Figura 28 presentan el porcentaje de error entre las corrientes RMS teóricas y las obtenidas mediante la simulación para los cargadores de 22 kW y 12 kW, respectivamente.

Figura 27

Porcentaje de error corriente RMS teórica vs simulada del cargador de 22 kW

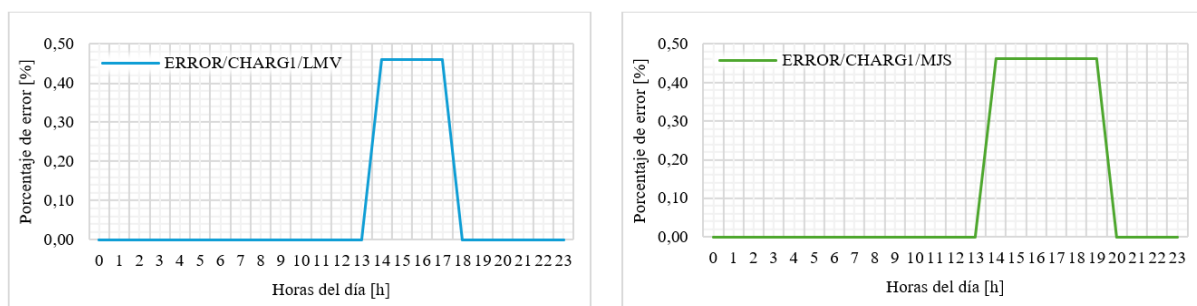
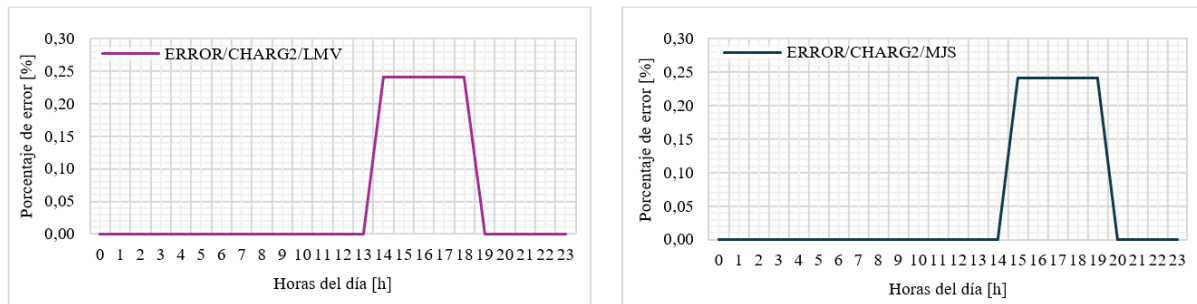


Figura 28

Porcentaje de error corriente RMS teórica vs simulada del cargador de 12 kW

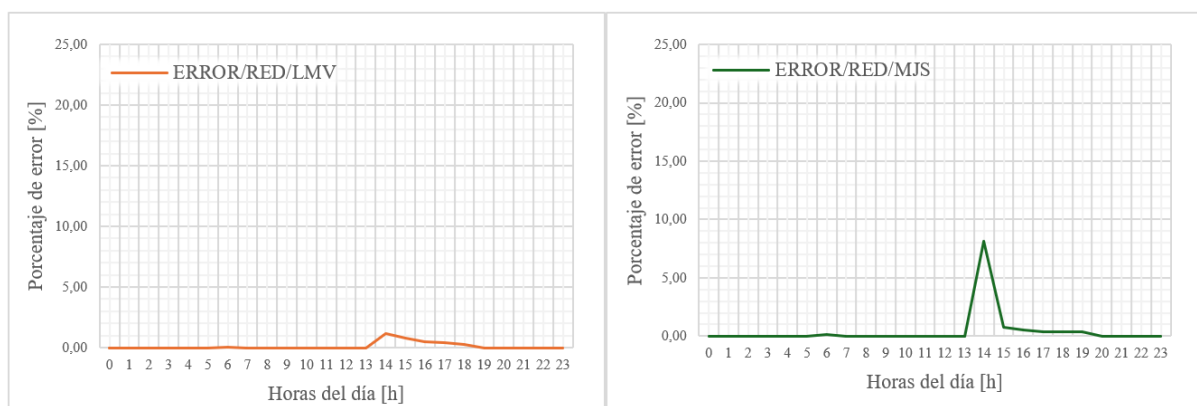


La comparación entre los resultados analíticos y los obtenidos mediante la simulación evidencia un porcentaje de error del 0,46 % para el cargador de 22 kW y del 0,24 % para el cargador de 12 kW. En ambos casos, los errores son inferiores al 1 %, lo que confirma la precisión del modelo implementado y la concordancia entre los resultados teóricos y simulados. A continuación, se analiza el porcentaje de error correspondiente a la corriente RMS intercambiada con la red eléctrica.

La Figura 29 presenta el porcentaje de error asociado a la corriente RMS intercambiada con la red eléctrica. Se observa que el error máximo alcanza un valor de 8,13 %, el cual se presenta durante la conexión de los interruptores (breakers). Este comportamiento obedece al cambio abrupto en el flujo de potencia ocasionado por el inicio del proceso de carga, generando una condición transitoria que incrementa temporalmente el error entre los valores teóricos y simulados.

Figura 29

Porcentaje de error de la corriente RMS intercambiada con la red eléctrica durante la simulación



Conclusiones

El presente trabajo demostró la viabilidad técnica de implementar una microrred basada en fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) para el suministro energético de embarcaciones fluviales eléctricas en el puerto de Turbo, Antioquia.

Se evidenció que la confiabilidad del servicio eléctrico suministrado por la red local permite prescindir de sistemas de almacenamiento dentro de la microrred. Esta condición minimiza la complejidad de diseño y favorece la integración directa de generación fotovoltaica con la red existente.

En contraste con puerto Pisisi, en uno de los puertos de destino, específicamente en bocas del Atrato no se conoce información sobre la infraestructura eléctrica y no existen registros de telemetría en el IPSE, esto impide garantizar que la ruta pueda ser cumplida por la embarcación, dado que debería cargarse en dicho lugar para poder llevar a cabo su regreso.

El análisis de los recursos energéticos disponibles permitió identificar a la energía solar como la principal fuente aprovechable, con un promedio de 4,82 horas sol pico. Por su parte, el recurso eólico fue descartado, dado que presenta velocidades promedio de 1,47 m/s, inferiores a los valores mínimos de operación de turbinas comerciales de baja potencia.

La evaluación de los perfiles operativos de las embarcaciones evidenció que el consumo energético en condiciones de velocidad de planeo representa el escenario más crítico, siendo determinante en el dimensionamiento del sistema. De igual manera, el análisis de las rutas indicó que únicamente cuatro de las siete evaluadas son técnicamente viables con la capacidad actual de almacenamiento de las EFE.

Asimismo, el análisis comparativo entre embarcaciones mostró que aquella de mayor capacidad presenta un mejor desempeño energético y un mayor margen de seguridad en la operación, sin embargo, tarda más tiempo en cargarse, claramente, esto dependerá directamente del cargador que se utilice, y dada la capacidad en los puertos, deben ser de baja potencia como los propuestos aquí.

La embarcación de menor capacidad tiende a operar cerca de sus límites de descarga en ciertos escenarios, lo que podría afectar la vida útil de sus baterías, así como la confiabilidad en el correcto cumplimiento de la ruta, por esto al seleccionar qué embarcación cumplirá cada ruta, se elige la que tiene mayor holgura a nivel de energía tras realizar cada viaje.

Finalmente, las simulaciones desarrolladas en SIMULINK validaron la suficiencia energética del sistema propuesto para el escenario de operación planteado, confirmando que el dimensionamiento propuesto es adecuado y que el sistema tiene el potencial de contribuir a la reducción del impacto ambiental asociado al transporte fluvial.

Referencias

- Alcaldía Municipal de Necoclí. (2016). Plan de gestión integral de residuos sólidos (PGIRS) de Necoclí 2016–2027.
- AutoSolar Colombia. (s. f.). Panel solar bifacial 710 W N-Type Tensite.
- Castillo-Ocaña, G. (2021). Diseño y construcción de un ciclador de baterías. *Revista TECNIA*, 31(1), 10–17.
- CELSA S. A. S. (2025). Ficha técnica cargador residencial CELSA 2025.
- De Ángelo, C. H., & Serra, F. M. (2021). Control of a battery charger for electric vehicles with unity power factor. *Transactions on Energy Systems and Engineering Applications*, 2(1), 33–44. <https://doi.org/10.32397/tesea.vol2.n1.3>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2018). Censo nacional de población y vivienda 2018.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2021). La información del DANE en la toma de decisiones regionales.
- Dirección General Marítima, & Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. (s. f.). Climatología de los principales puertos del litoral Caribe colombiano: Turbo–Golfo de Urabá.
- Empresas Públicas de Medellín. (s. f.). Solicitud de conexión simplificada para AGPE, AG hasta 5 MW y GD.
- Esri. (s. f.). Aplicación web interactiva (ArcGIS Experience Builder).
- Gobernación de Antioquia. (2023). Región de Urabá: descripción geográfica y socioeconómica.
- Gobernación de Antioquia. (2024). Análisis de situación de salud (ASIS) del municipio de Necoclí 2024.
- Gobernación de Antioquia. (s. f.-a). Corregimiento Bocas del Río Atrato.
- Gobernación de Antioquia. (s. f.-b). Corregimiento Nueva Colonia.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2021). Condiciones climáticas del municipio de Turbo, Antioquia.

Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas. (2016). Titumate, Unguía, Chocó.

Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas. (2026). Informe mensual de localidades sin telemetría de las ZNI: enero 2026.

Ministerio de Energía de Chile. (2018). Guía de operación y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos.

Ministerio de Transporte. (2020). Transporte en cifras: vigencia 2019.

Ministerio de Transporte. (2021). Estadísticas de transporte fluvial 2005–2021.

Organización Latinoamericana y Caribeña de Energía. (2025). Movilidad eléctrica en América Latina y el Caribe: cifras 2024.

Proyecto ECOTEA: Desarrollo de una embarcación eléctrica ecoamigable, en el marco de la transición energética para el transporte fluvial de carga y pasajeros en el río Atrato. (2023). Informe final.

Torqueedo GmbH. (s. f.). Deep Blue: Electric propulsion system [Folleto técnico].

Urabá Caribe. (2022). La región de Urabá antioqueño: dinámica portuaria y comercial.

Apéndices

Apéndice A Datos de placa del transformador disponible en el puerto

Transformador: 400215	
Circuito de Conexión	402-16
Estado	OPERACION
Nodo Transformador	400215
Voltaje nominal (kV)	7.621
No. Transformador	400215
Tipo propietario	EPM
Capacidad Nominal [kW]	75
Departamento	ANTIOQUIA
Municipio	TURBO
Subestación	TURBO
Tensión Secundaria [V]	240/120
Color Energia	ROJO
Sumatoria Energia [kW]	35,000
Color Potencia	NARANJA
Sumatoria Potencia [kW]	35,000
Coordenada GPS Latitud	8,09
Coordenada GPS Longitud	-76,73
Última Actualización	8/Jul/2026

Apéndice B Sistema de propulsión estándar Deep Blue de Torqeedo

- Sistema de propulsión**

Tipo de motor: *Fuera de borda*

Número de motores: 2

Potencia por motor: *50 kW*

Potencia nominal por motor: *55,1 kW*

Potencia total instalada: *100 kW*

Potencia nominal total: *110,2 kW*
- Sistema de almacenamiento de energía (baterías)**

Modelo: *Deep Blue Battery 40*

Tipo: *Ion-Litio*

Voltage: *352 VDC*

Cantidad de baterías: 2

Capacidad por batería: *60 Ah*

Energía nominal por batería: *42,0 kWh*

Energía nominal total: *84,0 kWh*

Profundidad de descarga (DoD): *90 %*

Energía utilizable por batería: *37,8 kWh*

Energía utilizable total: *75,6 kWh*
- Régimen de velocidad**

Velocidad promedio en calma: *21,3 km/h (11,5 nudos)*

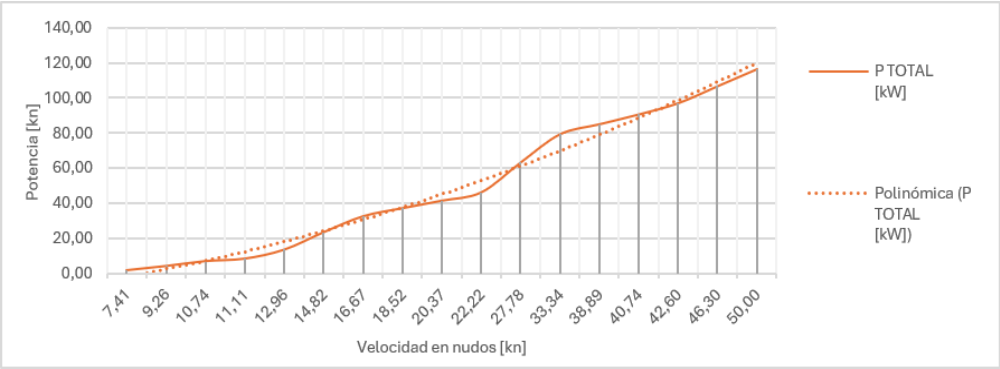
Velocidad de planeo (inicio): *18,0 km/h (9,7 nudos)*

Velocidad de planeo típica: *25,0 km/h (13,5 nudos)*

Velocidad máxima: *33,3 km/h (18,0 nudos)*



Apéndice C Curva de resistencia al avance ECOTEA



Apéndice D Sistema de propulsión estándar Deep Blue de 200 kW de Torqueado

Sistema de propulsión

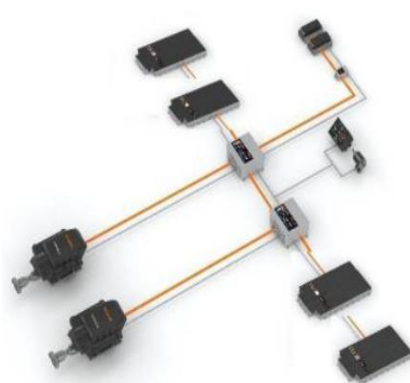
Tipo de motor: *Intraborda*
 Número de motores: 2
 Potencia por motor: *93 kW*
 Potencia nominal por motor: *100 kW*
 Potencia total instalada: *187 kW*
 Potencia nominal total: *200 kW*

Sistema de almacenamiento de energía (baterías)

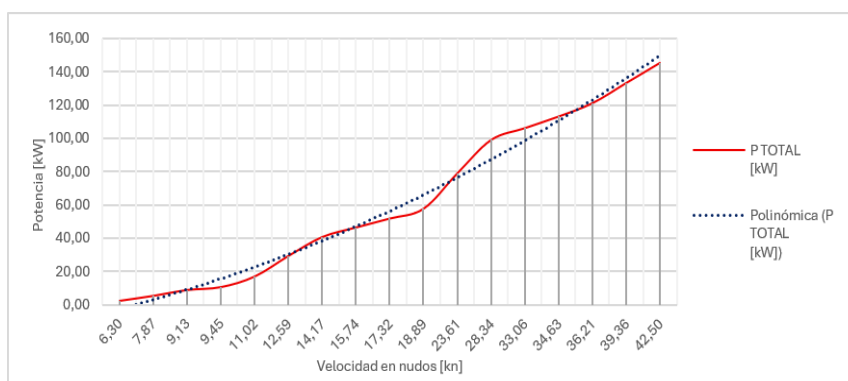
Modelo: *Deep Blue Battery 40*
 Tipo: *Ion-Litio*
 Voltaje: *352 VDC*
 Cantidad de baterías: 4
 Capacidad por batería: *60 Ah*
 Energía nominal por batería: *42,0 kWh*
 Energía nominal total: *168,0 kWh*
 Profundidad de descarga (DoD): *90 %*
 Energía utilizable por batería: *37,8 kWh*
 Energía utilizable total: *151,2 kWh*

Régimen de velocidad

Velocidad promedio en calma: *29,6 km/h (16,0 nudos)*
 Velocidad de planeo (inicio): *25,0 km/h (13,5 nudos)*
 Velocidad de planeo típica: *34,7 km/h (18,7 nudos)*
 Velocidad máxima: *46,3 km/h (25,0 nudos)*



Apéndice E Curva de resistencia al avance grande



Apéndice F Datos correspondientes a las EFE

Los siguientes datos de cada perfil de embarcación, se usaron para para verificar las rutas que pueden ser cubiertas en función de la demanda energética requerida para cada trayecto

- Embarcación pequeña.

RUTA	SALIDA	DESTINO	km	POTENCIA MOTORES [kW]	CAPACIDAD BATERIAS [kWh]	VELOCIDAD DE PLANE0 [km/h]	POTENCIA A VELOCIDAD DE PLANE0 [kW]	TIEMPO DE VIAJE [h]	CONSUMO [kWh]
1	P PISISI	Nueva Colonia	25,1	100	75,6	25,0	53,955	1,177	54,11
2	P PISISI	Bocas del Atrato	19,2	100	75,6	25,0	53,955	0,901	41,42
3	P PISISI	Playa Tié (Tié)	30	100	75,6	25,0	53,955	1,407	64,66
4	P PISISI	Punta de Piedra	24,7	100	75,6	25,0	53,955	1,162	53,39
5	P PISISI	Titumate (Unguía — Chocó)	55,6	100	75,6	25,0	53,955	2,608	119,888
6	P PISISI	Necoclí	50,1	100	75,6	25,0	53,955	2,350	108,040
7	P PISISI	Casablanca (Necoclí)	45,9	100	75,6	25,0	53,955	2,153	98,975
8	P PISISI	El Totumo (Necoclí)	42	100	75,6	25,0	53,955	1,974	90,731

- Embarcación grande.

RUTA	SALIDA	DESTINO	km	POTENCIA MOTORES [kW]	CAPACIDAD BATERIAS [kWh]	VELOCIDAD DE PLANE0 [km/h]	POTENCIA A VELOCIDAD DE PLANE0 [kW]	TIEMPO DE VIAJE [h]	CONSUMO [kWh]
1	P PISISI	Nueva Colonia	25,1	187	151,2	34,7	117,786	0,848	85,05
2	P PISISI	Bocas del Atrato	19,2	187	151,2	34,7	117,786	0,649	65,10
3	P PISISI	Playa Tié (Tié)	30	187	151,2	34,7	117,786	1,013	101,64
4	P PISISI	Punta de Piedra	24,7	187	151,2	34,7	117,786	0,836	83,93
5	P PISISI	Titumate (Unguía — Chocó)	55,6	187	151,2	34,7	117,786	1,878	188,461
6	P PISISI	Necoclí	50,1	187	151,2	34,7	117,786	1,692	169,835
7	P PISISI	Casablanca (Necoclí)	45,9	187	151,2	34,7	117,786	1,550	155,586
8	P PISISI	El Totumo (Necoclí)	42	187	151,2	34,7	117,786	1,421	142,626

Apéndice G Ficha técnica de los cargadores

Las siguientes imágenes corresponden a las fichas técnicas de los cargadores tomados como referencia para el estudio.

- Cargador 22 [kW] marca Zhejiang Benyi New Energy Co.

Structure Description	
Shell Material	Galvanized Sheet
Dimension	680*380*200(L*W*H mm)
Weight	≤ 46.5kg
Installation Method	Wall-mounted/Column installation (optional)
Cable Routing	Bottom Inlet Wiring,Bottom Outlet Wiring
Total length of gun cable	5 m
Charging Outlets	Single (CCS1/CCS2/GBT/CHADEMO/NACS)
Connectivity Authorization	RFID, App
Screen	5 Inch LCD Screen / LED Light
Electrical Specification	
AC Input Voltage	AC380V-415V,3P+N+PE
Rated Input Current	35A
Input Frequency	50Hz/60Hz
Consumption	≤ 10w
Rated Power	22kW
Output Voltage Range	CCS1/CCS2/GBT/NACS: 150 Vdc ~1000 Vdc CHADEMO: 150 Vdc ~500 Vdc
Output Current	0~73.3A
Efficiency	≥95%
Power Factor	≥0.99(load:100%)

- Cargador 12 [kW] marca Celsa.

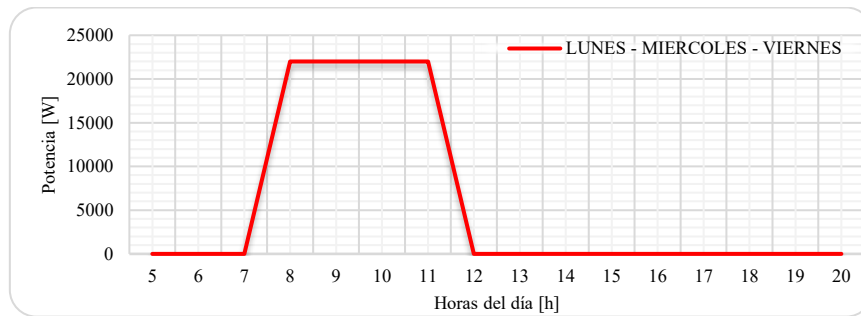
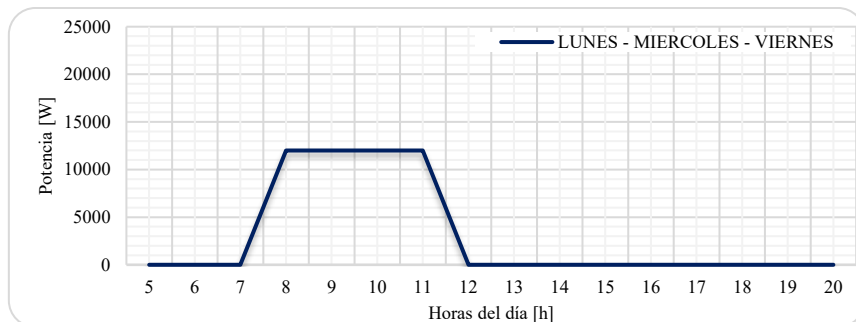
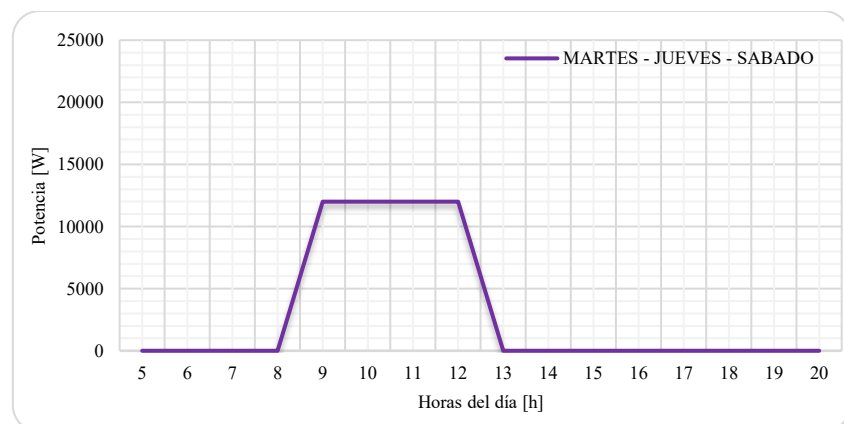
Características Generales:

Familia	Doméstica
Longitud de cable	4.7 m
Colores	Blanco y Negro (personalizable)
Materiales	Vidrio templado y aluminio
Dimensiones cm (LxWxH)	28.5 x 26.2 x 11.5
Peso incluyendo cable	7 kg
Temperatura de operación	-25°C a 40°C
Temperatura de Almacenamiento	-25°C a 40°C
Certificación	Conformidad de producto RETIE

Especificaciones Eléctricas:

Potencia máxima	12kW
Tensión de operación	110 o 220 V
Corriente máxima	50A
Tipos de conector	Tipo 1, Tipo 2, Tipo GB/T
Frecuencia nominal	60Hz
Grado de protección	IP54
Protecciones	Protección diferencial Desconexión a tierra Detección de rele atascado Mecanismo de enclavamiento*

* Enclavamiento mecánico conector/vehículo

Apéndice H Consumo en puerto Nueva Colonia**Apéndice I** Consumo en puerto Bocas del Atrato.**Apéndice J** Consumo en puerto Playa Tie**Apéndice K** Consumo en puerto Punta de piedra

Apéndice L Consumo en puerto Pisis